Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральный исследовательский центр
Южный научный центр Российской академии наук

АЗОВСКОЕ МОРЕ: ОКЕАНОГРАФИЯ, ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ, ГИДРОБИОЛОГИЯ

(в научных трудах академика Г.Г. Матишова
и сотрудников ЮНЦ РАН)

Том III
(сентябрь 2020 г. – февраль 2022 г.)

Москва
Издательство «Наука»
2022

УДК 551.351.2(262.54)+551.462.32(262.54)
А35

Ответственный редактор
академик Г.Г. Матишов

Редакционная коллегия:
д.г.н. С.В. Бердников, к.б.н. Н.И. Булышева, к.б.н. В.В. Титов,
к.б.н. О.В. Степаньян, к.г.н. Е.Э. Кириллова, к.г.н. А.В. Клещенков

А35 **Азовское море: океанография, физическая география, гидробиология** (в научных трудах академика Г.Г. Матишова и сотрудников ЮНЦ РАН). Том III (сентябрь 2020 г. – февраль 2022 г.). – М.: РАН, 2022. – 424 с. – ISBN 978-5-907366-67-1.

Издание представляет собой репринтное воспроизведение избранных статей, опубликованных в 2020–2022 гг. в ведущих научных журналах России: «Доклады Академии наук», «Океанология», «Известия РАН. (АН СССР). Серия Географическая», «Водные ресурсы», «Наука Юга России», «Морской гидрофизический журнал» и др.

В сборник вошли научные публикации, которые расширяют современные представления о состоянии и изменениях в экосистеме Азовского моря в условиях резкого роста солености морской воды и маловодья. Приведены новые результаты комплексных исследований с 2020 по 2022 г. в области геоморфологии, палеогеографии, гидрологии, гидрохимии, радиационной экологии, гидробиологии, экологии моря, охраны природы, математического моделирования природных систем, а также представлены теоретические аспекты исследования морей. Особое внимание уделено организации и проведению морских научных исследований на флагманах научного флота юга России – НИС «Денеб» и НИС «Профессор Панов», работающих более 20 лет на благо российской науки в южных морях России. Выявлены особенности функционирования морских и прибрежных экосистем в зависимости от сезонной, годовой и многолетней динамики климатических факторов и антропогенного воздействия. Показаны основные причины изменения структуры и продуктивности сообществ гидробионтов и последствия катастрофического снижения рыбопродуктивности Азовского моря. Представлены ранее не известные страницы палеоистории юга России в голоцене, которые позволяют прогнозировать состояние экосистемы.

Книга ориентирована на широкий круг специалистов в области географии, океанографии, гидробиологии, экологии, а также на студентов и преподавателей вузов.

УДК 551.351.2(262.54)+551.462.32(262.54)

ISBN 978-5-907366-67-1

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
Federal Research Centre
The Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences

THE SEA OF AZOV: OCEANOGRAPHY, PHYSICAL GEOGRAPHY, AND HYDROBIOLOGY

(In scientific works by Academician RAS Matishov, G.G., and SSC RAS employees)

Volume III
(September 2020 – February 2022)

Moscow
Nauka Publishers
2022

UDC 551.351.2(262.54)+551.462.32(262.54)
S43

S43 **(2022) The Sea of Azov: Oceanography, Physical Geography, and Hydrobiology**
(In scientific works by Academician RAS Matishov, G.G., and SSC RAS employees). Volume III (September 2020 – February 2022). Moscow: RAS, 424 p. (In Russian).
ISBN 978-5-907366-67-1.

The edition is a collection of reprints of selected papers published in 2020–2022 in the leading scientific journals of Russia: 'Doklady Akademii Nauk', 'Oceanology', 'Izvestiya Akademii Nauk. Geographical Series', 'Water Resources', 'Nauka Yuga Rossii (Science in the South of Russia)', 'Marine Hydrophysical Journal (Physical Oceanography)', etc.

The collection includes scientific papers which expand the contemporary notion of the status and changes in the Sea of Azov ecosystem under the conditions of a sharp salinity increase in sea and shallow waters. New results of integrated studies implemented from 2020 to 2022 on geomorphology, paleogeography, hydrology, hydrochemistry, radiation ecology, hydrobiology, marine ecology, nature protection, mathematical modelling of natural systems are given, as well as theoretical aspects of marine studies are presented. Particular focus is on the organization and implementation of research sea cruises on board the flagships of research fleet of the South of European Russia – RV Deneb and RV Professor Panov, operating for more than 20 years in the southern seas of Russia for the benefit of the Russian science. Specific features of marine and coastal ecosystems' functioning have been determined depending on the seasonal, annual, and long-term dynamics of climatic factors and anthropogenic impacts. The main causes of changes in the structure and productivity of hydrobionts' communities and the consequences of a drastic reduction in the Sea of Azov fish capacity are indicated. Previously unknown data on the paleohistory of the South of Russia in the Holocene are presented, allowing forecasting the status of ecosystems.

The publication is intended for a wide range of specialists in geography, oceanography, hydrobiology, ecology, as well as for students and teachers of higher educational establishments.

UDC 551.351.2(262.54)+551.462.32(262.54)

ISBN 978-5-907366-67-1

ПРЕДИСЛОВИЕ

Азовское море – уникальный во многих отношениях водоем, который в последние годы находится в центре геополитических событий, разворачивающихся возле южных рубежей России. После воссоединения Крыма с Россией в 2014 г. де-факто российская часть акватории моря существенно увеличилась, а после начала специальной военной операции в феврале 2022 г. Азовское море стало внутренним водоемом России и Донецкой народной республики. Кроме того, в предыдущие годы существенно возросла антропогенная нагрузка на акваторию и прибрежную зону, увеличились риски техногенных воздействий и аварий, особенно в условиях изменения климата на юге России с начала XXI века. Речной бассейн Азовского моря формируется в условиях семиаридного и отчасти аридного климата, чрезмерной нагрузки рыболовства, в том числе нелегального, увеличения интенсивности балкерного и танкерного судоходства, возрастающего водопотребления в Крыму, Краснодарском крае, Ростовской области, на прилегающих территориях соседних государств.

Требуется пристальное изучение всего водоема и бассейна Азовского моря, ниже перечислены шесть наиболее важных направлений, представляющих научный интерес.

1. Азовское море – солоноводный морской бассейн, для которого характерны периоды распреснения и осолонения под влиянием климатической цикличности и сокращения речного стока Дона, Кубани и многих малых рек.

2. В последние годы для Азовского моря сложилась ситуация, ранее не отмечавшаяся, когда одновременно растет годовая температура и соленость морской воды. Фактически экосистема данного водоема находится в новой уникальной фазе своего развития. Вместе с тем Азовское море является уже много десятилетий одним из самых эвтрофированных морских водоемов в России, и тенденция к росту эвтрофированности сохраняется.

3. С 2010 г. Азовское море начало утрачивать свое рыбохозяйственное значение, несмотря на то что в 1930-е гг. уловы в бассейне Азовского моря достигали 300 тыс. т (из них осетровых – 8 тыс. т). В последние годы вылов рыбы России в Азовском море не превышает 12–15 тыс. т, при этом основу уловов составляют чужеродные виды-вселенцы, значительная часть из которых в прежние годы считалась малоценными и даже сорными видами рыб. Азовское море является зоной, где рыбный промысел вели Российская Федерация и Украина (до февраля 2022 г.). Ранее промысловые запасы и лимиты для отлова определялись в обеих странах, однако в условиях проведения специальной военной операции в 2022 г. рыбный промысел в Азовском море практически полностью прекратился, что, несомненно, отразится на ситуации с рыбными запасами. В какую сторону: увеличения или уменьшения запасов – покажут будущие исследования.

4. Азовское море – транзитный, обладающий высокой инвазионной емкостью водоем (инвазийный «коридор»: Атлантика – Средиземноморье – Каспий) для многих видов-вселенцев. В целом Азовское море характеризуется малой инертностью и быстрой реакцией на естественные и антропогенные воздействия, что приводит к существенной динамике гидролого-

гидрохимического режима. Уникальные физико-географические условия определяют высокую биологическую продуктивность водоема, в то же время вторичная продуктивность водоема, обусловленная промысловыми рыбами, существенно снизилась.

5. Палеогеографические исследования на акватории Азовского моря и прибрежной территории – это ключ к пониманию природных и климатических процессов в Евразии на протяжении всего голоцена. Именно Азовское море в силу своих природных особенностей является отличным источником палеогеографической летописи. Сейсмоакустические исследования, обор кернов в морской части, бурение в прибрежной части акватории открывают малоизвестные страницы палеоистории Южного региона, позволяют накапливать обширный материал для прогнозирования состояния среды и биоты.

6. Азовское море – это полигон для отработки новейших технологий мониторинга водной и воздушной среды, опасных природных процессов. Разработанные методы и подходы могут быть использованы и в других регионах России, прежде всего Северном Каспии.

За 20-летний период существования ЮНЦ РАН ученые получили ряд важнейших результатов:

– разработана принципиально новая батиметрическая карта Азовского моря и Таганрогского залива. Детальное отражение рельефа позволяет выявить многие океанографические и биологические закономерности, в том числе особенности волнового движения, течений, осадконакопления, миграций рыб и гидробионтов;

– в результате анализа детальной топографии дна, гранулометрии и закономерностей подводного рельефа составлена новая карта донных отложений Азовского моря (масштаб 1 : 280 000), в настоящее время существующая как в классическом бумажном виде, так и в виде цифровой масштабируемой 3D-модели;

– разработан биологический экспресс-метод оценки состояния водных экосистем, подверженных антропогенному загрязнению, позволяющий определять уровень антропогенного эвтрофирования, токсического загрязнения и степень нарушенности равновесия в биоценозах;

– получена новая концептуальная схема течений в Азовском море в условиях кардинальной перестройки водоема при маловодье и осолонении водных масс;

– опубликован Атлас климатических изменений в Больших морских экосистемах Северного полушария (1878–2013 гг.).

– Вышли серии монографий, посвященных оценке состояния экосистемы и рыбных запасов Азовского моря и Нижнего Дона (более 30 книг), а также палеоистории Южного региона России (5 книг).

Настоящее издание можно рассматривать как краткий обзор развития исследований Азовского моря и прибрежных территорий, выполненных в 2021–2022 гг. академиком Г.Г. Матишовым, его учениками и сотрудниками ЮНЦ РАН.

Данная книга является продолжением публикаций в рамках репринтного воспроизведения трудов академика Г.Г. Матишова и его коллег из ЮНЦ РАН[1].

[1] См.: Азовское море: океанография, физическая география, гидробиология в научных трудах академика Г.Г. Матишова. Репринтное воспроизведение статей 1998–2017 гг. акад. Г.Г. Матишова и соавт. – Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2018. – 552 с.; Азовское море: океанография, физическая география, гидробиология (в научных трудах академика Г.Г. Матишова и сотрудников ЮНЦ РАН). Том II (2018–2020). – Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2020. – 448 с.

ГЕОМОРФОЛОГИЯ, ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ

УДК 551.46 (268.1+262.24)

ЦИКЛИЧНОСТЬ КЛИМАТА В ПРИАЗОВЬЕ: ГОЛОЦЕН И СОВРЕМЕННЫЙ ПЕРИОД (XIX–XXI вв.)[1]

© 2021 г. Академик РАН Г. Г. Матишов[1,2,*], Л. В. Дашкевич[1], Е. Э. Кириллова[1]

Поступило 02.12.2020 г.
После доработки 13.12.2020 г.
Принято к публикации 03.02.2021 г.

В статье на основе методов палеогеографии показана цикличность климата в Приазовье. Представлены результаты бурения косы Долгой Азовского моря. Диатомовые и палинологические спектры, датировки грунтовых колонок указывают на цикличность климатических изменений и ускоренное заиление дельты Дона при зарегулированном стоке. Скорость осадконакопления в Азовском море на протяжении древне- и новоазовского этапов изменялась от 0.2 до 2.0 мм/год. В современный период в условиях маловодья и отсутствия паводков седиментация глинистых илов достигала на авандельте 10–30 мм/год. На основе анализа гидрометеорологической информации отрезок истории (1884–2020 гг.) можно разделить на три периода: I – холодный, II – переходный, III – теплый. Исследование указанной специфики развития природных явлений даст основание ожидать в ближайшие десятилетия очередной переходный период с резкими межгодовыми колебаниями температур, с чередованием теплых и суровых зим.

Ключевые слова: климатическая изменчивость, палеоклимат, поздний голоцен, цикличность водного режима, лавинная седиментация

DOI: 10.31857/S2686739721050091

ВВЕДЕНИЕ

Исследования климатической изменчивости в Приазовье и Нижнем Дону требуют комплексного подхода с целью определения тенденций в будущем. Среди ритмических явлений природы циклические колебания в отличие от периодических событий характеризуются переменной их продолжительностью [1]. Циклы колебаний могут быть многовековыми, вековыми и внутривековыми, с продолжительностью соответственно – 1800–1900, 100, 30–40, 17, 11 лет и др. [1–3].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Натурные данные ЮНЦ РАН собраны в 2000–2020 гг. В 2016–2020 гг. впервые проведено бурение (до 20–30 м) на косах Очаковской, Чумбурской, Беглицкой и Долгой [4]. Колонки донных отложений отбирались гравитационной и вибрационной трубками с НИС "Денеб" и "Профессор Панов". Послойно отобраны раковины моллюсков с описанием видовой принадлежности, степени сохранности и фотографированием материала. Для палинологического и диатомового анализов из колонок (до 2.8 м) отбирались пробы с частотой 2–5 см. Это позволило охарактеризовать растительный покров побережья Приазовья [5, 6]. Возраст ново- и древнеазовских отложений установлен по более 100 датировкам [4–6]. Абсолютный возраст определялся радиоуглеродным методом (^{14}C) по образцам раковин моллюсков в СПбГУ. Календарный возраст установлен с помощью программ "CalPal 2007_HULU" и "OxCal 4.2", калибровочная кривая "IntCal 13".

Климатическая изменчивость в зимний сезон оценена по историческим рядам наблюдений за температурой воздуха на гидрометеостанциях в Таганроге, Геническе, Керчи [7–10]. Для каждой зимы за 1884–2020 гг. рассчитаны средние за сезон значения температуры и отклонения от многолетней нормы (1961–1990 гг., принят Всемирной метеорологической организацией для долгосрочной оценки изменений климата). Согласно методике [9] была дана оценка характера зимних сезонов.

[1] *Федеральный исследовательский центр "Южный научный центр Российской академии наук", Ростов-на-Дону, Россия*
[2] *Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра Российской академии наук, Мурманск, Россия*
**E-mail: matishov_ssc-ras@ssc-ras.ru*

[1] **Оригинальный текст:** *Матишов Г.Г., Дашкевич Л.В., Кириллова Е.Э.* Цикличность климата в Приазовье: голоцен и современный период (XIX–XXI вв.) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 498. № 1. С. 96–100.

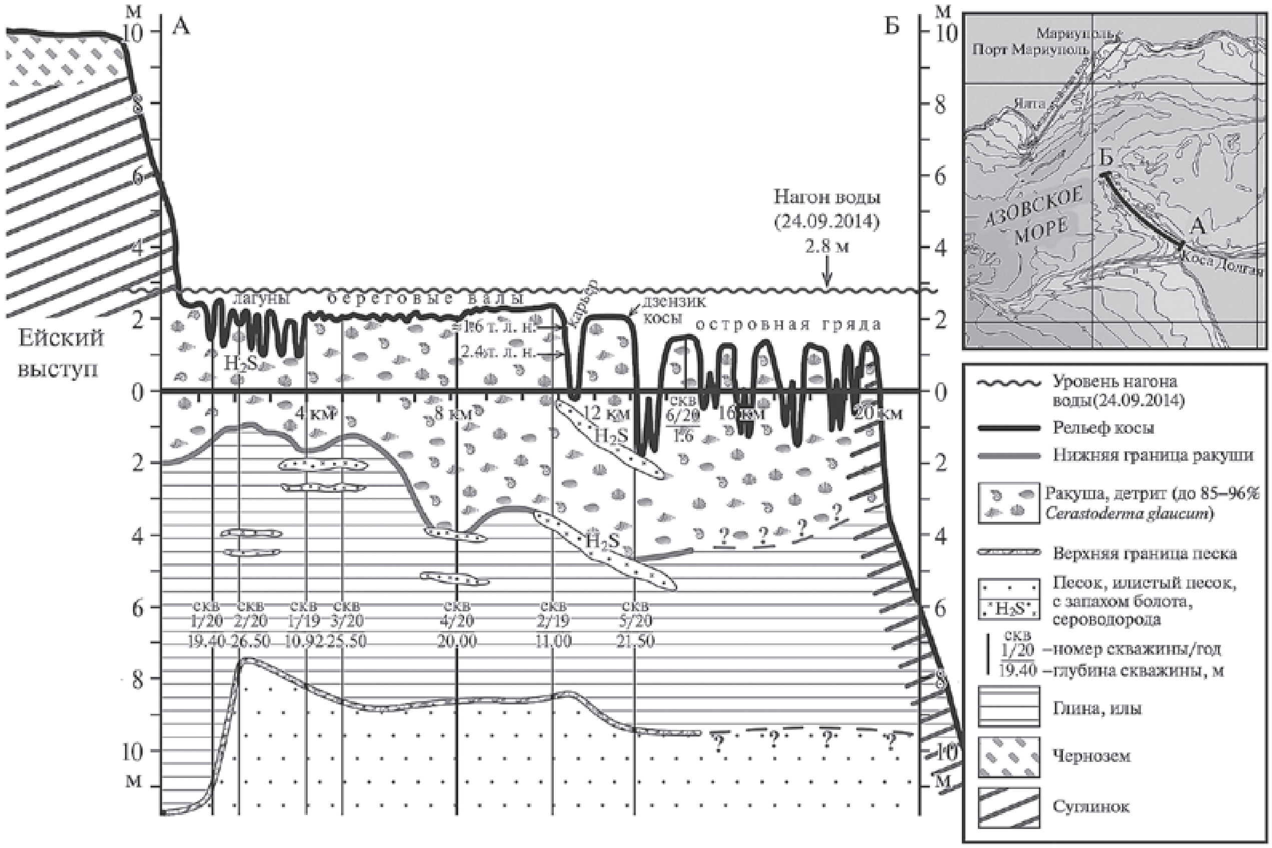


Рис. 1. Геоморфологический разрез косы Долгой (по данным бурения).

ПАЛЕОКЛИМАТ

На протяжении последних тысячелетий в Приазовье растительный покров и климат не оставались постоянными [4–6, 11]. Вторая половина голоцена включала четыре относительно прохладные и гумидные (5500–4000, 3200–2500, 1800–1500, 650–150 л.н.) и три более теплые и засушливые фазы (4000–3200, 2500–1800, 1500–650 л.н.). Почвообразование происходило в атлантическое (~6000–5500 л.н.) и суббореальное (4500–2500 л.н.) время. В период греческой колонизации (2700–2400 л.н.) возникло земледелие [5].

Существенно дополнили представления о палеоклимате Азовского моря данные бурения на косе Долгой в 2019–2020 гг. [4]. Суммируя новую информацию по скважинам бурения, датировкам абсолютного возраста ракушечных отложений, можно проанализировать палеогеографию косы (рис. 1). Аккумулятивное тело косы сформировалось в основном в период от 1920 ± 110 (ЛУ-9756) до 2500 ± 150 (ЛУ-9757) лет назад, во время нимфейской трансгрессии [4]. Раковины и детрит моллюсков представлены в основном родом *Cerastoderma* Poli, 1795 (более 95%). Нимфейская трансгрессия ассоциируется с накоплением на шельфе отложений новоазовского возраста (3.1–0 тыс. л.н.). На ритмику развития косы указывают шесть генераций древних береговых валов. С 1890 по 2000 г. прослеживаются процесс волнового размыва и уменьшение длины косы Долгой (за 1890–1958 гг. – на 1.35 км).

АРИДИЗАЦИЯ КЛИМАТА

За 1884–2020 гг. более трети суровых зим пришлись на конец XIX–начало XX вв., а теплых – на начало XXI века. Наиболее морозные (среднезимняя температура около –6°C) зафиксированы в 1891, 1896 и 1911 г. (рис. 2). Можно выделить условно “холодный” (до середины 1940-х годов) и “теплый” (с середины 1980-х годов) периоды. Их разделяет переходный период с достаточно резкими межгодовыми колебаниями температур. Самая суровая и снежная зима была в 1953–1954 гг.: на побережье средняя температура воздуха за зимний сезон составила –9°C. На переходный этап пришлась и самая теплая зима в 1965–1966 гг., со среднезимней температурой воздуха +3.3°C. Для всех периодов в Приазовье характерно чередование суровых и теплых зим. Второй по тепло-

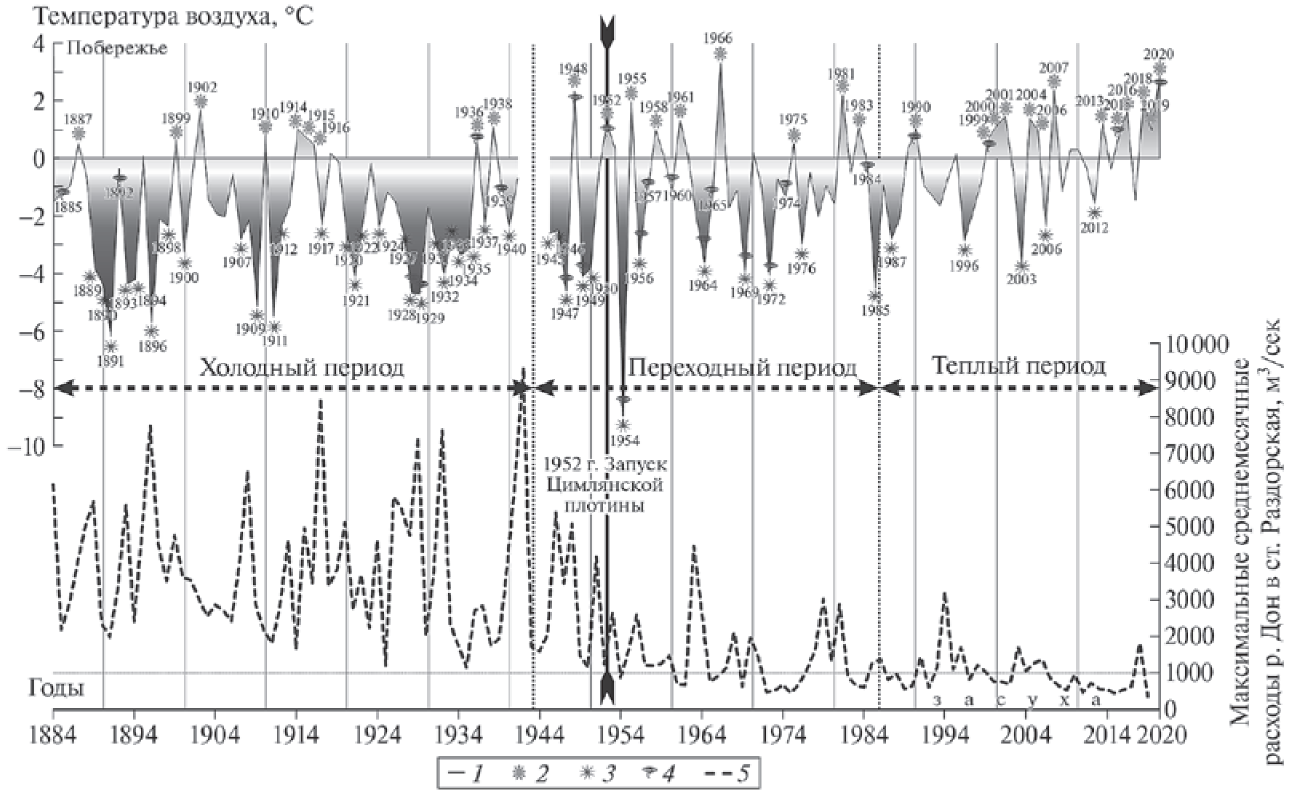


Рис. 2. Климатические изменения в Приазовье по гидрометеорологическим данным (1884–2020 гг.) 1 – средняя температура воздуха за зимний сезон в Приазовье, 2 – теплые зимы, 3 – суровые зимы, 4 – пыльные бури в Ростовской области, 5 – максимальные среднемесячные расходы р. Дон ст. Раздорская (м^3/сек).

вому рангу за более чем 130 лет наблюдений стала зима 2019–2020 гг. В XXI веке число дней со льдом в зимний сезон в Таганрогском заливе в среднем составляло около 50 дней.

В конце XX–XXI веке Приазовье находится в условиях дефицита водных ресурсов, отсутствия половодья, исключительно большого испарения и засухи [11, 12]. Преобладание устойчивых антициклонов приводит к сильным восточным ветрам-суховеям. За период 1884–2020 гг. число сильных пыльных бурь в Ростовской области составило более 20 [12] (рис. 2), за последние 20 лет – в 2015 и 2020 г.

ВНУТРИВЕКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ ВОДНОГО РЕЖИМА

В 1884–2020 гг. водный режим Дона изменялся с определенной цикличностью (рис. 2). Анализ максимальных среднемесячных расходов р. Дон у ст. Раздорской позволил выделить характерные периоды: I – 1884–1942 гг. (3200 м^3/с); II – 1943–1985 гг. (1200 м^3/с); III – 1986–2020 гг. (1000 м^3/с). Если ориентироваться на средние минимальные расходы воды, то по периодам они следующие: I – 400 м^3/с, II и III – 325–335 м^3/с.

С 1952 г. естественный ход речного стока зарегулирован Цимлянской плотиной. Минимально гарантированный судоходный попуск – 340 м^3/с. После зарегулирования реки сброс воды объемом в 30 км^3 являлся оптимальным (в расчет при проектировании брались влажные 1941–1942 гг., когда у ст. Раздорской расходы воды достигали 6300–9300 м^3/с [11, 12]). В многоводный период сток Дона достигал 52 км^3. В маловодные годы изъятие даже 24 км^3 речной воды для нужд Цимлянского водохранилища усиливает черноморскую адвекцию в Азовское море [11]. К маловодным отнесены 2009, 2011, 2014 и 2015, 2020 г. В 2015 г. объем половодья на Цимлянском водохранилище не превышал величины 4 км^3 (35% нормы), а максимальный расход – 790 м^3/с (25% нормы). В 2020 г. среднегодовой расход составил 316 м^3/с, в ноябре минимальный – 280 м^3/с.

Осадконакопление в эпоху зарегулирования Дона. С 1952 г. из-за зарегулирования стока естественный процесс седиментации на Нижнем Дону претерпел радикальные изменения. Сокращение сбросов воды, отсутствие паводкового дренажа

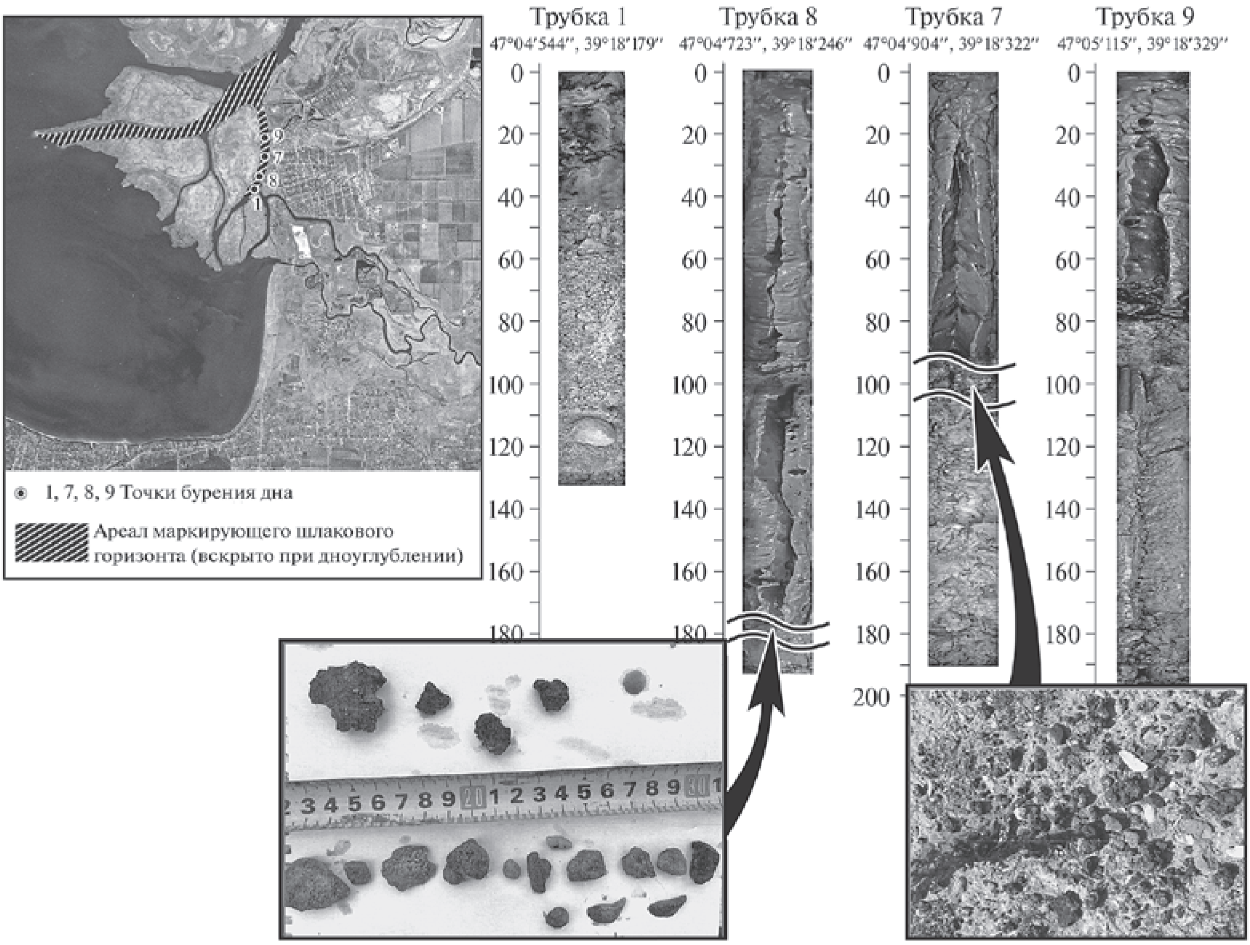


Рис. 3. Маркирующий горизонт по угольному шлаку 1860–1960 гг.

привели к заилению дельты. В устьевой зоне наслоился характерный покров илистых отложений мощностью 1.0–2.5 м. Край дельты на 10–40 м выдвинулся в Азовское море.

Эпоха паровых судов (1860–1960 гг.) на Нижнем Дону маркируется шлаковым горизонтом, вскрытым грунтовыми трубками и при дноуглублении. Пароходы, курсировавшие от Ростова-на-Дону до Азова, Кагальника, Таганрога, брали на борт за одну загрузку порядка 85 т угля [13]. На дне судоходных каналов сформировался пласт до 3–10 см угольного шлака (рис. 3).

Маркирующий шлаковый горизонт, с резким несогласием залегающий на аллювиальных мелко-среднезернистых песках (сформировались паводковыми течениями до зарегулирования Дона), позволил рассчитать скорость седиментации во второй половине XX–XXI веков. Скорость осадконакопления в Азовском море на протяжении древне- и новоазовского этапов изменялась от 0.2 до 2.0 мм/год [4–6, 11]. Учитывая расположение маркирующего горизонта на глубине 1–2 м (рис. 3), скорость седиментации глинистых илов в современный период достигала на авандельте 10–30 мм/год. В сравнении со скоростью накопления новоазовских отложений на шельфе указанные величины на полтора порядка выше.

ВЫВОДЫ

Анализ гидрометеорологических и палеогеографических данных (с древнеазовской трансгрессии, пик 6000–3000 л.н.) дает основания для реконструкций. 1) По данным бурения аккумулятивных форм [4–6] частые изменения уровня Азовского моря предопределили стратифицированный характер осадочных толщ. Диатомовые и палинологические спектры, датировки грунтовых колонок указывают на цикличность климатических изменений и ускоренное заиление дельты при зарегулированном стоке. 2) Отрезок истории (1884–2020 гг.) можно разделить на три периода: I – холодный, II – переходный, III – теплый (маловодный). В конце XX и XXI века преобладали засушливые годы, с сокращением запасов воды в бассейне р. Дон и осолонением Таганрогского залива. В условиях маловодья и отсутствия паводков в дельте развивалась лавинная седиментация. Исследование указанной специфики развития природных явлений дает основание ожидать в ближайшие десятилетия очередной переходный период с резкими межгодовыми колебаниями температур, с чередованием теплых и суровых зим, относительно влажным климатом.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Публикация подготовлена в рамках гранта РНФ № 16-17-10170-П (Матишов Г.Г.) и ГЗ ЮНЦ РАН № АААА-А18-118122790121-5 (Дашкевич Л.В.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Калесник С.В.* Общие географические закономерности Земли. М.: Мысль, 1970. 283 с.
2. *Зубаков В.А.* Глобальные климатические события плейстоцена. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 286 с.
3. *Марков К.К., Величко А.А.* Четвертичный период. т. 3. М.: Недра, 1967. 440 с.
4. *Матишов Г.Г., Польшин В.В., Титов В.В.* Исследования отложений кос Азовского моря (на примере косы Долгой) // Океанология. 2020. Т. 60. № 1. С. 158–161. https://doi.org/10.31857/S0030157420010165
5. *Матишов Г.Г., Дюжова К.В., Ковалева Г.В. и др.* Новые данные об осадконакоплении и биостратиграфии древне- и новоазовских отложений (Азовское море) // ДАН. 2016. Т. 467. № 4. С. 463–467. https://doi.org/10.7868/S0869565216100194
6. *Матишов Г.Г., Ковалева Г.В., Арсланов Х.А. и др.* Результаты радиоуглеродного датирования голоценовых отложений Азовского моря // ДАН. 2018. Т. 479. № 6. С. 655–658. https://doi.org/10.7868/S0869565218120113
7. *Climatic Atlas of the Sea of Azov* 2008 / NOAA Atlas NESDIS 65, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 2008. 148 p.
8. Гидрологический справочник морей СССР т. 3 Азовское море / под ред. Н.М. Книповича, Г.Р. Брегмана. Л.-М.: Гидрометеоиздат, 1937. Вып. 2–3. 731 с.
9. Гидрометеорологический справочник Азовского моря / под ред. А.А. Аксенова Л: Гидрометеорологическое изд., 1962. 856 с.
10. http\\: meteo.ru
11. *Матишов Г.Г.* Климат, водные ресурсы и реконструкция гидротехнических сооружений с учетом интересов населения, рыболовства и сельского хозяйства, судоходства и энергетики. – Доклад на расшир. засед. Президиума ЮНЦ РАН. Ростов н/Д: изд. ЮНЦ РАН, 2016. 64 с.
12. *Панов В.Д., Лурье П.М., Ларионов Ю.А.* Климат Ростовской области: вчера, сегодня, завтра. Ростов н/Д: Донской изд. дом, 2006. 488 с.
13. Труды отдела торговых портов. Вып. 12. Азовское море. Техн.-эконом. обзор. / А.В. Ивановский, СПб.: Гос. типография. 1904. 172 с.

CYCLICITY OF CLIMATE IN THE SEA OF AZOV REGION: THE HOLOCENE AND THE CURRENT PERIOD (19–21 CENTURIES)

Academician of the RAS G. G. Matishov[a,b,#], L. V. Dashkevich[a], and E. E. Kirillova[a]

[a] *Federal Research Centre "The Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation*

[b] *Murmansk Marine Biological Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation*

#*E-mail: matishov_ssc-ras@ssc-ras.ru*

The cyclicity of climate in the Sea of Azov Region is described in the paper applying the palaeogeographic methods. The results of drilling on the Dolgaya Spit of the Sea of Azov are presented. The diatoms and palynological analyses, ground cores' dating indicate the cyclic pattern of climatic variability and accelerated silting of the Don delta in case of regulated runoff. The rate of sedimentation in the Sea of Azov during the Ancient and New Azov stages varied from 0.2 to 2.0 mm/year. The sedimentation of clayey silts in the delta-front area in the current period of low water conditions and no floods was 10–30 mm/year. Based on the analysis of hydro-meteorological information, the time lag (1884–2020) may be divided into three periods: I – cold, II – transitional, III – warm. The study of the indicated specific features of the natural processes and phenomena development gives grounds to expect the next transitional period with sharp interannual fluctuations of temperatures and alternation of warm and severe winters in the coming decade.

Keywords: climatic variability, palaeoclimate, Late Holocene, cyclicity of water regime, avalanche sedimentation

УДК 551.46 (268.1+262.24)
DOI: 10.7868/S25000640210102

АНАЛИЗ ВНУТРИВЕКОВОЙ ПРИРОДНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ В ПРИАЗОВЬЕ И НА НИЖНЕМ ДОНУ: ПРИЧИНА МАЛОВОДЬЯ[1]

© 2021 г. Академик Г.Г. Матишов[1, 2], Л.В. Дашкевич[1], В.В. Титов[1], Е.Э. Кириллова[1]

Аннотация. Изменения климата и водности в Приазовье и на Нижнем Дону, отмечаемые с XVIII века после начала инструментальных наблюдений над состоянием окружающей среды и подкрепляемые более древними историческими источниками, подтверждают известные закономерности циклического характера этих трансформаций. Осуществляемые Южным научным центром Российской академии наук комплексные исследования колонок донных отложений, кернов из верхних горизонтов береговых кос позволяют с большой степенью детальности реконструировать гидродинамические и климатические трансформации в Приазовье на протяжении позднего голоцена. Выявлены внутривековые изменения климата и водности в Приазовье по гидрометеорологическим данным (1884–2020 гг.), которые подразделяются на три периода: холодный (многоводный; 1884–1942 гг.), переходный (1942–1985 гг.) и теплый (маловодный; 1986–2020 гг.). Отсутствие паводкового дренажа и маловодье привели в последнее время к заилению многочисленных проток и гирл дельты Дона. После зарегулирования стока реки (начиная с 1952 г.) скорость осадконакопления в некоторых протоках дельты и авандельты достигла 10–30 мм/год, что значительно выше по сравнению со скоростью накопления новоазовских отложений на шельфе Азовского моря (0,2–2,0 мм/год). Анализ наблюдаемых закономерностей позволяет предполагать, что в ближайшие два десятилетия можно ожидать наступления следующего переходного этапа с резкими межгодовыми колебаниями температур, с чередованием теплых и суровых зим.

Ключевые слова: климатическая изменчивость, палеоклимат, поздний голоцен, аридизация, цикличность водного режима, осадконакопление.

ANALYSIS OF INTRACENTURY ENVIRONMENTAL VARIABILITY IN THE SEA OF AZOV AND LOWER DON REGIONS: THE CAUSE OF LOW WATER PERIOD

Academician RAS G.G. Matishov[1, 2], L.V. Dashkevich[1], V.V. Titov[1], E.E. Kirillova[1]

Abstract. Changes of climate and water content in the Sea of Azov and Lower Don Regions confirm the known regularities of the cyclical nature of these transformations, based on the noted instrumental observations at environmental condition after the beginning of the 18 century, and supported by more ancient historical sources. The comprehensive studies of bottom sediment columns and cores from the upper horizons of coastal spits carried out by the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (Rostov-on-Don, Russia) make it possible to reconstruct hydrodynamic and climatic transformations in the Sea of Azov Region in great detail during the late Holocene. The intercentury changes of climate and water content in the Sea of Azov Region were revealed according to hydrometeorological data (1884–2020), which are subdivided into three periods: cold (high-water; 1884–1942), transitional (1942–1985) and warm (low-water; 1986–2020). Lack of flood drainage and low water levels have recently led to the siltation of numerous channels and branches of the Don delta. After the regulation of the river flow (starting from 1952), the rate of sedimentation in some channels of the delta and avandelta reached 10–30 mm/year, which is significantly higher compared to the rate

[1] Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: matishov_ssc-ras@ssc-ras.ru
[2] Мурманский морской биологический институт Российской академии наук (Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17

[1] **Оригинальный текст:** *Матишов Г.Г., Дашкевич Л.В., Титов В.В., Кириллова Е.Э.* Анализ внутривековой природной изменчивости в Приазовье и на Нижнем Дону: причина маловодья // Наука Юга России. 2021. Т. 17. № 1. С. 13–23.

of accumulation of New-Azovian deposits on the shelf of the Sea of Azov (0.2 to 2.0 mm/year). An analysis of the observed patterns suggests the occurrence of the next transitional stage with abrupt interannual temperature fluctuations with alternating warm and severe winters in the next two decades.

Keywords: climatic changes, paleoclimate, Late Holocene, aridization, cyclicity of water regime, sedimentation.

ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Исследование климатической изменчивости в Приазовье и на Нижнем Дону требует комплексного подхода с целью определения тенденций в будущем. Точность прогноза погоды и предстоящих изменений климата зависит от полноты физико-географических данных и продолжительности наблюдений за изменчивостью среды. Период инструментальных наблюдений (в частности, измерение температуры среды ртутным термометром) начался только в XVIII веке. Вместе с тем начало исторического периода оставило самые различные письменные источники, которые стали особенно широко и методично использоваться в последние годы. Общие представления о колебаниях температуры среды за последнюю тысячу лет можно описать, систематизируя информацию, полученную различными косвенными методами.

Среди ритмических явлений природы циклические колебания, в отличие от периодических событий, характеризуются переменной их продолжительностью [1–3]. Циклические колебания могут длиться 1800–1900, 100, 30–40, 17, 11 лет и др. [1; 4–7]. Палеоданные несут информацию о долгопериодных изменениях климата, а данные наблюдений последних столетий – о короткопериодной изменчивости.

Глобальные изменения температуры на земной поверхности происходили одновременно с наступлениями и отступаниями ледниковых щитов, изменениями уровня Мирового океана (на 120 м), высоты снеговой линии в горах, размеров долинных ледников. По продолжительности циклические колебания подразделяют на внутривековые, межвековые и долгопериодные (помимо мелкомасштабных, которые в данном исследовании не учитываются) [3; 8]: внутривековые колебания с периодами порядка десятков лет, ярким примером можно считать потепление в 1930-е гг.; межвековые колебания с периодами в несколько веков или несколько десятков веков; долгопериодные колебания (ледниковье – межледниковый период) длительностью в десятки тысяч лет.

Выдающийся югославский геофизик М. Миланкович предложил теорию, которая объясняет колебания климата в плейстоцене колебаниями наклона экватора Земли к плоскости ее орбиты, а также элементов земной орбиты, создаваемых действием на Землю сил притяжения других планет [2].

Яркие события о процессах климатической изменчивости отражены и в исторических документах (с XI по XIII век). Например, конец первого и начало второго тысячелетия нашей эры вошли в историю Европы как эпоха викингов: «Период викингов» – время, когда лето было настолько теплым и сухим и когда северные моря были настолько свободны от плавучих льдов, что норвежцы могли повсюду плавать в небольших лодках» [3: 45].

После «периода викингов» и до XVII века повсеместно в Европе ощущалось общее снижение температуры [3]. Лучше других изучены колебания климата, происходившие в VII–XIII и в XVI–XIX веках. Событие первого временнóго интервала получило название «малый климатический оптимум», второго – «малый ледниковый период». Иногда второй термин относят ко всему периоду от окончания теплого раннего средневековья до середины или второй половины XIX века, в других случаях им обозначают более короткий интервал – XVII–XIX века [3]. Особо холодный отрезок времени имел место между 1650 и 1750 гг. В этот период было отмечено продвижение льдов во многих средне- и высокоширотных регионах, а средняя годовая температура в Европе и Северной Америке (Альпы, Скалистые горы), по данным реконструкций или измерений, была на 1–2 °C ниже современной. Малый ледниковый период оказал значительное влияние на рост и структуру лесов во многих северных районах. Максимальное наступление альпийских ледников началось на рубеже XVI и XVII веков и продолжалось по крайней мере до 1616 г. [3].

В плане регионального климата отметим два экстремальных зимних эпизода в XVI и XVII веках. Зима 1543–1544 гг. была исключительно холодной для многих европейских стран – Германии, Франции, стран Северного Причерноморья. Север

Рис. 1. Карта-схема полевых исследований, проводившихся на косе Долгой 30.05–03.06.2020 г.
Fig. 1. Schematic map of field surveys carried out on the Dolgaya Spit 30.05–03.06.2020.

Черного моря покрылся льдом. По сведениям южно-русских летописей, и на Руси «снеги великие были и зима тяжкая морозами, от которых премного шведов погинуло». Великой называют зиму в конце XVIII века (1788–1789 гг.). В Крыму морозы достигали −25 °C, в Северном Причерноморье «зима жестокая, морозов преисполненная, из хат вылезали через крыши из-за снегов великих», замерзла северная часть Черного моря. «Именно в эту зиму 6 декабря в трескучий мороз русская армия взяла штурмом крепость Очаков» [9].

В настоящей работе предпринята попытка объяснить причины современного маловодья в Приазовье через анализ внутривековой природной изменчивости с привлечением методов палеогеографии.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Данные натурных наблюдений включают материалы, собранные сотрудниками Южного научного центра Российской академии наук (ЮНЦ РАН) в 2000–2020 гг. Регулярный мониторинг водного режима и колебаний уровня воды осуществляли на установках сети уровнемеров и автоматических гидрометеостанций (ГМС) от южной части дельты Дона до взморья Таганрогского залива Азовского моря. С 2016 г. проводили планомерное бурение на побережье Таганрогского залива, в частности на Очаковской, Чумбурской, Беглицкой и Долгой косах [10]. В прибрежных районах моря колонки донных осадков отбирали гравитационной трубкой с научно-исследовательских судов «Денеб» и «Профессор Панов», а также вибрационной трубкой с несамоходного понтона.

Особое внимание уделяли отбору раковинного материала по вертикали изученных разрезов. Отбор проб из обнажений, кернов скважин и грунтовых колонок производили послойно, с описанием литологических особенностей вмещающей породы, видовой принадлежности моллюсков, степени сохранности и фотографированием раковинного материала. Мощность отложений в изученных колонках от 1,5 до 2,8 м, отбор образцов для спорово-пыльцевого и диатомового анализа производили с интервалом 2–5 см. Учитывались палинологические данные из поверхностных слоев осадков, которые позволяют составить представление о характере трансформации растительного покрова побережья Приазовья в позднем голоцене [11; 12].

Абсолютный возраст отложений определяли радиоуглеродным методом по образцам раковин моллюсков из керна скважин и обнажений в лаборатории геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и Мирового океана им. В.П. Кёплена (Санкт-Петербургский государственный университет, Россия; обозначение обработанного образца – ЛУ). Значения календарного возраста были получены с помощью программы «OxCal 4.3» (калибровочная кривая «IntCal 13»). За последние годы получено более 100 радиоуглеродных датировок донных отложений ново- и древнеазовского возраста [10–12]. Возраст артефактов с морского дна оценивали также и с привлечением археологических находок.

Климатическая изменчивость в зимние сезоны 1884–2020 гг. оценена по историческим рядам наблюдений за температурой воздуха на гидрометеостанциях в Таганроге, Геническе, Керчи, которые территориально характеризуют восточную, западную и южную части Приазовья. Эти данные взяты с сайта Всероссийского НИИ гидрометеорологической информации (meteo.ru), из климатического атласа Азовского моря [13] и других литературных источников [14–16].

Расчет аномалий сезонной температуры воздуха в Приазовье осуществлялся следующим образом:

1. Вычисление среднемесячных температур воздуха на основе суточных значений на ГМС.
2. Вычисление сезонных величин по годам на основе среднемесячных значений.
3. Далее расчет средней сезонной температуры для региона проводили по годам путем осреднения данных трех ГМС.
4. Климатическую норму для рассматриваемого региона рассчитывали с помощью осреднения данных трех ГМС за период 1961–1990 гг. (принят Всемирной метеорологической организацией в качестве стабильного базового периода для долгосрочной оценки изменений климата).
5. Аномалии зимней температуры по годам находили с помощью расчета разницы между сезонным значением температуры воздуха и климатической нормой.
6. Согласно с методикой расчета суровости зим [16] дана оценка характера зимних сезонов за рассматриваемый период.

Расчет годовых и максимальных среднемесячных расходов воды р. Дон в ст. Раздорской проводили на основе данных из ежегодников Государственного водного кадастра следующим образом:

1. Вычисление годовых расходов воды на основе средних месячных значений.
2. Анализ данных, выбор максимальных значений из средних месячных расходов для каждого года.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Палеоклимат. Анализ закономерных черт физико-географических процессов в Азово-Донском бассейне начиная с конца атлантического – начала суббореального периода (около 5500–4000 календарных лет назад) и климатических тенденций в современный период дает основания для общих реконструкций. В Приазовье растительный покров и климат не оставались постоянными на протяжении последних тысячелетий [10–12]. Вторая половина голоцена включала в себя четыре относительно прохладные и гумидные (5500–4000, 3200–2500, 1800–1500, 650–150 календарных лет назад) и три более теплые и сухие фазы (4000–3200, 2500–1800, 1500–650 календарных лет назад). Активное почвообразование происходило в атлантическое (~6–5,5 тыс. лет назад) и суббореальное (4,5–2,5 тыс. лет назад) время. В период греческой колонизации (2,7–2,4 тыс. лет назад) основную долю в земледелии составляли культурные злаки (Cerealia), появилась пыльца гречихи и конопли, возросла роль сорных видов – *Rumex* sp., *Polygonum aviculare*, *Plantago major*, *P. media*, *Convolvulus* sp., представителей Cichoriaceae [11].

Существенно дополнили представления о палеоклимате Азовского моря данные бурения на косе Долгой в 2019–2020 гг. (рис. 1, [10]). Суммируя новые литостратиграфические данные по скважинам бурения, новые датировки абсолютного возраста пластов ракушечных отложений возможно детально проанализировать и изобразить графически (рис. 2) историю формирования песчаной косы.

Основная часть аккумулятивного тела косы была образована в интервале времени от 1920 ± 110 (ЛУ-9756) до 2500 ± 150 (ЛУ-9757) лет, во время нимфейской трансгрессии [10]. Большая часть органогенного материала представлена створками

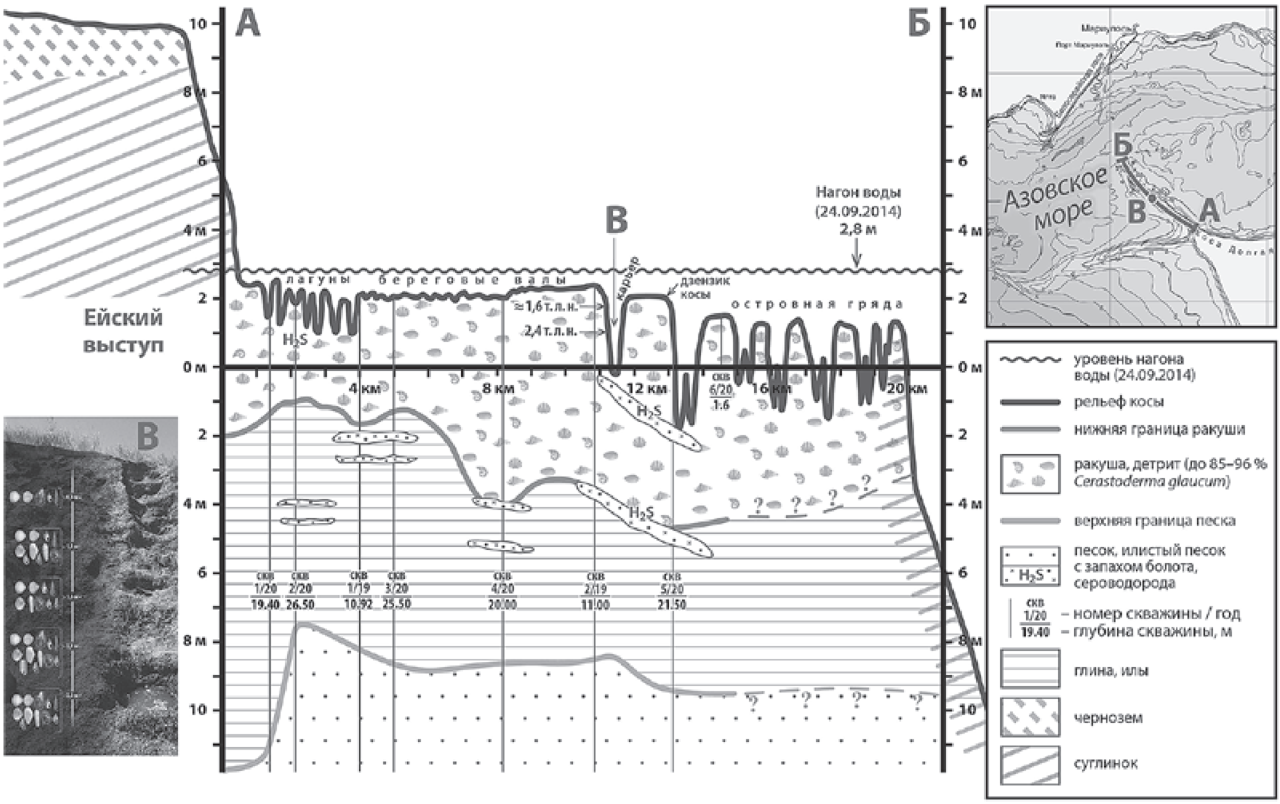


Рис. 2. Геоморфологический разрез косы Долгой (по данным бурения).
Fig. 2. Geomorphological transect of the Dolgaya Spit (according to drilling data).

раковин и детритом моллюсков рода *Cerastoderma* Poli, 1795 (более 95 %). На ритмику развития косы указывают шесть генераций древних береговых валов (рис. 1). В целом нимфейская трансгрессия ассоциируется с накоплением отложений новоазовского возраста (от 3,1 тыс. л. н. до настоящего времени), которые имеют повсеместное распространение. Современную литодинамику отражает шестая стадия развития косы.

С 1890 по 2000 г. прослеживалась устойчивая тенденция уменьшения длины оконечности косы Долгой (рис. 3). Этот процесс интенсивно происходил с 1890 по 1958 г., когда протяженность косы уменьшилась на 1,35 км, и продолжается в настоящее время (рис. 4).

Аридизация климата. За последние две тысячи лет в районе Черного моря отмечено более 20 очень суровых зим. Временной интервал между ними составляет в большинстве случаев от 60 до 90 лет [9].

За более чем 130 лет наблюдений основная доля суровых зим (более трети) пришлась на конец XIX – начало XX века, а теплых – на начало XXI века (рис. 5). Можно выделить условно «холодный» (до середины 1940-х гг.) и «теплый» (с середины 1980-х гг.) периоды. Их разделяет переходный этап с достаточно резкими колебаниями температур по годам. Для всех периодов в Приазовье характерно чередование суровых и теплых зим.

Самая суровая и снежная зима за более чем 130 лет наблюдений в Приазовье была в 1953–1954 гг. Ее по праву называют «зимой века». На азовском побережье тогда средняя температура воздуха составила −9 °С. На Южном берегу Крыма морозы держались три месяца подряд, среднемесячная температура февраля была на 10–12 °С ниже нормы, в Ялте высота снежного покрова в этот период превышала 30 см. Полностью замерзло Азовское море и северная часть Черного моря, через Керченский пролив было открыто устойчивое автомобильное сообщение [9].

В XXI веке зимы со льдом в Таганрогском заливе в большинстве случаев длились около 50 дней. Максимум ледовитости – 74 дня – зафиксирован зимой 2016–2017 гг.

Самая теплая зима в рассматриваемый период – 1965–1966 гг., со средней температурой воздуха +3,3 °С – пришлась на переходный этап. Второй по тепловому рангу стала зима 2019–2020 гг. В бли-

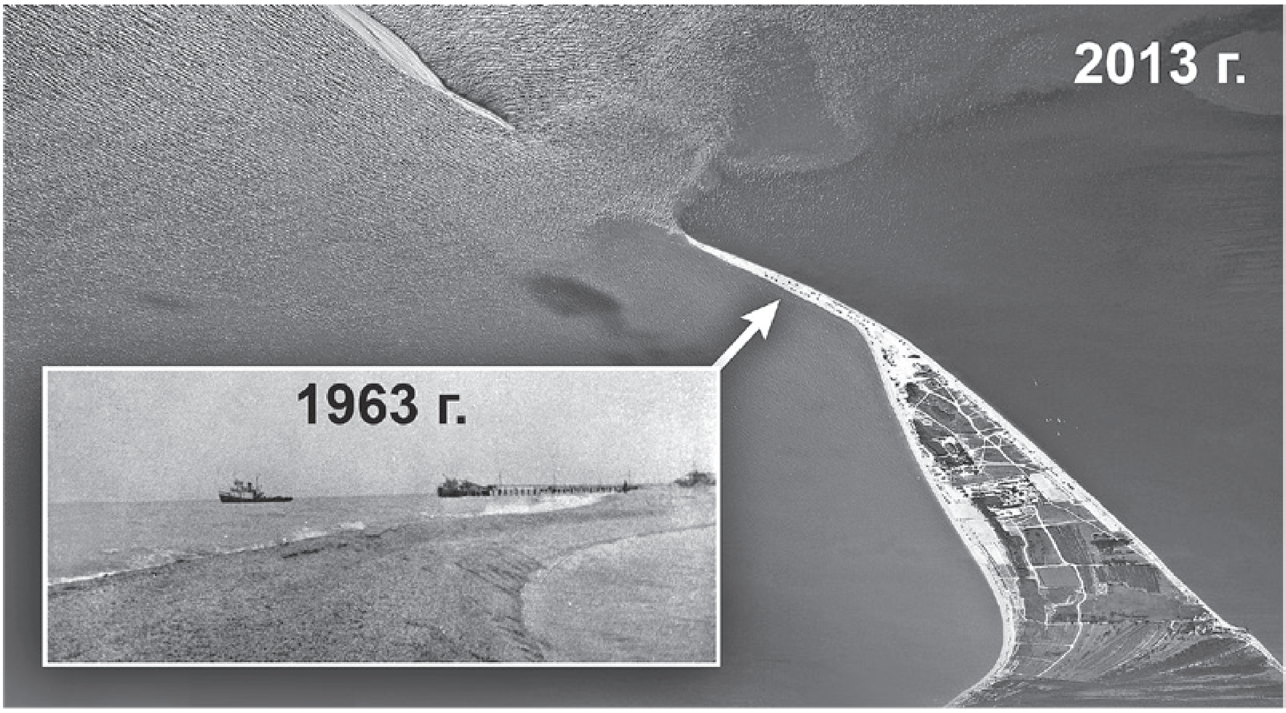


Рис. 3. Рыболовная фактория на оконечности косы Долгой.
Fig. 3. Fishing trading post on the Dolgaya Spit.

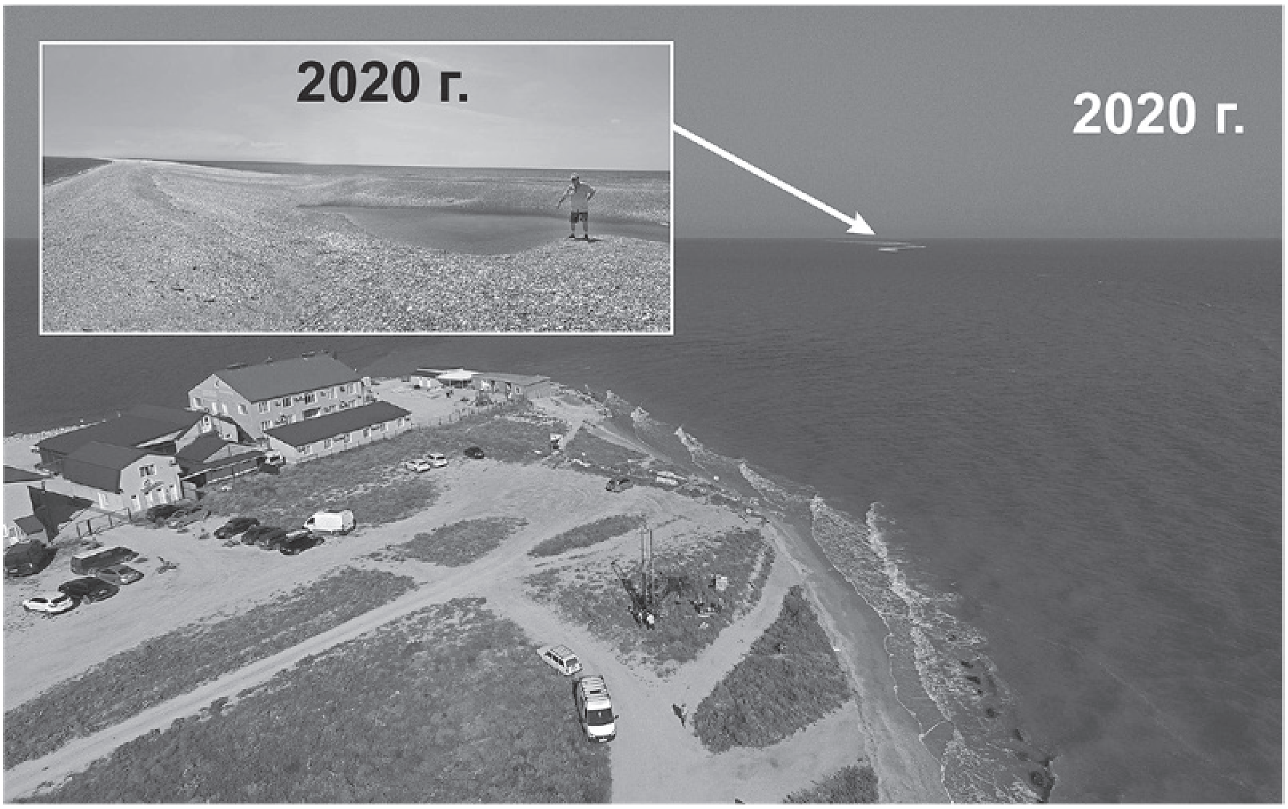


Рис. 4. Ракушечный остров в островной гряде косы Долгой (фото сделано с оконечности косы).
Fig. 4. Shell island in the island ridge of the Dolgaya Spit (photo was taken from the end of the spit).

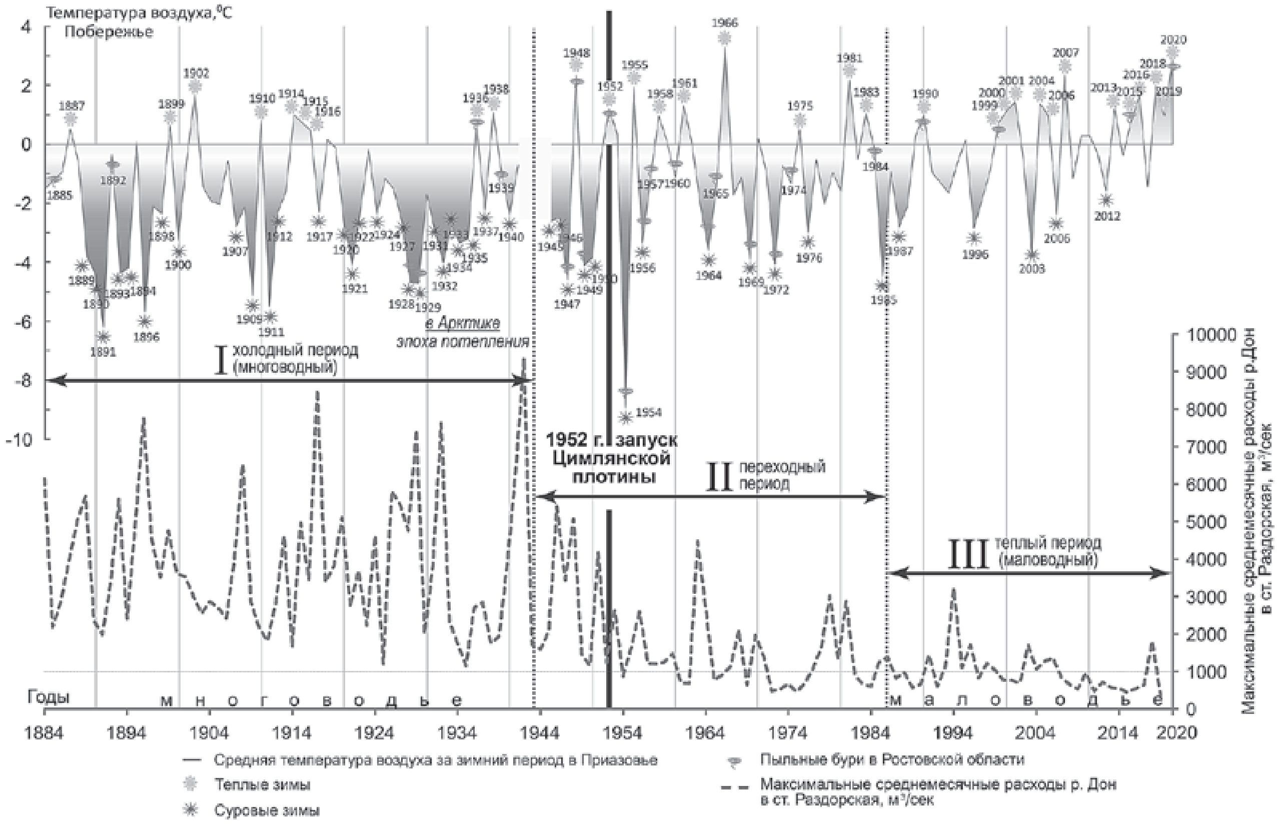


Рис. 5. Внутривековые климатические изменения в Приазовье по гидрометеорологическим данным (1884–2020 гг.).
Fig. 5. Climatic changes in the Sea of Azov region according to hydro-meteorological data (1884–2020).

жайшие два десятилетия можно ожидать наступления следующего переходного этапа с резкими межгодовыми колебаниями температур, с чередованием теплых и суровых зим.

В XXI веке Приазовье находится в условиях аридизации климата: дефицита водных ресурсов, отсутствия половодья, исключительно большого испарения [17; 18]. Засуха обычно вызывается устойчивыми антициклонами и сильными восточными ветрами (суховеями). В период 1884–2020 гг. число сильных пыльных бурь в Ростовской области составило более 20 [18]. За последние 20 лет сильные пыльные бури наблюдались в этом регионе в 2015 и 2020 гг. (рис. 5).

Внутривековые колебания водного режима. В 1884–2020 гг. водный режим Дона изменялся с определенной цикличностью (рис. 5). Анализ максимальных среднемесячных расходов воды в р. Дон у ст. Раздорской позволил выделить периоды: I – 1884–1942 гг. (3200 м³/с); II – 1942–1985 гг. (1200 м³/с); III – 1986–2020 гг. (1000 м³/с). Средние минимальные расходы воды по периодам: I – 400 м³/с, II и III – 325–335 м³/с.

С 1952 г. речной сток зарегулирован Цимлянской плотиной. Минимально гарантированный судоходный попуск – 340 м³/с. После зарегулирования реки сброс воды объемом в 30 км³ являлся оптимальным (в расчет при проектировании были взяты самые водные годы XX столетия, в частности 1941–1942 гг., когда у ст. Раздорской максимальные расходы воды достигали 6300–9300 м³/с [17; 18]). В многоводный период сток Дона достигал 52 км³. В маловодные годы изъятие для нужд Цимлянского водохранилища речной воды составляет примерно 1/12 части (24 км³) от объема воды Азовского моря, что приводит к усилению черноморской адвекции в этот водоем [17]. Сегодня сток Дона во все двенадцать месяцев года соответствует минимальным историческим запасам. К маловодным годам отнесены 2009, 2011, 2014, 2015 и 2020 гг. В 2015 г. объем половодья на Цимлянском водохранилище не превысил величины 4 км³ (35 % от нормы), а максимальный расход – 790 м³/с (четверть нормы). В 2020 г. среднегодовой расход воды р. Дон у ст. Раздорской – составил 316 м³/с, в ноябре минимальный расход – 280 м³/с.

Станция 7 Мощность колонки 260 см			
Литологическая характеристика	Горизонт отбора (см)	Калиброванный возраст (календарный), лет: Интервал (см)	Калиброванный возраст (календарный), лет: Возраст
Алевритово-глинистые карбонатные илы. Цвет темно-серый до черного. По поверхности обводненный наилок оливкового оттенка. Материал песчаной размерности за счет разрушения створок раковин	0-5	-	-
Заиленная ракуша. Цвет серый. Содержание карбонатного материала >50 %	5-150	110-120	2260±70
		125-135	2180±100
		135-140	2120±110
Ил глинистый. Цвет темно-серый. Мягкопластичный. Отмечаются прослойки ракушечного материала мощностью 2-3 см через 15-20 см	150-225	165-170	2220±90
Заиленная ракуша. Цвет серый. Содержание карбонатного материала >50 %	225-260	225-230	2490±120
		235-245	2440±150
		250-260	2930±130

Станция 59 Мощность колонки 298 см			
Литологическая характеристика	Горизонт отбора (см)	Калиброванный возраст (календарный), лет: Интервал (см)	Калиброванный возраст (календарный), лет: Возраст
Ил глинистый. Цвет темно-серый до черного. Содержание ракушечного материала – 5-10 % от объема пробы. По поверхности наилок ржаво-оливкового цвета мощностью до 5 мм	0-20		
Ил глинистый. Цвет темно-серый до черного. Мягкопластичный. Отмечаются прослойки ракушечного материала мощностью 2-3 см через 15-20 см	20-95	15-25	770±80
Заиленная ракуша и ракушечный детрит. Цвет серый. В интервале 130-145 см – мягкопластичный глинистый ил серого цвета	95-160	100-110	890±100
		110-120	1110±100
		120-130	1110±90
		130-135	1340±110
		153-165	2280±150
Ил глинистый. Цвет темно-серый. Мягкопластичный. Отмечаются прослойки ракушечного материала мощностью 3-4 см через 10-15 см	160-275	170-175	2850±120
		185-200	3140±180
Заиленная ракуша и ракушечный детрит	275-298	280-298	3900±130

Рис. 6. Абсолютный возраст и мощность осадочных слоев в Азовском море.
Fig. 6. Absolute age and thickness of sedimentary layers in the Sea of Azov.

Осадконакопление в эпоху зарегулирования Дона. С 1952 г. естественный процесс седиментации на Нижнем Дону и на взморье претерпел значительные изменения. Произошло замедление паводковых течений. В речной взвеси снизилось содержание частиц песчаной размерности. В XXI веке усилилась аридизация климата и сократился объем стока Дона. Отсутствие паводкового дренажа и маловодье привели к заилению многочисленных проток и гирл дельты. За последние полвека в устьевых зонах сформировался характерный слой илистых отложений мощностью 1–2,5 м. Край дельты выдвинулся в Азовское море на 10–40 м.

С использованием методов абсолютной геохронологии и литологии установлено, что скорость осадконакопления на протяжении древне- и новоазовского этапа развития Азовского моря изменялась от 0,2 до 2,0 мм/год [11; 12] (рис. 6).

Маркирующий горизонт эпохи паровых судов на Нижнем Дону (1860–1960 гг.), вскрытый грунтовыми трубками и при дноуглублении (рис. 7), позволил рассчитать скорость седиментации на Нижнем Дону. Пароходы, курсировавшие от Ростова-на-Дону до Азова, Кагальника, Таганрога, брали на борт за одну загрузку порядка 85 т угля [19]. На дне судоходных каналов сформировался пласт угольного шлака от 3 до 10 см с размером обломков 1–5 см. Маркирующий шлаковый горизонт, общей протяженностью в дельте порядка нескольких десятков километров, с резким несогласием залегает на аллювиальных мелко-среднезернистых песках, которые сформировались в условиях паводков до зарегулирования реки. Со второй половины XX века водный режим и процессы седиментации в бассейне Дона, обусловленные внутривековой цикличностью климата, были нарушены введением в эксплуатацию Цимлянской плотины, что вызвало заиление речных русел [17; 20]. Принимая во внимание расположение маркирующего горизонта на глубине 1–2 м, можно рассчитать, что скорость седиментации глинистых илов достигала в авандельте 10–30 мм в год. Указанные величины примерно в 15 раз выше скорости накопления новоазовских отложений на шельфе Азовского моря.

ВЫВОДЫ

Современные представления о климате складываются путем статистической обработки результатов метеорологических наблюдений за многолетний период. Если климат цикличен, динамика температуры воздуха и расходы воды в Дону цикличны, то по аналогии логично сделать прогноз гидрометеопараметров на будущее. Однако в XXI веке только этого мало. Объективно выявить тенденции развития будущего климата можно с учетом анализа палеоклимата голоцена, опираясь на данные бурения, исторические и архивные источники. Реальные природные явления, безусловно, должны закладываться в модели с учетом палеогеографических закономерностей последних тысячелетий.

По данным бурения береговых аккумулятивных форм [10; 11], частые изменения уровня Азовского моря предопределили стратифицированный характер строения осадочных толщ. Благодаря полученным радиоуглеродным датировкам, проведенному диатомовому и спорово-пыльцевому анализу донных отложений стало возможным проследить динамику изменений климата и уровня моря за последние пять тысяч лет, а также многолетнюю изменчивость климатических условий формирования стока в бассейне Дона.

На протяжении XVI–XVII веков в Причерноморье и Приазовье имел место малый ледниковый период. В течение последних полутора веков в регионе Азово-Донского бассейна циклы колебания средних температур воздуха зимой и водного режима были синхронны. На рубеже XX и XXI веков начали преобладать засушливые годы, сопровождаемые маловодьем и засухой, то есть происходит опустынивание, сокращение запасов воды в бассейне р. Дон и осолонение Азовского моря.

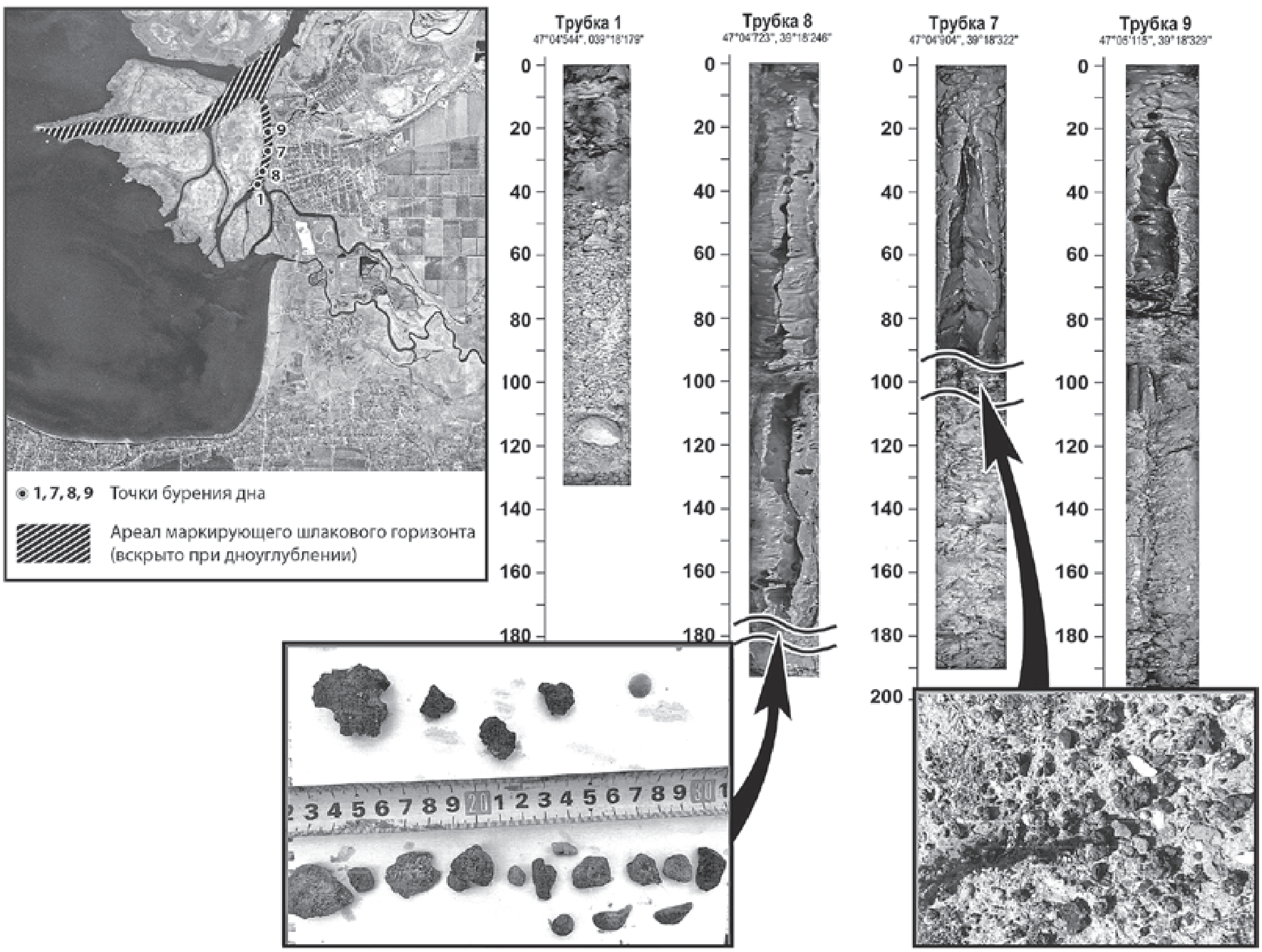


Рис. 7. Маркирующий горизонт по угольному шлаку (1860–1960-е гг.).
Fig. 7. Marker horizon by coal slag (1860–1960s).

Минимальные расходы воды (280 м³/с в створе гидропоста «Раздорская», 18 ноября 2020 г.) стали нормой в течение года. При этом в период пуска Цимлянской ГЭС в 1952 г. средние минимальные расходы воды были 335 м³/с, а максимальные – 1200 м³/с. В условиях маловодья и отсутствия паводков развивалась устойчивая лавинная седиментация в дельте и на взморье.

Подводя итоги исследования траектории развития природных явлений во второй половине голоцена, а также опираясь на внутривековые метеорологические закономерности, приходим к выводу, что в ближайшие два десятилетия в регионе Азовского моря и Нижнего Дона установится метеорологический режим климата переходного этапа, охарактеризованный выше: с резкими межгодовыми колебаниями температур, с чередованием теплых и суровых зим.

Публикация подготовлена в рамках гранта РНФ № 20-17-00196 (для Г.Г. Матишова, В.В. Титова), госзадания ЮНЦ РАН, № госрегистрации 01201363186 (для Е.Э. Кирилловой) и № госрегистрации АААА-А18-118122790121-5 (для Л.В. Дашкевич).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калесник С.В. 1970. *Общие географические закономерности Земли.* М., Мысль: 283 с.
2. Миланкович М. 1939. *Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата.* М., ГОНТИ: 207 с.
3. Монин А.С., Шишков Ю.А. 1979. *История климата.* Л., Гидрометеоиздат: 408 с.
4. Максимов И.В. 1970. *Геофизические силы и воды океана.* Л., Гидрометеоиздат: 447 с.
5. Марков К.К., Величко А.А. 1967. *Четвертичный период (ледниковый период – антропогеновый период). Т. III. Материки и океаны.* М., Недра: 440 с.
6. Марков К.К., Величко А.А., Лазуков Г.И., Николаев В.А. 1968. *Плейстоцен.* М., Высшая школа: 304 с.
7. Зубаков В.А. 1986. *Глобальные климатические события плейстоцена.* Л., Гидрометеоиздат: 286 с.
8. Матишов Г.Г. 1987. *Мировой океан и оледенение Земли.* М., Мысль: 268 с.
9. Гришин М.Г. 2012. Ледниковые периоды и аномальные зимы на побережье Черного моря. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* 26(1): 134–146.
10. Матишов Г.Г., Польшин В.В., Титов В.В. 2020. Исследования отложений кос Азовского моря (на примере косы Долгой). *Океанология.* 60(1): 158–161. doi: 10.31857/S0030157420010165
11. Матишов Г.Г., Титов В.В., Ковалева Г.В., Польшин В.В., Дюжова К.В., Байгушева В.С., Зайцев А.В., Ильина Л.П., Нестерук Г.В., Сушко К.С., Тимонина Г.И., Куршаков С.В., Невидомская Д.Г. 2019. *Палеогеография Приазовья в голоцене.* Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 224 с.
12. Матишов Г.Г., Ковалева Г.В., Арсланов Х.А., Дюжова К.В., Польшин В.В., Золотарева А.Е. 2018. Результаты радиоуглеродного датирования голоценовых отложений Азовского моря. *Доклады Академии наук.* 479(6): 655–658. doi: 10.7868/S0869565218120113
13. *Climatic Atlas of the Sea of Azov.* 2008. NOAA Atlas NESDIS 65, Washington, D.C., U.S. Government Printing Office: 148 p.
14. Книпович Н.М. 1932. *Гидрологические исследования в Азовском море. Труды Азово-Черноморской научно-промысловой экспедиции. Вып. 5.* М., Мособлполиграф: 495 с.
15. *Основные гидрометеорологические сведения о морях СССР. Т. 3: Азовское море, Вып. 4: Метеорологические данные прибрежной полосы.* 1940. Л. – М., Гидрометеоиздат: 438 с.
16. *Гидрометеорологический справочник Азовского моря.* 1962. Л., Гидрометеоиздат: 856 с.
17. Матишов Г.Г. 2016. *Климат, водные ресурсы и реконструкция гидротехнических сооружений с учетом интересов населения, рыболовства и сельского хозяйства, судоходства и энергетики. Доклад на расширенном заседании Президиума ЮНЦ РАН (г. Ростов-на-Дону, 25 мая 2016 г.).* Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 64 с.
18. Панов В.Д., Лурье П.М., Ларионов Ю.А. 2006. *Климат Ростовской области: вчера, сегодня, завтра.* Ростов н/Д, Донской издательский дом: 488 с.
19. *Труды отдела торговых портов. Вып. 12. Азовское море. Технико-экономический обзор.* 1904. СПб., Государственная типография: 172 с.
20. Казмирук В.Д., Казмирук Т.Н., Бреховских В.Ф. 2004. *Зарастающие водотоки и водоемы: динамические процессы формирования донных отложений.* М., Наука: 310 с.

REFERENCES

1. Kalesnik S.V. 1970. *Obshchie geograficheskie zakonomernosti Zemli.* [*General geographical patterns of the Earth*]. Moscow, Mysl': 283 p. (In Russian).
2. Milankovich M. 1939. *Matematicheskaya klimatologiya i astronomicheskaya teoriya kolebaniy klimata.* [*Mathematical climatology and astronomical theory of climate fluctuations*]. Moscow, State Scientific and Technical Publishing House: 207 p. (In Russian).
3. Monin A.S., Shishkov Yu.A. 1979. *Istoriya klimata.* [*History of Climate*]. Leningrad, Gidrometeoizdat: 408 p. (In Russian).
4. Maksimov I.V. 1970. *Geofizicheskie sily i vody okeana.* [*Geophysical forces and ocean waters*]. Leningrad, Gidrometeoizdat: 447 p. (In Russian).
5. Markov K.K., Velichko A.A. 1967. *Chetvertichnyy period (lednikovyy period – antropogenovyy period). T. III. Materiki i okeany.* [*Quaternary period (ice age – anthropogenic period). Vol. III. Continents and oceans*]. Moscow, Nedra: 440 p. (In Russian).

6. Markov K.K., Velichko A.A., Lazukov G.I., Nikolaev V.A. 1968. *Pleystotsen.* [*Pleistocene*]. Moscow, Vysshaya shkola: 304 p. (In Russian).

7. Zubakov V.A. 1986. *Global'nye klimaticheskie sobytiya pleystotsena.* [*Global climatic events of the pleistocene*]. Leningrad, Gidrometeoizdat: 286 p. (In Russian).

8. Matishov G.G. 1987. *Mirovoy okean i oledenenie Zemli.* [*World Ocean and the glaciation of the Earth*]. Moscow, Mysl': 268 p. (In Russian).

9. Grishin M.G. 2012. [Ice ages and abnormal winters on the Black Sea coast]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa.* 26(1): 134–146. (In Russian).

10. Matishov G.G., Pol'shin V.V., Titov V.V. 2020. Studies of the sediments of the Sea of Azov (on the example of Dolgaya spit). *Oceanology*. 60(1): 138–141. doi: 10.1134/S0001437020010166

11. Matishov G.G., Titov V.V., Kovaleva G.V., Pol'shin V.V., Dyuzhova K.V., Baigusheva V.S., Zaitsev A.V., Il'ina L.P., Nesteruk G.V., Sushko K.S., Timonina G.I., Kurshakov S.V., Nevidomskaya D.G. 2019. *Paleogeografiya Priazov'ya v golotsene.* [*Paleogeography of the Sea of Azov Region in the Holocene*]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 224 p. (in Russian).

12. Matishov G.G., Kovaleva G.V., Arslanov Kh.A., Dyuzhova K.V., Polshin V.V., Zolotareva A.E. 2018. Results of radiocarbon dating of Holocene deposits from the Sea of Azov. *Doklady Earth Sciences*. 479(2): 452–455. doi: 10.1134/S1028334X1804027X

13. *Climatic Atlas of the Sea of Azov.* 2008. NOAA Atlas NESDIS 65, Washington, D.C., U.S. Government Printing Office: 148 p.

14. Knipovich N.M. 1932. *Gidrologicheskie issledovaniya v Azovskom more. Trudy Azovo-Chernomorskoy nauchno-promyslovoy ekspeditsii. Vyp. 5.* [*Hydrological research in the Sea of Azov. Proceedings of the Azov-Black Sea scientific and fishing expedition. Issue 5*]. Moscow, Mosoblpoligraf: 495 p. (In Russian).

15. *Osnovnye gidrometeorologicheskie svedeniya o moryakh SSSR. T. 3: Azovskoe more, Vyp. 4: Meteorologicheskie dannye pribrezhnoy polosy.* [*Basic hydrometeorological information about the seas of the USSR. Vol. 3: Sea of Azov, Issue 4: Coastal meteorological data*]. 1940. Leningrad – Moscow, Gidrometeoizdat: 438 p. (In Russian).

16. *Gidrometeorologicheskiy spravochnik Azovskogo morya.* [*Hydrometeorological reference of the Sea of Azov*]. 1962. Leningrad, Gidrometeoizdat: 856 p. (In Russian).

17. Matishov G.G. 2016. *Klimat, vodnye resursy i rekonstruktsiya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy s uchetom interesov naseleniya, rybolovstva i sel'skogo khozyaystva, sudokhodstva i energetiki. Doklad na rasshirennom zasedanii Prezidiuma YuNTs RAN (g. Rostov-na-Donu, 25 maya 2016 g.).* [*Climate, water resources and reconstruction of hydraulic structures taking into account the interests of the population, fishing and agriculture, shipping and energy. Report at an expanded meeting of the Presidium of the SSC RAS (Rostov-on-Don, 25 May 2016)*]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 64 p. (In Russian).

18. Panov V.D., Lurie P.M., Larionov Yu.A. 2006. *Klimat Rostovskoy oblasti: vchera, segodnya, zavtra.* [*Climate of the Rostov Region: yesterday, today, tomorrow*]. Rostov-on-Don, Don Publishing House: 488 p. (In Russian).

19. *Trudy otdela torgovykh portov. Vyp. 12. Azovskoye more. Tekhniko-ekonomicheskiy obzor.* [*Proceedings of the department of commercial ports. Issue 12. Azov Sea. Technical and economic overview*]. 1904. St Petersburg, State Printing House: 172 p. (In Russian).

20. Kazmiruk V.D., Kazmiruk T.N., Brekhovskikh V.F. 2004. *Zarastayushchie vodotoki i vodoyemy: dinamicheskie protsessy formirovaniya donnykh otlozheniy.* [*Overgrowing streams and reservoirs: dynamic processes of formation of bottom sediments*]. Moscow, Nauka: 310 p. (In Russian).

Поступила 18.12.2020

УДК 551.3.051:551.35:551.795(262.54)

ПАЛЕООКЕАНОЛОГИЯ АЗОВСКОГО МОРЯ В ГОЛОЦЕНЕ (ПО ДАННЫМ БУРЕНИЯ И ИЗУЧЕНИЯ МАЛАКОФАУНЫ НА КОСЕ ДОЛГОЙ)[1]

Г. Г. Матишов[1, 2, *], В. В. Польшин[1], Е. П. Коваленко[1], К. С. Григоренко[1]

[1]Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия

[2]Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра РАН, Мурманск, Россия

**e-mail: matishov_ssc-ras@ssc-ras.ru*

Поступила в редакцию 18.09.2020 г.
После доработки 11.10.2020 г.
Принята к публикации 19.11.2020 г.

В статье представлены результаты исследований, проводимых сотрудниками ЮНЦ РАН на косе Долгой в 2019–2020 гг. Анализируются данные космоснимков, измерения прибрежных течений, бурения скважин, изучения малакофауны и определения абсолютного возраста береговых отложений. В соответствии с простиранием древних береговых валов, последовательностью их причленения друг к другу выделяются шесть геоморфологических генераций, отражающих ход нимфейской и отчасти более ранней трансгрессий. Данные радиоуглеродного датирования раковин моллюсков позволяют предположить, что основная часть аккумулятивного тела косы была образована за одну тысячу лет, в интервале 2.5–1.5 тыс. л.н. По результатам натурных наблюдений показано, что при слабом восточном ветре скорость течений у западного берега косы в 2–3 раза выше, чем у восточного. Приводится список, включающий порядка 20 видов и надвидовых таксонов моллюсков из береговых отложений косы Долгой. Отмечается, что основную массу (более 90%) ракушечных отложений, слагающих береговые валы, составляют створки раковин *Cerastoderma glaucum*.

Ключевые слова: Азовское море, коса Долгая, вдольбереговые потоки наносов, течения, ракушечные отложения, скважины, таксономический состав малакофауны, *Cerastoderma glaucum*, береговые валы

DOI: 10.31857/S0030157421030084

ВВЕДЕНИЕ

Азовское море на 30% представлено мелководьями с глубинами до 3 м. До сих пор нет четких представлений о развитии этого морского водоема в конце плейстоцена и в голоцене. Существуют расхождения во взглядах, касающиеся количества, амплитуды и продолжительности регрессивно-трансгрессивных циклов [1, 2, 5, 6, 8, 9, 12, 14, 20, 22, 27, 29, 30, 32–36, 41, 43, 44]. Среди характерных геоморфологических образований северного, западного и восточного побережий выделяются азовские косы. Осадочная толща кос сформирована преимущественно из створок моллюсков и ракушечного песка [3, 4, 11, 15, 19, 39].

Единственной в своем роде является коса-стрелка Долгая. Ее строение и история развития остаются неясны и требуют уточнения. За всю историю изучения косы Долгой не была опубликована характеристика отложений из карьеров по добыче ракушечного сырья, не выполнялось целенаправленное бурение, не выяснены конкретные источники и пути переноса раковин моллюсков. В ходе работы нам предстояло восстановить палеогеографическую обстановку в морском бассейне, определить таксономический состав малакофауны из отложений косы Долгой, выяснить предпосылки, способствовавшие формированию высокой биопродуктивности донных организмов и воссоздать оптимальную среду обитания для *Cerastoderma glaucum* Poiret, 1789 – ключевого осадкообразующего вида бентоса.

Цель работы заключалась в том, чтобы, опираясь на геоморфологический анализ морского дна, данные бурения скважин и исследование малакофауны, получить новые представления о палеоокеанологии Азовского моря в голоцене и реконструировать историю развития косы Долгой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С 2016 г. ЮНЦ РАН проводит планомерное бурение на побережье Таганрогского залива, а именно на косах: Очаковской, Чумбурской, Беглицкой и Долгой [20, 21].

[1] **Оригинальный текст:** *Матишов Г.Г., Польшин В.В., Коваленко Е.П., Григоренко К.С.* Палеоокеанология Азовского моря в голоцене (по данным бурения и изучения малакофауны на косе Долгой) // Океанология. 2021. Т. 61. № 4. С. 609–619.

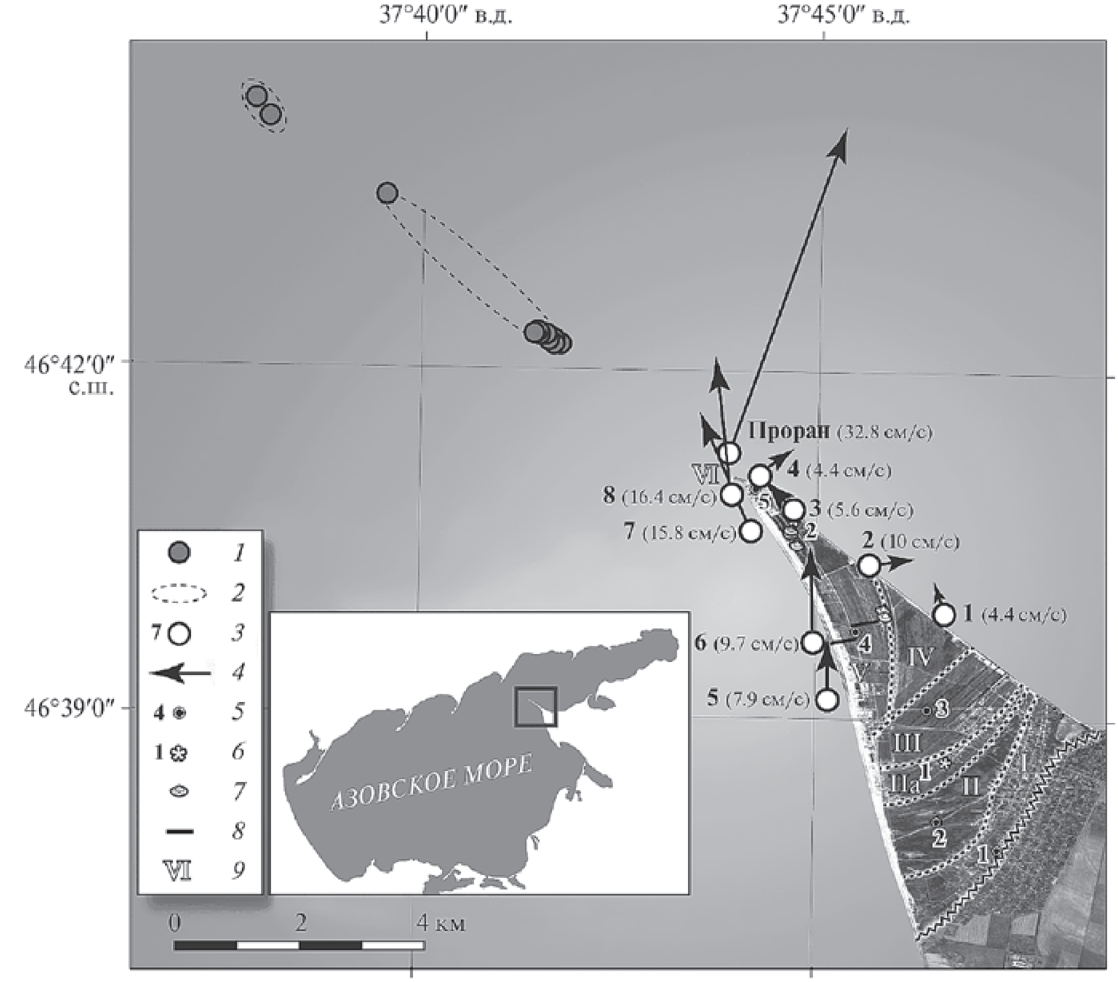


Рис. 1. Районы экспедиционных исследований ЮНЦ РАН в 2019–2020 гг.:
1 – точки отбора проб; *2* – остров; *3* – станции измерения течений Aanderraa RCM9LW (макс. скорость, см/с); *4* – скорость и направление течений, 5 см/с; *5* – бурение 2020 г.; *6* – бурение 2019 г.; *7* – малакофауна; *8* – маршруты ревизий древних береговых валов; *9* – геоморфологические районы (стадии развития косы Долгой).

В 2019–2020 гг. нами было пробурено 7 скважин с отбором керна в корневой, центральной и дистальной частях косы Долгой. В 2019 г. было пробурено 2 скважины глубиной 11 м. Глубина выработки скважин, пробуренных в 2020 г., составила: 1 – 19.40 м; 2 – 26.50 м; 3 – 25.50 м; 4 – 20.00 м; 5 – 21.50 м. Кроме этого были изучены 10 обнажений (мощностью от 1.7 до 2.5 м), расположенных в карьерах по добыче ракушечного сырья (рис. 1).

В прибрежных районах моря колонки донных осадков отбирались гравитационной трубкой с НИС "Денеб" и "Профессор Панов", а также вибрационной трубкой с несамоходного понтона. Особое внимание уделялось отбору раковинного материала по вертикали изученных разрезов. Отбор проб из обнажений, кернов скважин и грунтовых колонок производился послойно, с описанием видовой принадлежности, степени сохранности и фотографированием раковинного материала. В результате в ракушечных отложениях аккумулятивного тела косы было выявлено порядка 20 видов и надвидовых таксонов моллюсков (табл. 1).

Зообентос отбирался в прибрежных районах с поверхностного горизонта дна с помощью дночерпателя Ван-Вина. Пробы бентоса разбирались на месте и фиксировались 70%-ным этанолом. Организмы, попавшие в крупную фракцию (>0.5 см), определяли в живом виде.

В комплекс работ входила закладка контрольных точек геодезическим GNSS приемником "EFT M4 GNSS" для фиксации точек бурения и привязки аэрофотосъемки, а также измерения течений на участках акватории, прилегающей к косе Долгой. Используемый нами доплеровский

Таблица 1. Малакофаунистический состав береговых отложений косы Долгой

Таксон	% от общего количества створок и раковин в отложениях				
	0.5 м	1.0 м	1.5 м	2.0 м	2.5 м
	радиоуглеродный возраст раковин моллюсков				
	1590 ± 100	2420 ± 120	2300 ± 130	2110 ± 110	1960 ± 90
Cerastoderma glaucum	**96.14**	**90.82**	**93.57**	**80.83**	**76.54**
Bittium reticulatum	**1.51**	**6.01**	**2.75**	**10.25**	**13.14**
Pholadidae gen. sp.	0.00	0.52	0.47	**2.37**	**3.11**
Tritia reticulata	**1.51**	**0.94**	**1.18**	**1.33**	**1.14**
***Hydrobia* sp.**	0.00	0.00	0.16	**2.47**	**1.14**
Chamelea gallina	0.17	0.34	0.86	0.66	**1.67**
Abra segmentum	0.00	0.17	0.24	0.09	**1.14**
Theodoxus sp.	0.00	0.86	0.63	0.47	0.76
Mytilidae gen. sp.	0.67	0.00	0.08	0.38	0.76
Lentidium mediterraneum	0.00	0.09	0.00	0.38	0.23
Rissoa sp.	0.00	0.09	0.08	0.19	0.30
Abra sp.	0.00	0.00	0.00	0.47	0.00
Hydrobia acuta	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00
Cylichnina sp.	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00
Raphitomidae gen. sp.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08
Общее количество створок Bivalvia и раковин Gastropoda	**596**	**1165**	**1275**	**1054**	**1317**

Примечание. Кроме того, в отобранном керне и изученных обнажениях отмечались единичные раковины моллюсков: *Parthenina* sp., *Ebala pointeli* (Folin, 1867), *Tragula fenestrata* (Forbes, 1848), *Retusa* sp., *Gastrana fragilis*, *Solen vagina*, *Barnea candida*.

измеритель течений Aanderaa RCM 9LW с дискретность измерений 5 мин был укомплектован датчиками температуры и солености. Для сравнения полученных результатов были привлечены данные предыдущих съемок Южного научного центра РАН [18, 19].

Абсолютный возраст отложений определялся радиоуглеродным методом по образцам раковин моллюсков из керна скважин и обнажений в лаборатории геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и Мирового океана им. В.П. Кёппена (Санкт-Петербургский государственный университет). Значения календарного возраста были получены с помощью программы “OxCal 4.3” (калибровочная кривая “IntCal 13”).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Гидрология. Для современного Азовского моря характерно существование течений, направленных с обеих сторон косы Долгой к ее дистальной части. По результатам экспедиции, проводимой летом 2020 г., было установлено, что в условиях слабого восточного ветра (1–3 м/с) вдольбереговые течения с обеих сторон косы Долгой направлены от основания к ее оконечности. При этом течения у западного берега косы в 2–3 раза сильнее (10–15 см/с), чем у восточного. У восточного берега, в средней части косы, течения имеют разнонаправленный характер и к дистальной части усиливаются до 4–6 см/с. В узостях между островами косы течения имеют максимальные скорости (более 32 см/с) (рис. 1). Даже при слабом ветре из Азовского моря в Таганрогский залив скорость водотока сохраняется. Очевидно, что и на ранних стадиях формирования аккумулятивного тела косы основной поток наносов осуществлялся из юго-восточного района моря [28].

Геоморфология голоцена. Исходя из анализа космических снимков, коса Долгая представляет собой чередование валов и ложбин, фиксирующих стадии последовательного выдвижения аккумулятивной формы в море [45]. Общая протяженность системы коса–острова – более 20 км. Длина собственно косы составляет более 10 км, а ширина ее основания около 4 км. Высота береговых валов над уровнем моря достигает 2.5 м.

В соответствии с простиранием древних береговых валов и лагун, последовательностью их причленения друг к другу выделяются шесть геоморфологических генераций, отражающих осцилляции нимфейской и отчасти более ранней трансгрессий.

Первая стадия развития косы Долгой соотносится с образованием прикорневой террасы вдоль обрыва коренного берега – по возрасту самая ранняя, вероятно 6–7 тыс. л.н. [3].

Вторая стадия – стадия лиманов и лагун, выражена в рельефе системой из порядка 30 вытянутых впадин. Абсолютное превышение перемычек, разделяющих лагуны, составляет 0.6–0.8 м Балтийской системы высот (БСВ). Лагуны возникли на низком стоянии уровня Азовского моря. В периоды высокого стояния уровня, при западных штормах эта часть косы затапливается, что фиксировалось в 1914, 1960, 1969 и 1970 гг. В условиях же низкого стояния уровня лагуны полностью осушались, давая толчок к возникновению растительности [3].

Третья и ***четвертая*** стадии возникновения береговых валов отражают различные фазы нимфейской трансгрессии (2.4–1.5 тыс. л.н.). Определенный по ^{14}C возраст моллюсков из ракушечных валов составил 1670–2300 л. [3]. Коса Долгая в это время была гораздо короче и не являлась стрелкой в геоморфологическом смысле.

Пятая стадия развития косы Долгой относится к историческому времени (0.5–0.1 тыс. л.н.). В это время она развивалась по типу косы-стрелки. Современную литодинамику отражает ***шестая*** стадия развития косы. С 1890 по 2000 гг. прослеживалась устойчивая тенденция уменьшения длины оконечности косы. Этот процесс интенсивно происходил с 1890 по 1958 гг., когда протяженность косы уменьшилась на 1.35 км. За период с 1964 по 1966 гг. оконечность отступила на юг на 0.75 км, а за 2006–2016 гг. – еще на 50–60 м [3, 4].

К этой же стадии развития косы можно отнести возникновение гряды островов и отмелей, протягивающихся на 12 км к северо-западу от ее дистальной оконечности. В литературе нет описаний этих образований. В ходе экспедиционных исследований нами был выполнен пеший и водный (на маломерном судне) осмотр, аэрофотосъемка, а также заложен шурф глубиной 1.6 м на одном из островов. В результате было установлено, что численность песчаных островов (у одного из них координаты 46°44′14.6″ с.ш. и 37°37′51.9″ в.д.) постоянно изменяется от 15 до 20, в зависимости от штормовых сгонно-нагонных явлений. Островная гряда возвышается над уровнем моря в среднем на 1–2.5 м. Три самых высоких острова имеют длину до 1 км. Сложены острова ракушечным детритом и целыми створками раковин.

Бурение. Геологические работы. Бурение, проведенное в 2019–2020 гг., позволило нам получить представление о строении и литологии отложений косы Долгой. Точки бурения в 2020 г. намечались в соответствии с пятью предварительно обозначенными геоморфологическими районами: скв. 1 – на верхней террасе в 50 м от обрывов коренного берега, скв. 2 – на осушке лагуны, скв. №№ 3 и 4 (координаты 46°38′49.4″ с.ш., 37°46′35.1″ в.д. и 46°39′33.5″ с.ш., 37°45′37.3″ в.д. соответственно) были пробурены на двух береговых валах, а скв. № 5 – на дистальном окончании косы (рис. 1).

Вскрытая скважинами верхняя часть отложений косы Долгой повсеместно сложена ракушечным материалом с примесью глины и суглинка. Мощность ракушечных отложений увеличивается от корневой к дистальной части косы с 4 до 7 м (рис. 2). Мористее оконечности косы залегают новоазовские отложения, представленные песчано-ракушечными осадками, мощность которых может достигать 10 м [41].

В ракушечных отложениях по вертикали разреза отмечается резкое преобладание створок раковин и детрита моллюсков рода *Cerastoderma* Poli, 1795 (более 95%). Значительно реже встречаются *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819, *Chamelea gallina* (Linné, 1758), *Abra segmentum* (Récluz, 1843), *Gastrana fragilis* (Linné, 1758) и раковины *Rissoa* sp. и *Tritia reticulata* (Linné, 1758). Цвет ракушечных отложений меняется от белого и светло-желтого (в верхней части) до серо-черного (в нижней части). Верхняя часть ракушечной толщи уплотнена, а средняя сильно обводнена.

Уровень безнапорных грунтовых вод в районах бурения повышается от корневой к дистальной части косы от 3.5 до 1.6 м. По всей площади косы под ракушечными наносами с прослоями иловатой глины и суглинка прослеживаются коричневые тугопластичные суглинки с включениями гидроокислов Fe, Mn и карбонатов. Местами в суглинках отмечаются прослои мелкозернистого обводненного песка. В нижней части разрезов скважинами №№ 2, 4 и 5 вскрыты обводненные мелкозернистые пески коричневого цвета. Отмечено ожелезнение песчаных зерен по поверхности и редкие прослои тугопластичной глины. В песках, отобранных из низов керна скв. 4, присутствуют включения раковинного материала до 10% от объема отобранной пробы. Здесь массово отмечаются раковины моллюсков: *Viviparus* sp., *Bittium* sp., *Lithoglyphus* sp., *Planorbis* sp., *Dreissena* sp., *Theodoxus* sp., *Cerastoderma* sp. *и Abra* sp. Найденные совместно с ними зубы *Arvicola cf. mosbachensis и Microtus cf. gregalis* (примитивный морфотип) позволяют коррелировать эти слои с началом среднего неоплейстоцена (определения А.С. Тесакова, ГИН РАН).

Исследование малакофауны. В настоящее время ключевую роль в образовании карбонатных осадков в Азовском море играет моллюск *Cerastoderma glaucum*, характеризующийся высокой про-

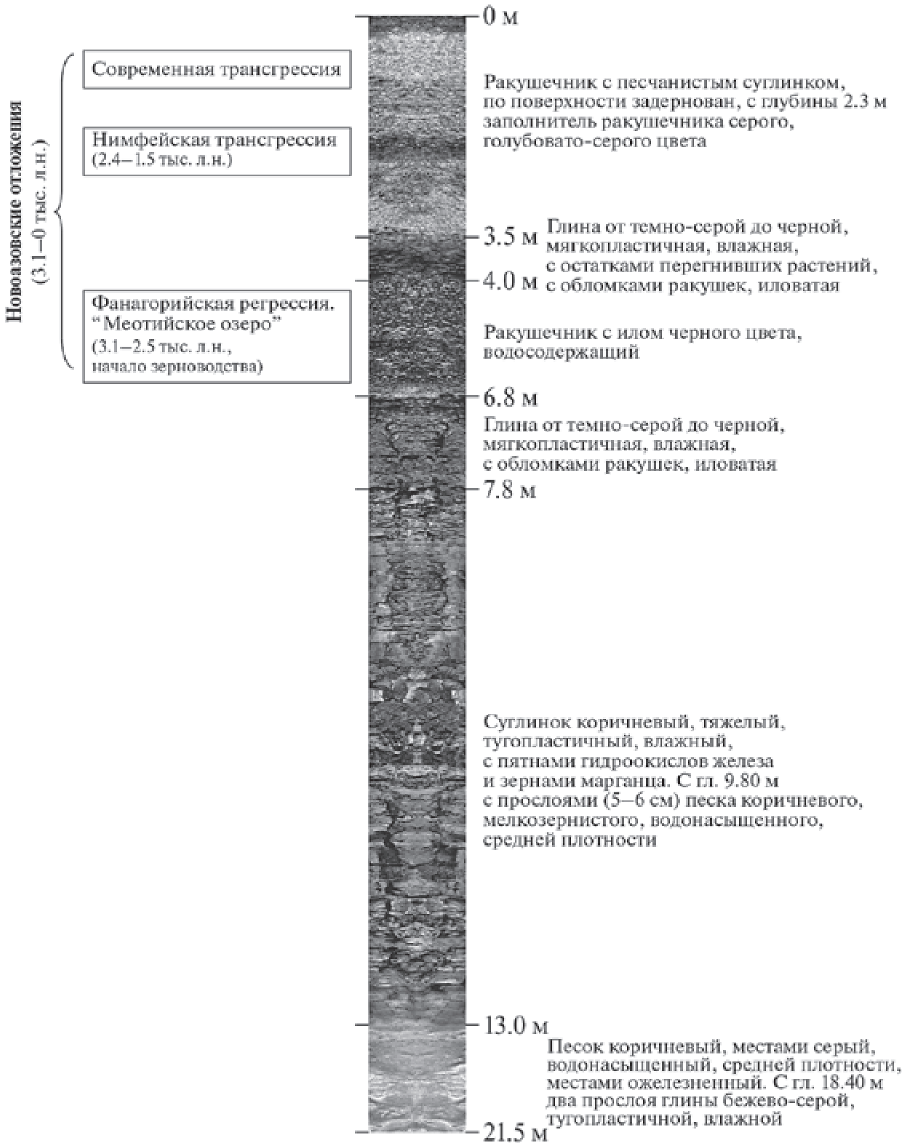


Рис. 2. Геологический разрез скв. 5 (по результатам бурения 2020 г.).

дуктивностью и прочностью створки, а также *Abra segmentum* и *Mytilaster lineatus* (Gmelin, 1790) [7, 37]. Заметное влияние на этот процесс также оказывают *Mytilus galloprovincialis* и вселенцы *Mya arenaria* Linné, 1758 и *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906). Общая годовая продукция зообентоса в Азовском море оценивается в 19–20 млн т, в том числе продукция *Cerastoderma glaucum* составляет 13–14 млн т в год, достигая биомассы 2 кг/м^2 [7, 13].

При изучении обнажений на косе Долгой нами было отмечено, что ракушечные отложения преимущественно состоят из раковин моллюска *Cerastoderma glaucum* разной степени сохранности (табл. 1).

В дистальной части косы исследовались обнажения в стенках карьеров по добыче ракушечного сырья. Вся толща отложений представляет собой чередование слоев хорошо сохранившихся раковин с прослоями раковинного детрита. Цвет отложений – от светло-желтого до желто-коричневого. Нижние горизонты обводнены, ракуша окрашена в серый и черный цвета и имеет характерный запах сероводорода.

К основанию изученных обнажений в отложениях отмечается увеличение содержания более крупных и массивных створок раковин руководящего вида *Cerastoderma glaucum*. В виде прослоев и единичных включений также были отмечены крупные, хорошо сохранившиеся, створки *Cha-*

melea gallina. Кроме того, на разных глубинах встречаются раковины и обломки *Theodoxus* sp., *Solen vagina* Linné, 1758, *Bittium reticulatum* (Costa, 1799)*, Tritia reticulata*, Pholadidae gen. sp. и сильно разрушенные обломки Mytilidae gen. sp. В отложениях, отобранных на глубине 2.5 м от дневной поверхности, отмечено резкое увеличение количества *Bittium reticulatium* (до 13.14%) при сокращении доли *Cerastoderma* (до 76.5%) (табл. 1). Этот морской моллюск обитает на водной растительности и илисто-песчаных грунтах до глубины 20 м и выносит опреснение до 10‰ [40].

Ракушечные отложения центральной части косы в основном сложены имеющими различный размер и толщину целыми и слаборазрушенными створками раковин *Cerastoderma glaucum* с примесью песчано-илистых частиц. Отмечается переслаивание слоев, преимущественно сложенных целыми створками раковин, с маломощными прослоями, в составе которых преобладает ракушечный детрит. В основании расчистки встречаются крупные раковины *Chamelea gallina*. На разных горизонтах отмечены единичные раковины *Barnea candida* (Linné, 1758), *Abra segmentum, Lentidium mediterraneum* (Costa, 1829)*, Bittium reticulatum, Tritia reticulata*, *Rissoa* sp., *Hydrobia* sp. и *Theodoxus pallasi* Lindholm, 1924.

Исследование островов у оконечности косы Долгой показали, что их толща сложена в основном хорошо сохранившимися створками *Cerastoderma glaucum*. В меньшем количестве встречаются преимущественно скрепленные раковины *Mytilaster lineatus*. Много створок моллюсков-вселенцев *Mya arenaria* и *Anadara kagoshimensis*, впервые отмеченных в Азовском море в середине прошлого века. На поверхности островов, кроме вышеперечисленных, отмечены створки *Solen vagina*, *Gastrana fragilis*, *Chamelea gallina*, *Mytilus galloprovincialis*, единичные раковины *Bittium reticulatum*, *Hydrobia* sp., свежая раковина *Viviparus viviparus* (Linné, 1758), на отдельных створках отмечены раковины рака *Balanus improvisus* Darwin, 1854. Наличие в пробе недавних вселенцев, створок мидий, скрепленных лигаментом, позволяют предположить, что верхняя часть островов сложена современным раковинным материалом.

Таким образом, основную массу ракушечных отложений, образующих аккумулятивное тело косы Долгой, составляют раковины эвригалинных видов *Cerastoderma glaucum* (содержание в отложениях более 90%)*, Abra segmentum, Hydrobia* sp., способных выносить опреснение до 5‰. Присутствие в отобранных пробах створок умеренно стеногалинного моллюска *Gastrana fragilis*, который в настоящее время обитает в Черном море, может свидетельствовать о периодическом увеличении солености водоема, а наличие раковин солоноватоводного брюхоногого моллюска рода *Theodoxus* Monfort, 1810, способного обитать при солености не более 5–7‰ – на его опреснение. Также в исследованных пробах в большом количестве были встречены раковины *Barnea candida*, образующие устойчивые биоценозы на плотных и твердых грунтах [10, 26].

Предварительный анализ малакофауны из исследованных обнажений, подкрепленный полученными данными абсолютного датирования возраста (по ^{14}C), позволяет предположить, что основная часть аккумулятивного тела косы была образована в интервале времени от 1920 ± 110 (ЛУ-9756) до 2500 ± 150 (ЛУ-9757) лет, во время нимфейской трансгрессии (табл. 1).

Мелководье банок на востоке моря. Важное место в формировании биопродуктивности Азовского моря занимает прибрежный шельф в 100-километровой зоне к западу от Приморска-Ахтарска и Должанской косы, имеющий ряд отличительных геоморфологических черт. Здесь широко развиты крупные подводные гряды – банки Еленина, Железинская, Ахтарская и Ачуевская, длина которых достигает 35–50 км (рис. 3) [16].

Глубины над вершинами банок минимальные, возрастают от 3 до 7 м, а над банкой Еленина составляют 1–2 м. Высота гряд по отношению ко дну прилегающих ложбин варьирует от 2 до 5 м. На вершинах распространены самые значительные для открытого моря площади песчано-ракушечных отложений (фракция 1.0–0.1 мм >70%), а на подводном склоне банок залегают илистые пески с содержанием фракции 1.0–0.1 мм в пределах 50–70% (рис. 3). Во многих местах донные осадки представляют собой заиленный ракушечник. Железинская и Ахтарская банки разделены между собой сравнительно узкой ложбиной, заполненной илистыми отложениями со значительным включением раковинного материала [16, 17, 31]. По периферии Железинской банки возраст отложений в интервалах 80–90 и 210–220 см составил 5900 ± 140 л.н. (ЛУ – 6799) и 6480 ± 120 л.н. (ЛУ – 7047) соответственно [23].

Опираясь на данные о структуре донных сообществ Азовского моря и закономерностях их распределения, представленные в наших ранних публикациях [24–26, 42], можно отметить, что зонами современного карбонатонакопления остаются заливы Северного Приазовья, район Арабатской стрелки и банок Еленина, Ахтарской и Железинской [17, 38]. Ряд отличительных черт этих районов способствуют формированию благоприятных условий для развития здесь высокопродуктивных бентосных сообществ.

Проведенные исследования показали, что центральную роль в формировании донных сообществ в районах с пересеченным рельефом дна играют два вида моллюсков – *Mytilaster lineatus* и *Cerastoderma glaucum*. В распространении зообен-

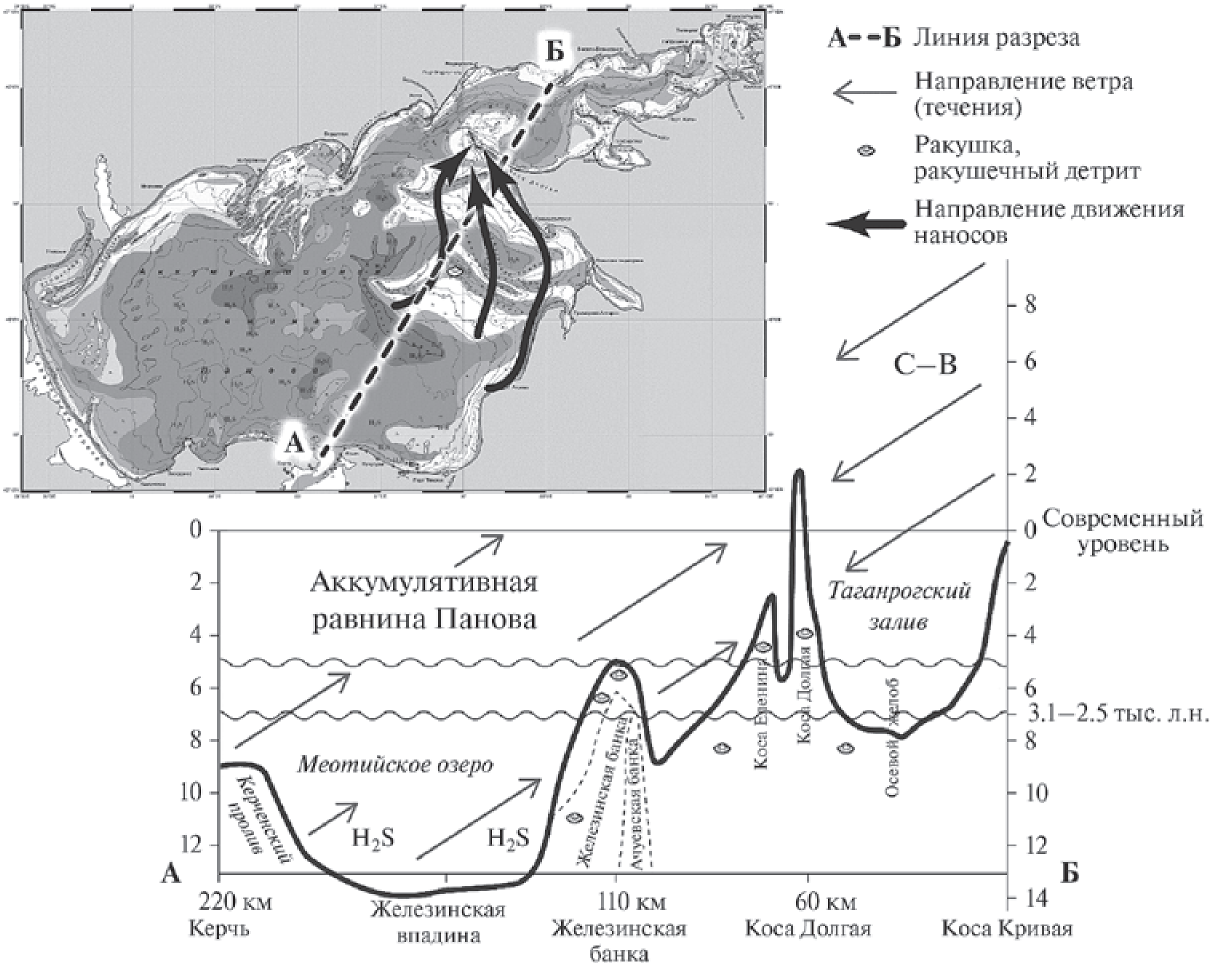


Рис. 3. Рельеф дна и состав донных отложений Азовского моря.

тоса в обозначенном районе прослеживаются четкие закономерности. Сообщества *Mytilaster* населяют гребни банок и с увеличением глубины сменяются сообществом *Cerastoderma*, которое спускается к ложбинам у основания банок, окантовывает их и проникает внутрь расчлененных участков шельфа.

Mytilaster lineatus формирует богатые органикой друзовые сообщества с высокими показателями биомассы, достигающими максимального значения на Железинской банке – 5 кг/м^2.

Сообщество *Cerastoderma* в основном приурочено к алевритовым и алевритово-глинистым илам. В его состав входят пелофильные виды: *Hydrobia acuta* (Draparnaud, 1805), *Nephthys hombergii* Savigny in Lamarck, 1818, *Neanthes succinea* (Leuckart, 1847), биомасса зообентоса не превышает 300 г/м^2 [24].

Современный геоморфологический и литологический облик отмеченных мелководий глубиной 1–7 м, расположенных на вершинах банок, создавался в течение последних 2 тыс. лет в ходе нимфейской трансгрессии. В фанагорийскую регрессию или в античное время уровень моря опускался на 6–7 м ниже современного его положения [20]. При этом вся акватория Таганрогского залива, Железинская и другие банки осушались, и вышедший на поверхность участок дна подвергался воздействию денудации.

ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности развития косы Долгой. Феноменальным по размеру представляется ракушечное тело косы Долгой: 20 км × 4 км × 4–7 м (длина, ширина, толщина). О масштабе аккумуляции раковинного материала свидетельствует объем его промышленного изъятия (порядка 1.451 млн т с 1956 по 1970 г.) из одного из карьеров, расположенных на оконечности косы [3, 4]. Исходя из данных радиоуглеродного датирования моллюсков, период накопления колоссального объема ракуши охватывал временной промежуток в че-

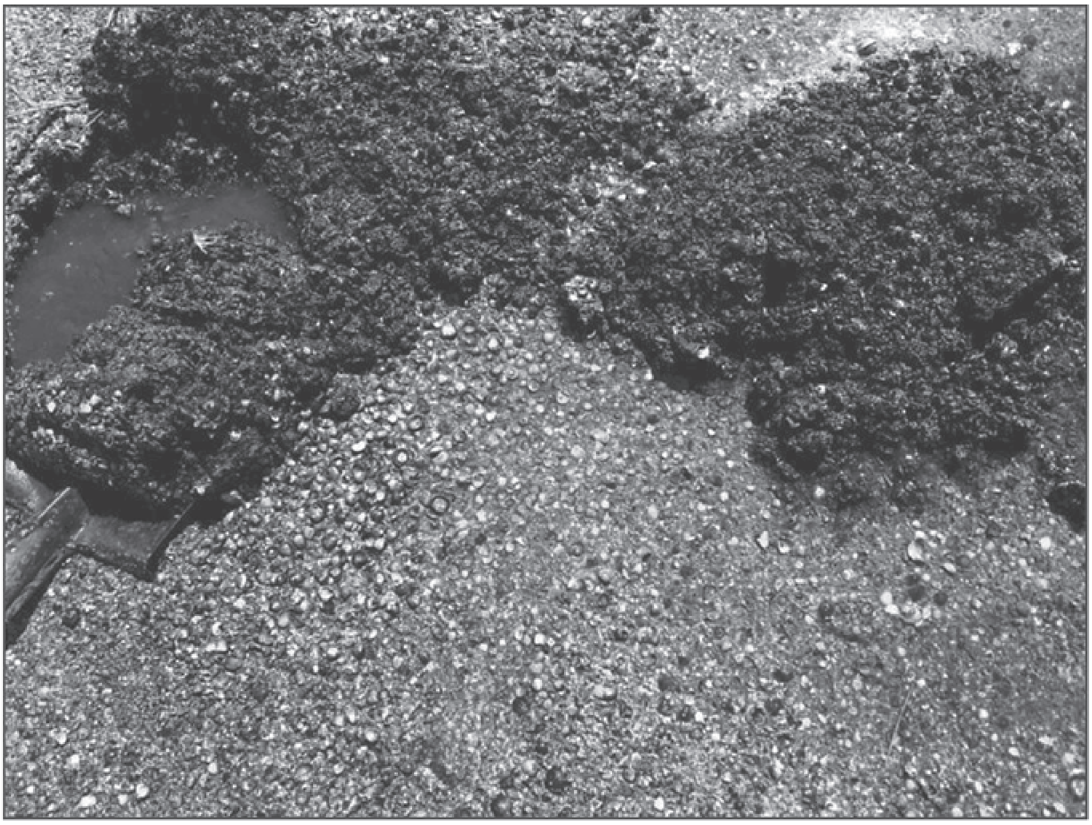


Рис. 4. Ракушечные отложения с нижних горизонтов аккумулятивного тела косы Долгой.

тыре тысячи лет. Однако основная часть органогенного материала косы сформировалась примерно за одну тысячу лет, в интервале 2.5–1.5 тыс. л.н.

Сочетание на косе Долгой генераций реликтовых береговых валов (порядка 150), залежей ракушняка и ракушечного детрита, видовое разнообразие моллюсков, для которых установлен радиоуглеродный возраст, господство среди видов зообентоса *Cerastoderma* sp., в совокупности приоткрывают неизвестные черты палеогеографии Азовского моря в голоцене.

Геоморфологические черты азовских кос сформировались в середине голоцена в условиях новочерноморской (4–6 тыс. л.н.) и нимфейской (2.4–1.5 тыс. л.н.) трансгрессий. Эти рубежи подтверждаются датировками абсолютного возраста отложений (по ^{14}C) [20, 22]. Ракушечные образования кос Долгой, Бердянской, Обиточной в открытой части шельфа могли вступить в начальную стадию развития с момента поступления черноморских вод и затопления впадины Азовского моря около 5–6 тыс. л.н.

К концу древнеазовского этапа развития господствовали морские эвригалинные моллюски [27]. Последующее осолонение моря с одновременным поступлением пресных вод привело к массовому развитию донных биоценозов с доминированием Bivalvia Linne, 1758. Это способствовало продуцированию гигантского объема створок моллюсков, которые обеспечили формирование значительных по площади и объему аккумулятивных тел [2, 3].

В эпоху фанагорийской регрессии (Меотийское озеро) уровень моря был ниже современного на 6–7 м, а морской край дельты Дона неоднократно смещался [12, 20]. Наличие на современном шельфе площадей древней суши подтверждается нахождением античных следов ниже современного уровня моря. Артефакты отмечены в ракушечных отложениях Песчаных островов (центральная часть Таганрогского залива), на пляжах косы Долгой, к северу от Керченско-Таманского побережья [2, 3, 20].

Скважины, пробуренные в 2019–2020 гг., дополняют представления о фанагорийских озерно-морских отложениях эпохи "Меотийского озера" (3.1–2.5 тыс.л.н.). В керне, отобранном с глубины от 2 до 5 м, периодически встречались ракушечные отложения темно-серого до черного цвета с запахом сероводорода. Заражение сероводородом – особенность отложений Азовского моря, которые формировались в обстановке дефицита кислорода в условиях лагун, болот и плавней (Меотийское море) (рис. 4). Судя по видовому составу малакофауны, в этот этап развития моря соленость превышала 5–8‰ [26].

С началом нимфейской трансгрессии Меотийское озеро стало превращаться в полноценную морскую акваторию. Активное развитие береговых кос происходило, когда соленость водоема возросла до 11–12‰. В противном случае отложения кос формировали бы тонкостенные и неустойчивые к волновому воздействию раковины двустворчатых моллюсков родов *Dreissena* Beneden, 1835, *Monodacna* Eichwald, 1838, *Anodonta* Lamarck, 1799 и др. [2].

В целом нимфейская трансгрессия ассоциируется с накоплением отложений новоазовского возраста (возраст 3.1–0 тыс. л.н.), которые имеют повсеместное распространение. В центре моря они представлены глинистыми, алеврито-глинистыми и мелкоалевритовыми илами с маломощными (1–2, реже 5–7 см) прослоями ракуши [20, 31].

На косе Долгой вначале формировалась генерация валов у Ейского коренного выступа с простиранием на северо-восток. На Ейском побережье преобладают восточные ветры, но разгон волн невелик. Юго-западные ветры более редки, но имея значительную длину разгона, возбуждают крупные волны. Поскольку отмель косы Долгая играет роль “барьера” на входе в Таганрогский залив, у ее оконечности в проранах возникают штормовые течения, скорость которых может достигать 1–1/5 м/с [3, 19]. Такой силы водотоки способствуют активному размыву песчаных аккумулятивных тел (рис. 1).

В завершающую стадию аккумулятивные дуги косы выстраивались в северо-западном направлении. Господствовали южные ветровые течения и вдольбереговые потоки наносов. В этот же период возникшие ранее валы активно срезались течениями из Таганрогского залива. При двустороннем питании происходило выдвижение оконечности косы в открытое море и формирование стрелки косы.

Основной причиной образования и дальнейшего роста прибрежных кос явилось то, что в береговую зону непрерывно поступал интенсивно продуцируемый органогенный материал из центра Азовского моря [11, 39]. Крупнейший источник наносов для формирования надводно-подводной части косы Долгой очевидно существовал на юго-востоке азовского шельфа в районе Железинской, Ахтарской, Еленинной банок. Площадь этих положительных структур составляет порядка 100 км^2. Господство южных румбов в Азовском море предопределило вектор перемещения органогенных наносов в сторону косы Долгой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на большой объем проведенных раннее исследований, вопросы формирования и трансформации кос Азовского моря продолжают оставаться актуальными и в настоящее время. Прежде всего, это относится к вопросам определения возраста этих аккумулятивных форм. Напрямую это пересекается с неопределенностью, касающейся установления границ береговой линии Азовского моря в разные периоды голоценовой истории. Зачастую мнения исследователей по этому вопросу кардинально расходятся. Как нам представляется, причина таких разночтений во многом заключается в том, что проводимые исследования, как правило, не носят комплексный и систематический характер. Между тем, наш опыт показывает, что наилучший результат получается только при совместном анализе одновременно полученных океанологических, геофизических, литологических и биостратиграфических данных. Подобный комплексный подход позволяет взглянуть на научную проблему с разных сторон, что значительно снижает вероятность ошибочной трактовки полученных результатов.

Таким образом, целенаправленное применение на азовских косах комплекса океанологических исследований и бурения в сочетании с расшифровкой по космоснимкам рельефа береговых валов, радиоуглеродными датировками моллюсков и анализом малакофауны открывает новые возможности для реконструкций палеобиопродуктивности водоема и истории голоцена Азово-Черноморского бассейна. При этом полученные результаты могут быть актуальны при освоении акватории Азовского моря. Их всесторонний анализ будет способствовать решению проблем, связанных с управлением и минимизацией экологических рисков и выработки стратегии устойчивого развития региона.

Источники финансирования. Публикация подготовлена в рамках реализации гранта РНФ № 20-17-00196.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артюхин Ю.В.* К геоморфологической интерпретации природных условий античной колонизации вершины Таганрогского залива // Древности Боспора. Т. 14. М.: Таус, 2010. С. 28–38.
2. *Артюхин Ю.В.* Факторы изменчивости природных условий существования греческих колоний на берегах Меотийского озера и Киммерийского Боспора в позднеантичную эпоху // Боспорские исследования. Вып. XXXIII. Керчь: Керченская городская типография, 2016. С. 163–185.
3. *Артюхин Ю.В., Артюхина О.И., Родионова Н.Б.* Ейское морское побережье: история и проблемы освоения, природные основы реконструкции. Ейск: Фонд науки и образования, 2015. 205 с.
4. *Артюхин Ю.В., Артюхина О.И., Суслов О.Н., Шереметьев В.М.* Природные условия северного региона Краснодарского края и проблемы хозяйствен-

ного освоения его морского побережья. Ростов-на-Дону: Фонд науки и образования, 2016. 142 с.

5. *Балабанов И.П., Измайлов Я.А.* Изменение уровневого и гидрохимического режимов Черного и Азовского морей за последние двадцать тысяч лет // Водные ресурсы. 1988. № 6. С. 54–62.
6. *Барг И.М.* О возрасте и образовании Керченского пролива и Азовского моря // Докл. РАН. 2007. Т. 412. № 2. С. 220–222.
7. *Воробьев В.П.* Бентос Азовского моря. Симферополь: Крымиздат, 1949. 193 с.
8. *Горецкий Г.И.* Аллювиальная летопись великого Пра-Днепра. М.: Наука, 1970. 491 с.
9. *Дикарёв В.А.* О фанагорийской регрессии Черного моря // Вестник Московского государственного университета. Сер. 5. География. 2011. № 1. С. 35–40.
10. *Зенкевич Л.А.* Биология морей СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 740 с.
11. *Зенкович В.П.* Берега Черного и Азовского морей. М.: Географгиз, 1958. 374 с.
12. *Иванов В.В., Коротаев В.Н., Римский-Корсаков Н.А. и др.* Строение поймы и динамика русла Нижнего Дона // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2013. № 5. С. 60–66.
13. *Ивлиева О.В., Фроленко Л.Н.* Биогенное карбонатонакопление донных отложений Азовского моря во второй половине XX века // Изв. ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2009. № 4. С. 96–100.
14. *Маев Е.Г., Мысливец В.И., Зверев А.С.* Строение верхнего слоя осадков и рельеф дна Таганрогского залива Азовского моря // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2009. № 5. С. 78–82.
15. *Мамыкина В.А., Хрусталев Ю.П.* Береговая зона Азовского моря. Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 1980. 176 с.
16. *Матишов Г.Г.* Новые данные о геоморфологии дна Азовского моря // Докл. РАН. 2006. Т. 409. № 3. С. 375–380.
17. *Матишов Г.Г.* Сейсмопрофилирование и картирование новейших отложений дна Азовского моря // Вестник ЮНЦ РАН. 2007. Т. 3. № 3. С. 32–40.
18. *Матишов Г.Г., Григоренко К.С.* Причины осолонения Таганрогского залива // Докл. РАН. 2017. Т. 477. № 1. С. 92–96.
19. *Матишов Г.Г., Григоренко К.С.* Динамический режим Азовского моря в условиях осолонения // Докл. РАН. Науки о земле. 2020. Т. 429. № 1. С. 107–112.
20. *Матишов Г.Г., Польшин В.В., Ковалёва Г.В., Титов В.В.* Литология и биостратиграфия голоценовых отложений Азовского моря: итоги 15-летних исследований // Наука Юга России. 2019. Т. 15. № 3. С. 24–34.
21. *Матишов Г.Г, Польшин В.В, Титов В.В.* Исследования отложений кос Азовского моря (на примере косы Долгой) // Океанология. 2020. Т. 60. № 1. С. 158–161.
22. *Матишов Г.Г., Польшин В.В.* Новые результаты по истории Азовского моря в голоцене // Докл. РАН. 2019. Т. 489. № 2. С. 190–194.
23. *Матишов Г.Г., Польшин В.В., Титов В.В., Шевердяев И.В.* Голоценовая история азовского шельфа // Наука Юга России. 2019. Т. 15. № 1. С. 42–53.
24. *Матишов Г.Г., Польшин В.В., Шохин И.В.* Влияние геоморфологических особенностей дна Азовского моря на распределение бентоса // Вестник ЮНЦ РАН. 2010. Т. 6. № 2. С. 14–20.
25. *Матишов Г.Г., Шохин И.В., Набоженко М.В., Польшин В.В.* Многолетние изменения донных сообществ Азовского моря в связи с характером осадконакопления и гидрологическим режимом моря // Океанология. 2008. Т. 48. № 3. С. 425–435.
26. *Набоженко М.В.* Реконструкция и динамика таксоценоза двустворчатых моллюсков (Mollusca: Bivalvia) Азовского моря в позднем голоцене в связи с изменением солености // Тр. Зоологич. ин-та РАН. 2013. № 3. С. 182–191.
27. *Невесская Л.А.* Позднечетвертичные двустворчатые моллюски Черного моря, их систематика и экология // Тр. Палеонт. ин-та АН СССР. 1965. Т. 105. 390 с.
28. Определитель Черного и Азовского морей / Под ред. Мордухай-Болтовского Ф.Д. Т. 3. Киев: Наукова Думка, 1972. 340 с.
29. *Панов Д.Г.* История развития Азовского моря в голоцене // Океанология. 1965. Т. 5. № 4. С. 673–682.
30. *Панов Д.Г., Хрусталев Ю.П.* Об истории развития Азовского моря в голоцене // Докл. АН СССР. 1966. Т. 166. № 2. С. 429–432.
31. *Польшин В.В.* Донные отложения позднего голоцена Азовского моря // Геология, география и экология океана / Под ред. Г.Г. Матишова. Ростов-на-Дону: изд-во ЮНЦ РАН, 2009. С. 269–272.
32. *Попов Г.И.* Плейстоцен черноморско-каспийских проливов. М.: Наука, 1983. 216 с.
33. *Свиточ А.А.* Морской плейстоцен побережий России. М.: ГЕОС, 2003. 362 с.
34. *Свиточ А.А., Янина Т.А.* Новые данные по малакофауне морского плейстоцена Маныча // Докл. РАН. 2001. Т. 380. № 4. С. 570–573.
35. *Семененко В.Н., Ковалюх Н.Н.* Абсолютный возраст верхнечетвертичных отложений азово-черноморского бассейна по данным радиоуглеродного анализа // Геологический журнал. 1973. Т. 33. № 6. С. 91–97.
36. *Федоров П.В.* Послеледниковая трансгрессия Черного моря и проблема изменений уровня океана за последние 15000 лет // Колебания уровня морей и океанов за 15000 лет / Под ред. Каплина П.А., Клиге Р.К., Чепалыги А.Л. М.: Наука, 1982. С. 151–156.
37. *Фроленко Л.Н.* Зообентос Азовского моря и особенности его развития в современный период // Изв. ВУЗов Сев.-Кав. регион. Естеств. науки. 2000. № 4. С. 62–65.
38. *Хрусталев Ю.П.* Закономерности осадконакопления во внутриконтинентальных морях аридной зоны. Л.: Наука, 1989. 261 с.
39. *Хрусталев Ю.П., Щербаков Д.А.* Позднечетвертичные отложения Азовского моря и условия их накопления. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 1974. 148 с.

40. *Чухчин В.Д.* Экология брюхорогих моллюсков Черного моря. Киев: Наукова Думка, 1984. 176 с.

41. *Шнюков Е.Ф., Орловский Г.Н., Усенко В.П., Григорьев А.В., Гордиевич В.А.* Геология Азовского моря. Киев: Наукова думка, 1974. 248 с.

42. *Шохин И.В., Набоженко М.В., Сарвилина С.В., Титова Е.П.* Современное состояние и закономерности распределения донных сообществ Таганрогского залива // Океанология. 2006. Т. 46. № 3. С. 432–441.

43. *Янина Т.А.* Неоплейстоцен Понто-Каспия: биостратиграфия, палеогеография, корреляция. М.: Географ. ф-тет МГУ, 2012. 264 с.

44. *Brückner H., Kelterbaum D., Marunchak O. et al.* The Holocene sea level story since 7500 BP – Lessons from the Eastern Mediterranean, the Black and the Azov Seas // Quaternary International. 2010. V. 225. № 2. P. 160–179.

45. World Imagery ESRI. URL: http://goto.arcgisonline.com/maps/World_Imagery (Accessed 12 December 2019).

Paleooceanology of the Azov Sea in Holocene (Based on Geological Examination Data and Investigation of Malacofauna on the Dolgaya Spit)

G. G. Matishov[a, b, #], V. V. Polshin[a], E. P. Kovalenko[a], K. S. Grigorenko[a]

[a] *Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia*
[b] *Murmansk Marine Biological Institute, Kola Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russia*
[#] *e-mail: matishov_ssc-ras@ssc-ras.ru*

The article presents the results of investigations conducted by the members of the SSC RAS on the Dolgaya Spit in 2019–2020. The data of satellite imagery, measurements of coastal currents, drilling of wells, study of malacofauna and determination of the absolute age of coastal sediments are analyzed. In accordance with the extention of the ancient longshore bars, the sequence of their connection to each other, six geomorphological generations are distinguished, reflecting the course of the Nymphaean and partly earlier transgressions. The data of radiocarbon dating of mollusk shells allows to suggest that the main part of the accumulative body of the spit was formed for one thousand years, in the interval of 2.5–1.5 thousand years ago. Based on the results of field observations, it was concluded that the currents velocity at the western coast of the spit is in 2–3 times higher than at the eastern one. A list including about 20 species and supraspecific taxon of shellfishes from the coastal sediments of the Dolgaya Spit is presented. It is noted that the main body (more than 90%) of the shell sediments composing the longshore bars are the valves of the *Cerastoderma glaucum* shells.

Keywords: The Azov Sea, the Dolgaya Spit, shore parallel sediment flows, sea currents, shell sediments, well, malacofauna taxonomic composition, *Cerastoderma glaucum*, longshore bars

УДК 551.3.051 : 551.35 : 551.795(262.54)
DOI: 10.7868/S25000640200304

НОВЫЕ ДАННЫЕ О СТРОЕНИИ КОСЫ ДОЛГОЙ АЗОВСКОГО МОРЯ (БУРЕНИЕ, ИССЛЕДОВАНИЕ ОБНАЖЕНИЙ, МАЛАКОФАУНА)[1]

© 2020 г. Академик Г.Г. Матишов[1, 2], В.В. Польшин[1],
В.В. Кулыгин[1], В.В. Титов[1], Е.П. Коваленко[1], К.С. Сушко[1]

Аннотация. Опубликованы результаты комплексной экспедиции, проводившейся на косе Долгой (Азовское море) в июле 2020 г. Представлены данные бурения по пяти скважинам, изучения обнажений в карьерах по добыче ракушечного сырья (в настоящее время добыча не ведется) и отложений островов, расположенных к северо-западу от дистальной оконечности косы, а также аэрофотосъемки с использованием беспилотного летательного аппарата. По результатам исследований выполнена ревизия ископаемой малакофауны из отложений карьеров и кернов из пробуренных скважин. Получены данные по литологии осадочной толщи косы Долгой до глубины 20–25 м. Проведена аэрофотосъемка для последующего составления ортофотопланов и цифровых моделей рельефа. В ходе анализа космических снимков сверхвысокого (субметрового) разрешения выделены разновозрастные генерации береговых валов, слагающих аккумулятивное тело косы. На отдельных участках изучены их параметры (ширина, высота, абсолютная высотная отметка гребня вала). В качестве индикаторов различий в строении поверхностного рельефа косы при дешифрировании аэро- и космоснимков учитывались геоботанические признаки. Проведено изучение почв на различных участках косы Долгой. Отмечена важная роль микрорельефа в формировании ее почвенного и растительного покрова.

Ключевые слова: коса Долгая, скважина, береговые валы, обнажения, отложения, малакофауна, модели рельефа, ракушечное сырье, датирование, аккумулятивное тело.

NEW DATA ON THE STRUCTURE OF THE DOLGAYA SPIT OF THE SEA OF AZOV (DRILLING, EXPLORATION OF OUTCROPS, MALACOFAUNA)

Academician RAS G.G. Matishov[1, 2], V.V. Polshin[1],
V.V. Kulygin[1], V.V. Titov[1], E.P. Kovalenko[1], K.S. Sushko[1]

Abstract. The article published the results of a complex expedition conducted on the Dolgaya Spit (the Sea of Azov) in July 2020. Data from drilling five wells, studying outcrops in shell quarries (currently there is no production) and deposits of islands located to the North-West of the distal tip of the spit, as well as aerial photography using UAVs are presented. Based on the research results, a revision of the fossil malacofauna from quarry deposits and cores from drilled wells was performed. Data on the lithology of the sedimentary strata of the Dolgaya Spit up to a depth of 20–25 m were obtained. Aerial photography was carried out for the subsequent compilation of orthophotoplans and digital terrain models. During the analysis of satellite images of ultra-high (sub-meter) resolution, different-age generations of coastal waves composing the accumulative body of the spit were identified. Their parameters (width, height, and absolute elevation of the shaft crest) were studied in individual sections. Geobotanical features were taken into account as indicators of differences in the structure of the surface topography of the spit when deciphering aerial and space images. The study of soils on various parts of the Dolgaya spit was carried out. The important role of microrelief in the formation of its soil and vegetation cover is noted.

Keywords: Dolgaya Spit, borehole, levee, outcrops, deposits, malacofauna, terrain models, shell raw materials, dating, accumulative body.

[1] Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: matishov_ssc-ras@ssc-ras.ru

[2] Мурманский морской биологический институт Российской академии наук (Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17

[1] **Оригинальный текст:** *Матишов Г.Г., Польшин В.В., Кулыгин В.В., Титов В.В., Коваленко Е.П., Сушко К.С.* Новые данные о строении косы Долгой Азовского моря (бурение, исследование обнажений, малакофауна) // Наука Юга России. 2020. Т. 16. № 3. С. 26–39.

ВВЕДЕНИЕ

Отличительной особенностью побережья Азовского моря является наличие кос и стрелок. Уникальной по своему происхождению и развитию представляется коса Долгая. Согласно классическим представлениям [1–3] коса характеризуется симметричностью относительно коренного берега и двусторонним питанием. Сохранились реликтовые аккумулятивные формы и лагуны, маркирующие древние стадии развития. На побережье в районе Ейска преобладают восточные ветры, но разгон волн невелик. Юго-западные ветры более редки, но, имея значительную длину разгона, возбуждают крупные волны. Таким образом, воздействие обеих систем волнений примерно одинаково. История развития косы Долгой самым тесным образом связана с происхождением расположенной южнее ракушечной банкой Ележиной. Она вытянута на запад и прослеживается в рельефе дна на глубинах 0,5–3 м. Корневые части кос Ележиной и Долгой примыкают к выступу Ейского полуострова.

Данная работа основана на результатах комплексной экспедиции в июле 2020 г., проведенной в трех частях косы Долгой: наземной – от станицы Должанской до дистальной оконечности косы; береговом склоне, граничащем с западным и восточным берегами косы; морской – островной гряде и прилегающей акватории (рис. 1). Работы планировались с учетом раннее полученных результатов [4] и космических снимков (Corona, Landsat, Sentinel), охватывающих период с 60-х гг. XX века до настоящего времени.

Решались следующие задачи: съемка районов косы Долгой при помощи беспилотного летательного аппарата «Phantom 3 PRO» для последующего составления ортофотопланов и цифровых моделей рельефа [5]; закладка контрольных точек геодезическим GNSS-приемником «EFT M4 GNSS» для фиксации точек бурения и привязки аэрофотосъемки; измерение поля течений с помощью доплеровского измерителя течений «Aanderaa RCM 9LW», укомплектованного датчиками температуры и солености; проведение буровых работ с отбором керна на различных участках косы Долгой с целью изучения ее геологического строения; отбор раковинного материала по вертикали вскрытых разрезов для определения радиоуглеродным методом абсолютного возраста береговых валов и биостратиграфических исследований.

На площади косы Долгой в соответствии с расположением разновозрастных береговых валов и

Рис. 1. Карта-схема полевых исследований, проводившихся на косе Долгой в июле 2020.

Fig. 1. Map-scheme of field research conducted on the Dolgaya Spit in July 2020.

лагун было выделено 5 геоморфологических районов (рис. 1). При сравнении разновременных космических снимков четко видно, что берег со стороны Таганрогского залива отступает, а со стороны Азовского моря является аккумулятивным. Береговая линия Таганрогского залива на косе Долгой срезает четыре генерации древних береговых валов, сориентированных на северо-восток (рис. 2).

В границах косы Долгой были выбраны участки для бурения скважин и исследования выходов ракушечных отложений в карьерах. Конкретную привязку к формам рельефа выполнили по мозаике космоснимков World Imagery Esri в субметровом разрешении (около 1 м). Только при таком масштабе проясняются береговые валы и детали рельефа. При дешифрировании космоснимков учитывались геоботанические признаки как индикаторы древних береговых валов (рис. 3). При реконструкции палеоэкологической обстановки мы опирались на результаты исследований литологии осадочных толщ и малакофауны, а также на данные результатов радиоуглеродного датирования раковин моллюсков.

БЕРЕГОВЫЕ ВАЛЫ НА КОСЕ ДОЛГОЙ

Коса Долгая, являясь барьером между Азовским морем и Таганрогским заливом, подвержена воздействию господствующих юго-западных и северо-восточных ветров. Протяженность косы по правому берегу составляет более 10 км, по левому – около 7 км. Ширина прикорневой части вдоль отмершего обрыва достигает 3,75 км [6]. В течение

Рис. 2. Пример срезания береговых валов современной береговой линией.
Fig. 2. An example of the shafts cutting by the modern coastal line.

длительного времени последовательное выдвижение берега сопровождалось образованием береговых валов. Их возникновение, по В.П. Зенковичу [1], происходит на глубинах 4–6 м. Согласованное субпараллельное причленение береговых валов отражает одну генерацию.

При проведении геоморфологических исследований мы исходили из следующих рекомендованных методических предпосылок [7]:

1. Направление берегового вала всегда соответствует направлению береговой линии на данном участке во время его образования.

2. Если береговые валы одной генерации срезаются валами другой, расположенной ближе к современному урезу, то валы второй генерации моложе по возрасту.

Рис. 3. Гребень древнего берегового вала, поросший травой.
Fig. 3. The crest of an ancient coastal levee overgrown with grass.

3. Резкое несовпадение простирания береговых валов разновозрастных систем свидетельствует о перерыве в нарастании и размыве аккумулятивной формы.

Поверхность косы Долгой представляет собой чередование валов и ложбин. Валы сложены ракушей и раковинным детритом. Максимальное превышение валов над уровнем моря до 1,5–2,1 м. Недавно сформированные валы в западной части косы достигают максимальной высоты. По мере продвижения к востоку их высота снижается. На западной стороне косы формируются новейшие образования с ориентацией на северо-запад. Современные и древние генерации валов стыкуются между собой под углом 90°.

На космических снимках виден ландшафтный рисунок косы, носящий сегментно-веерный характер [4; 6; 8–9]. Типично причленение друг к другу песчано-ракушечных валов и ложбинных понижений между ними. Дешифрирование космоснимков позволило провести предварительный подсчет количества береговых валов и их ориентацию (рис. 1). С целью проверки такой возможности инвентаризации валов и оценки качества дешифрирования проводился пеший маршрут для визуального (инструментального) картирования. Маршрут состоял из двух частей: восточной и западной (рис. 4).

Исключая незначительные перепады высот, на восточной части маршрута можно насчитать 34 вала (рис. 4, табл. 1). Средняя ширина вала составляет около 13 м. На расстоянии 350 и 360 м от начала восточной части маршрута расположены две глубокие канавы, имеющие антропогенное происхождение. Перепады глубин, связанные с этими канавами, игнорировались при расчете высотных характеристик валов. Перепад высот на всем маршруте составляет 1,1 м при средней высоте валов около 0,3 м. Разница в высотных отметках береговых валов сравнительно небольшая.

На подводном участке западной части маршрута на удалении 100 м от уреза воды глубина моря более 3,5 м. Свал глубин до −1,5 м происходит на первых 8 м от берега. Расстояние от уреза воды до вершины берегового вала составляет 35 м. Превышение берегового вала над урезом воды равно 2,3 м (абсолютная отметка 2,1 м Балтийской системы высот (БСВ)). За береговым валом следует широкая полоса (115 м) рекреационной зоны, после которой начинаются древние береговые валы. На отрезке

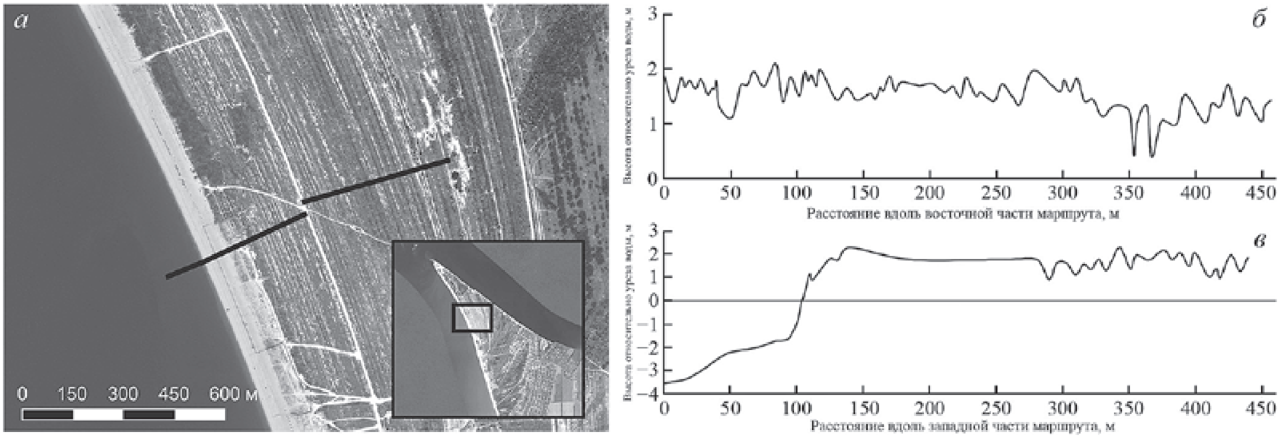


Рис. 4. Изучение береговых валов косы Долгой (июль 2020): *а* – схема маршрута; *б* – профиль рельефа восточной части маршрута; *в* – профиль рельефа западной части маршрута.

Fig. 4. Studies of coastal levees of the Dolgaya Spit (July, 2020): *а* – route diagram; *б* – terrain profile of the eastern part of the route; *в* – terrain profile of the western part of the route.

протяженностью 140 м в общей сложности насчитывается 10 валов (табл. 1). Перепад высот составляет 1,4 м при средней высоте валов около 0,7 м.

Важную часть исследований составило геоботаническое дешифрирование космоснимков. Визуальный осмотр в ходе выполнения маршрута позволил установить, что темные полосы на снимках относятся к задернованной ракуше, а светлые – к ракуше, свободной от растительности. Каждый тип полосы может приходиться как на гребень вала, так и на понижение между валами. Таким образом, в данном случае растительность не позволяет однозначно выделять линейные элементы рельефа. Данных аэрофотосъемки недостаточно для качественной идентификации валов, так как дешифрирование затруднено задернованностью исследуемого участка косы, большим количеством карьеров и водосмов в этом районе.

На косе Долгой в завершающую стадию ее формирования аккумулятивные дуги выстраивались в северо-западном направлении как результат воздействия южных ветровых течений и вдольбереговых потоков наносов. Возникшие ранее валы на востоке косы активно срезались ветрами и течениями из Таганрогского залива. При двустороннем питании происходило выдвижение оконечности косы в открытое море. Детритусовым пескам свойственна однонаправленная косая слоистость.

При картировании на местности рельефа косы Долгой с учетом космоснимков выясняется, что высоты и контуры береговых валов меняются с удалением от современной береговой линии и вдоль их простирания. Эти изменения отражают как условия их образования, так и их последующую трансформацию экзогенными и антропогенными процессами. В частности, происходило последовательное надвигание береговых валов и отчленение целого ряда лагун в прикорневой зоне косы Долгой.

Весь восточный берег подвержен размыву. Геоморфологический анализ четко выявляет срезание (несогласие) современной береговой линией целого ряда генераций позднеголоценовых береговых элементов (рис. 2). На прикорневом участке, у мыса Обрыв, с 1985 по 2005 г. берег косы отступил на 30 м, а за последующие 10 лет по меньшей мере еще на 10–12 м [6; 8]; на участке «Севкавдор» с 1997 по 2011 г. – на 47 м, а в зоне низового размыва бывшего ракушечного цеха с 1985 по 2011 г. – на 50 м. В районе старого маяка и на окраине «Серфприюта» темпы волнового разрушения восточного берега сокращаются до минимальных значений. За период с 1985 по 2008 г. берег косы со стороны Таганрогского залива под действием волнения суммарно отступил не более чем на 5–10 м [6; 8].

ЛАГУНЫ, ПОЧВЫ И КАРЬЕРЫ

Для прикорневой части косы Долгой характерна система лагун (рис. 5). Обрамляющие их береговые валы во многих местах были прорваны, что повлекло за собой затопление лагун. Влияние моря посредством попадания морской воды в лагуны обеспечивало образование солонцов и солончаков.

Почвы косы Долгой молодые, маломощные, с плохо сформированным профилем [9]. Ярко выражена мозаичность разных типов почв. Основные типы – автоморфные, бедные гумусом солонцеватые светло-каштановые и солонцеватые бурые пустын-

Таблица 1. Параметры береговых валов косы Долгой
Table 1. Parameters of the Dolgaya Spit coastal levees

Участок Region	Номер вала Shaft number	Высота, м Height, m	Ширина, м Width, m	Абсолютная высотная отметка гребня вала, м БСВ The absolute elevation of the crest of the shaft, m BHS
Восточная часть маршрута Eastern part of the route	1	0,5	6,6	1,63
	2	0,4	9,2	1,59
	3	0,2	7,9	1,55
	4	0,3	9,0	1,57
	5	0,7	18,6	1,54
	6	0,6	11,2	1,46
	7	0,3	12,7	1,70
	8	0,7	14,1	1,85
	9	0,4	12,6	1,61
	10	0,4	6,7	1,70
	11	0,2	6,1	1,64
	12	0,5	14,9	1,74
	13	0,2	15,2	1,40
	14	0,1	14,2	1,30
	15	0,2	5,7	1,42
	16	0,3	9,3	1,62
	17	0,2	17,8	1,52
	18	0,2	19,4	1,49
	19	0,2	11,9	1,43
	20	0,4	11,1	1,60
	21	0,2	14,1	1,33
	22	0,4	19,2	1,48
	23	0,6	29,3	1,72
	24	0,2	8,4	1,55
	25	0,4	11,1	1,58
	26	0,3	13,5	1,20
	27	0,2	20,5	1,09
	28	0,3	10,9	1,08
	29	0,1	12,1	0,82
	30	0,5	21,2	1,29
	31	0,3	11,6	1,13
	32	0,6	13,2	1,47
	33	0,4	17,4	1,24
	34	0,1	7,2	1,18
	Среднее значение Average	0,3	13,1	1,46
Западная часть маршрута Western part of the route	1	0,7	19,9	1,35
	2	0,4	12,0	1,32
	3	0,5	11,7	1,54
	4	1,0	17,7	2,04
	5	0,6	13,8	1,73
	6	0,4	17,4	1,94
	7	0,6	12,8	1,82
	8	1,0	14,4	1,81
	9	0,4	9,1	1,13
	10	1,0	14,7	1,71
	Среднее значение Average	0,7	14,3	1,64

Рис. 5. Лагуны на косе Долгой.
Fig. 5. Lagoons on the Dolgaya Spit.

но-степные почвы. Скорость формирования гумусового налета в среднем достигает 0,05–0,1 мм/год.

В районе лагун почвы косы Долгой обладают следующими признаками: формирование в аккумулятивных ландшафтах, участие в почвообразовании водорастворимых солей, в том числе из почвообразующих пород и сильноминерализованных грунтовых вод. Это отражается на pH водной вытяжки, наличии сухого остатка, а также на содержании катионов и анионов в почвах. Промывной характер образования почв не отмечен, так как воздействие морских вод при затоплении локально и кратковременно.

Поверхность почвы в районах лагун местами голая, с пятнами солероса европейского, солянки обыкновенной и крестовника крупнозубчатого (недалеко от дороги заросли тамарикса). Солевая корка маломощная, в виде пятен диаметром от 15 до 45 см. Отмечены признаки сульфатредукции (характерный запах от прикопок на высохшей поверхности лагуны). Два разреза располагались примерно в 30 м по обе стороны от дороги на обсохшей части лагуны. Ниже почвы расположен свежий оглеенный горизонт с сизоватостью, выделением гипса и карбонатов. С горизонта 50 см влажность усиливается, и на глубине 75 см появляются безнапорные воды.

В формировании почвенного и растительного покрова отмечена важная роль микрорельефа, который способствует локализации участков с различными температурно-влажностными качествами. Генерализованная ориентация ландшафтного рисунка на спутниковых снимках позволяет говорить об истории развития косы. Однако получение детальной информации затруднительно вследствие ведущейся здесь хозяйственной деятельности (выравнивание участков земли, рытье карьеров, посадка деревьев и кустарников и т.д.). На территории прикорневой части косы Долгой сохранились фрагменты искусственного хвойно-лиственного леса (сосна, лох узколистный, тополь серебристый, гледичия).

Промышленное изъятие песчано-ракушечного материала из карьера на оконечности косы начато в 1956 г. Разработки велись в пределах участка внешней отмели с координатами 46°44′6″ с.ш., 37°37′13″ в.д. Ейским рыбзаводом. Добыча продолжалась вплоть до 1973 г. Всего этим предприятием за период 1956–1970 гг. было изъято 1,451 млн т ракуши и ракушечного детрита [6].

ГРЯДА БЕЗЫМЯННЫХ ОСТРОВОВ И ОТМЕЛЕЙ

Гряда безымянных островов и отмелей протянулась на 12 км к северо-западу от косы Долгой. В литературе нет описаний данного заметного аккумулятивного образования. В экспедиции выполнен пеший и водный (на маломерном судне) осмотр, проведена панорамная фотосъемка, а также заложен шурф на острове, ближайшем к оконечности косы Долгой. Островная гряда возвышается над уровнем моря не более чем на 1–2,5 м. Численность песчаных островов (у одного из них координаты 46°44′13″ с.ш. и 37°37′52″ в.д.) постоянно изменяется от 15 до 20 в зависимости от штормовых сгонно-нагонных явлений. Эти острова могут выходить на поверхность моря (осушаться) при сгонах воды.

Три самых возвышающихся (на 1–2 м) острова имеют длину до 1 км. Встречаются отдельные бугры до 3 м. На островах намыто до 6–9 береговых валов. Они вогнуты (намыты) волнами из Азовского моря. Встречаются террасы шириной до 20 м. Сложены острова ракушечным детритом и целыми створками раковин. При исследовании одного из островов отобрана колонка с использованием ручного почвенного бура глубиной 1,6 м. Место отбора керна на вершине берегового вала расположено в 17 м от уреза воды с западной окраины острова. Его высота над уровнем моря около 1,4 м.

Образцы отбирались послойно через каждые 0,2 м. Пробы представлены раковинами моллюсков, ракушечным детритом и ракушечным детритусовым песком при небольшом содержании илистых песков. По профилю отмечается изменение гранулометрического состава и влажности отложений. Доля частиц крупнее 1 мм вниз по профилю снижается. В интервале 0–0,7 м их содержание в отложениях превышает 20 %. С отметки 1,15 м отмечается увеличение содержания частиц алевритовой и пелитовой размерности. Это объясняется тем, что отложения обладают разной гидравлической крупностью, твердостью и удельным весом и литодинамикой, что влияет на длительность переноса и условия захоронения. Именно раковинный детрит и крупные створки раковин являются основой для формирования уплотненной ветроустойчивой поверхности островов.

Гранулометрический анализ с использованием сит и осмотр показали, что фракции крупнее 0,25 мм полностью представлены раковинным детритом. Частицы размером от 0,125 до 0,25 мм являются тонкими пластинками детрита, которые, в отличие от минеральных зерен, содержащихся в песчаных отложениях, могут плавать в водном потоке и переноситься на большие расстояния. Вертикальную дифференциацию имеет также полевая влажность отложений. Наиболее увлажнены горизонты 35–75 см, ниже по профилю влажность уменьшается.

Характерный надводно-подводный выступ оконтуривается изобатой 5 м и вытянут на северо-запад от оконечности (дистали) косы Долгой. Именно на этом выступе рельефа дна постоянно при активизации гидродинамических и абразионно-аккумулятивных процессов возникают, исчезают, мигрируют мели и песчаные банки. Во время ураганных нагонов, таких как в 2007, 2017 гг., вместе с повышением уровня моря берега кос подверглись воздействию громадных по меркам Азовского моря штормовых волн. Литодинамику определяют штормовые ветры западных румбов. Результирующий вектор (перенос) взвеси направлен к станице Воронцовка. На космоснимках отчетливо заметны характерные течения (водотоки при ветрах из Таганрогского залива), прорывающиеся по ложбинам на островной гряде.

В обозреваемом прошлом и до второй половины XX века острова были обитаемыми, здесь присутствовали рыбацкие фактории и хранилища хамсы. В результате ураганных нагонных волн осенью 2014 г. и более ранних штормов все рыбацкие строения были размыты. Свидетелями былых цивилизаций являются многочисленные артефакты: обломки глиняных кувшинов, металлических предметов, старые монеты [10]. В данный момент острова безлюдны, на них обитают в большом количестве (десятки тысяч) колониальные птицы, в основном большой баклан.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ РАБОТЫ. БУРЕНИЕ

За всю историю геологического изучения косы Долгой не было произведено описание осадочных толщ в песчаных карьерах, не выполнялось целенаправленное бурение. В 2019 г. Южный научный центр Российской академии наук (ЮНЦ РАН) провел буровые работы и обследовал вскрытые выходы отложений. Были пробурены 2 скважины глубиной 10,92 м (скважина 1: 46°38′22″ с.ш., 37°46′54″ в.д.) и 11 м (скважина 2: 46°40′36″ с.ш., 37°44′50″ в.д.), а также изучены 5 обнажений в центральной и северной частях косы Долгой [4]. Данные бурения показали, что верхняя часть ракушечной толщи (0,2–0,3 м) уплотнена, а средняя сильно обводнена. Уровень безнапорных грунтовых вод в районе бурения приурочен к средней части ракушечной толщи и находится на отметке 1,5–2 м. В ракушечных отложениях по вертикали разреза отмечается существенное преобладание створок раковин и детрита моллюсков *Cerastoderma* Poli, 1795 (более 95 %). В значительно меньшем количестве (от 1 до 10 %) в ракушечных отложениях встречены обломки плохой сохранности других видов: *Bittium reticulatium* (da Costa, 1778), *Tritia* sp., *Mya* sp. и Gastropoda.

Нижележащие осадочные горизонты вскрыты двумя скважинами, расположенными на расстоянии 5 км друг от друга. Под ракушечными наносами прослеживается слой глинистого песка с прослоями глины серого цвета. Мощность этих отложений в изученных разрезах не превышает 0,5 м. Ниже залегают суглинки и глины, которые прослеживаются в разрезе до глубины 11 м.

В 2020 г. было пробурено пять скважин с отбором керна: в корневой, центральной и дистальной частях. Бурение осуществлялось колонковым методом. Глубина скважин: 1 – 19,4 м; 2 – 26,5 м; 3 – 25,5 м; 4 – 20 м; 5 – 21,5 м (рис. 6). Точки бурения размещены в соответствии с пятью предварительно обозначенными геоморфологическими районами. Конкретные их местоположения следующие: скважина 1 – верхняя терраса косы в 50 м от обрывов коренного берега (рис. 7); скважина 2 – на осушке лагуны; скважины 3 и 4 – на двух древних береговых валах (46°38′49″ с.ш., 37°46′35″ в.д. и 46°39′34″ с.ш. и 37°45′37″ в.д. соответственно); скважина 5 – на дистальном окончании косы (рис. 7). Учитывалось расположение ранее пробуренных скважин. В скважине 3 с горизонта 520–280 м отобраны образцы раковин моллюсков для радиоуглеродного анализа.

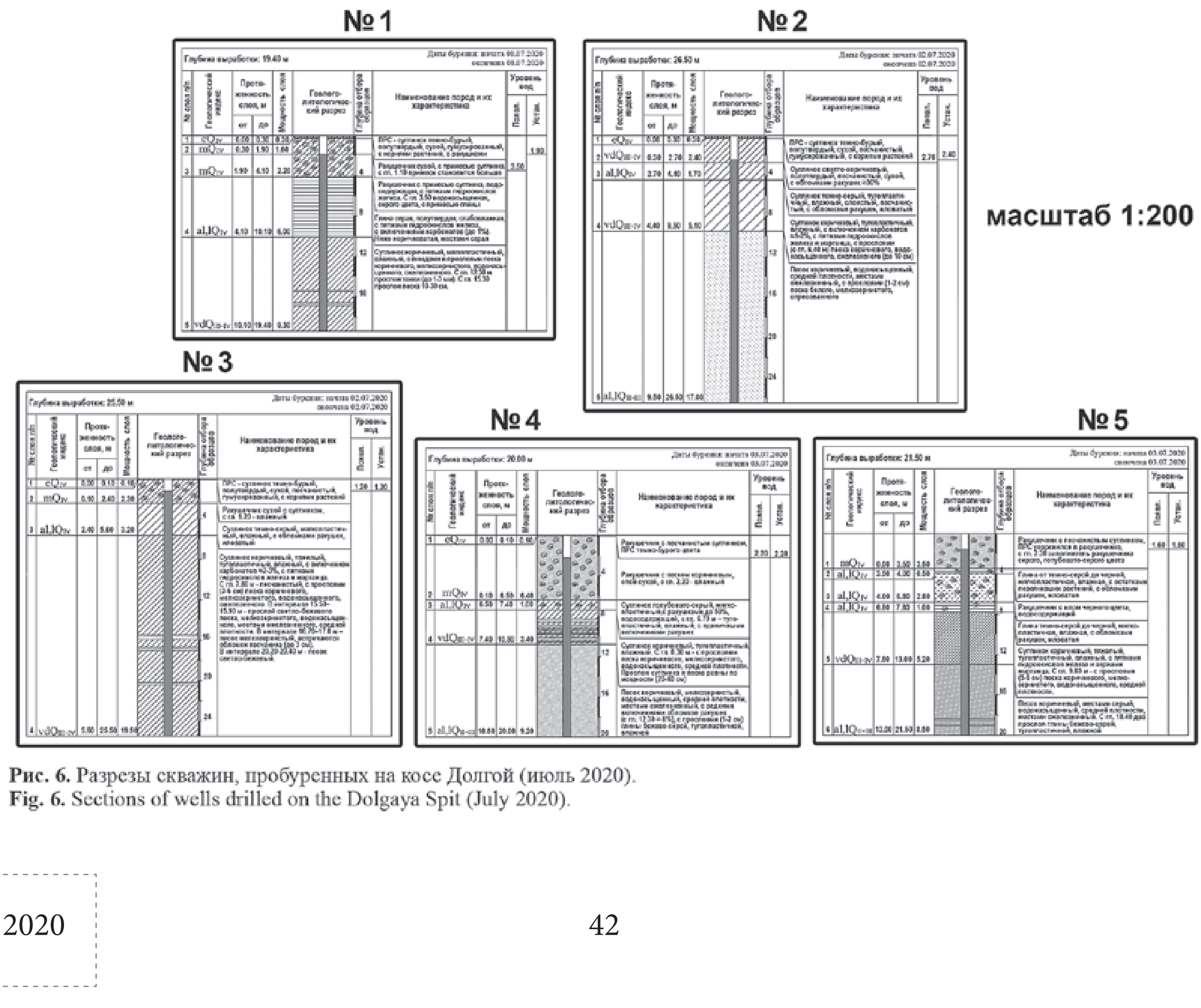


Рис. 6. Разрезы скважин, пробуренных на косе Долгой (июль 2020).
Fig. 6. Sections of wells drilled on the Dolgaya Spit (July 2020).

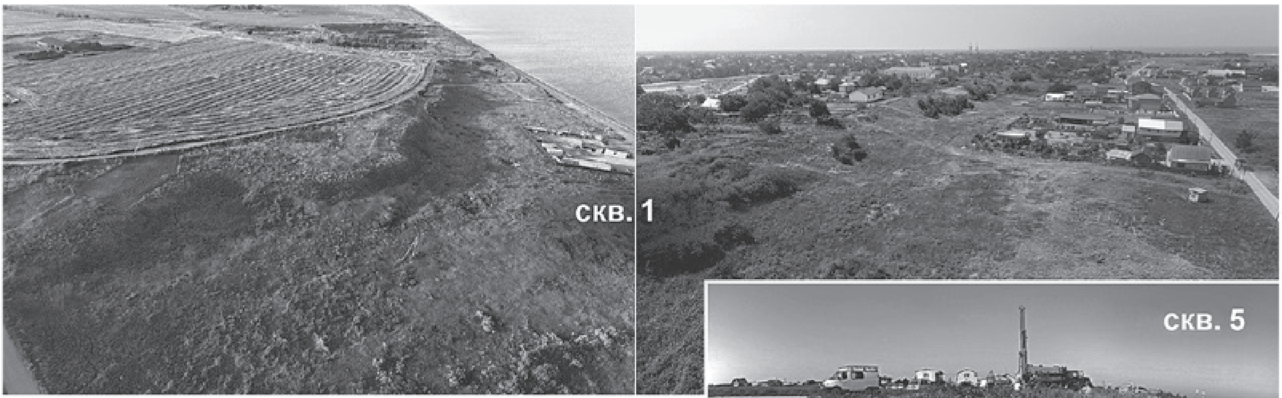


Рис. 7. Районы расположения буровых скважин 1 и 5.
Fig. 7. Areas where drilling wells 1 and 5 are located.

Вскрытая скважинами верхняя часть отложений косы Долгой повсеместно сложена ракушечным материалом с примесью глины и суглинка. Мощность отложений из ракуши увеличивается от корневой к дистальной части косы от 4 до 7 м. В ракушечных отложениях по вертикали разреза отмечается существенное преобладание створок раковин и детрита моллюсков рода *Cerastoderma.* Значительно реже отмечаются *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819, *Chamelea gallina* (Linnaeus, 1758), *Abra* sp., *Gastrana fragilis* (Linnaeus, 1758) и раковины *Rissoa* sp. Цвет ракушечного горизонта изменяется по вертикали разреза от белого и светло-желтого (в верхней части) до коричневого и серого (в средней) и до серо-черного (в нижней части) (рис. 8).

Рис. 8. Ракушечные отложения косы Долгой.
Fig. 8. Shell deposits of the Dolgaya Spit.

Верхняя часть ракушечной толщи уплотнена, а средняя сильно обводнена. Уровень безнапорных грунтовых вод приурочен к средней части ракушечной толщи и повышается от корневой к дистальной части косы: в скважине 1 – 3,5 м; в скважине 5 – 1,6 м. По всей площади косы под ракушечными наносами с прослоями иловатой глины и суглинка прослеживаются коричневые тугопластичные суглинки с включениями гидроокислов Fe, Mn и карбонатов. Местами в суглинках отмечаются прослои мелкозернистого ожелезненного обводненного песка. В нижней части разрезов скважинами 2, 4 и 5 вскрыты обводненные мелкозернистые пески коричневого цвета. Отмечено ожелезнение песчаных зерен по поверхности, редкие прослои тугопластичной глины, а также включения раковинного материала. Его содержание составляло 10 % от объема отобранной пробы (скважина 4). В песках массово отмечаются раковины моллюсков пресноводной фауны предположительно плейстоценового возраста: *Viviparus* sp., *Lithoglyphus* sp., *Planorbis* sp., *Dreissena* sp., *Theodoxus* sp., а также морские моллюски *Bittium* sp., *Cerastoderma* sp. и *Abra* sp.

МАЛАКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Азовское море на 30 % представлено мелководьями с глубинами до 3 м. Все аккумулятивные формы созданы или целиком из раковин моллюсков, или последние образуют их важную составную часть. Причина лежит в исключительной продуктивности Азовского бассейна [11]. Общая годовая продукция зообентоса в Азовском море оценивается в 19–20 млн т, то есть до 2 кг/м^2. По биомассе преобладает *Cerastoderma lamarcki* (Reeve, 1845) с продуктивностью 13–14 млн т в год [12].

В экспедиции отобран ракушечный материал из 8 обнажений, расположенных в карьерах по добыче ракушечного сырья. Мощность вскрытых разрезов от 1,7 до 2,5 м. Отбор проб производился послойно, с описанием видовой принадлежности, степени сохранности и фотодокументацией. Частично описаны пробы раковинных отложений из кернов скважин, отобранных в различных районах косы Долгой.

В карьере № 2 в северной части косы было обследовано обнажение, сложенное раковинным материалом, мощностью 2,2 м. В основании стенки обнажения отложения сильно обводнены (стоит вода). Ракуша залегает слоями. Чередуются слои с преобладанием целых крупных створок, преимущественно представителей рода *Cerastoderma*, с прослоями раковинного детрита мощностью 0,15–0,2 м различной степени сохранности. С глубины 1,4–1,5 м во вскрытом разрезе отмечались более крупные раковины доминирующего вида моллюска рода *Cerastoderma*. Ракуша до глубины 2 м плотная, спрессованная, имеет желто-серую окраску. Ниже уровня воды, на глубине 2,2 м, ракуша имеет серый оттенок и преимущественно присутствует в виде детрита.

При первичном исследовании кроме раковин *Cerastoderma* sp. в данном месте были обнаружены единичные раковины брюхоногих моллюсков *Theodoxus* sp., *Bittium reticulatum*, *Tritia* sp. В интервале 0–1 м от дневной поверхности собраны целые створки *Chamelea gallina*, залегающие в виде прослоев мощностью до 0,05 м на глубинах 0,25 и 0,4 м. В описываемом интервале (0–1 м) также были встречены раковины *Chamelea gallina*, *Theodoxus* sp., *Solen vagina* Linnaeus, 1758, разрушенные раковины *Bittium* sp., *Tritia* sp., обломок створки Pholadidae и сильно разрушенные обломки Mytilidae. Проба, отобранная в основании обнажения у уреза воды, имеет черную окраску и характерный запах сероводорода.

Мощность ракушечного горизонта от дневной поверхности до уровня грунтовых вод в северной части карьера № 1, расположенного несколько южнее предыдущего, составляла 1,8 м. На глубинах 0,4 и 1,1 м четко прослеживались два слоя, сложенные преимущественно хорошо сохранившимися створками раковин *Cerastoderma* sp. С глубины 1,1 м в отложениях отмечаются раковины *Tritia* sp. С глубины 1,2 м встречаются обломки и целые створки *Abra* sp., *Solen* sp., *Tritia* sp.

В южной части карьера № 1 было послойно исследовано обнажение, мощность которого составляет 2,5 м. Визуально вся толща однородна, без выраженной слоистости. Преобладают целые створки и обломки раковин *Cerastoderma* sp., встречаются раковины *Bittium reticulatum*. Ракуша окрашена в желто-серый цвет, присутствуют примесь ила и раковины наземных моллюсков. Ниже уровня грунтовых вод расположен слой ракуши, окрашенной в серый цвет. Проба, отобранная со дна водоема в 0,5 м от уреза воды с глубины 0,15–0,2 м, представлена ракушей черного цвета. Отмечается характерный запах сероводорода.

В обнажениях, являющихся стенками искусственных водоемов, находящихся на территории частного подворья в станице Должанской, прослеживаются те же закономерности –доминирующим видом является *Cerastoderma* sp., отмечаются прослои из ракушечного детрита. В поверхностном горизонте встречаются целые створки моллюска *Mya arenaria* Linnaeus, 1758, недавнего обитателя Азово-Черноморского бассейна, а в слоях глубже 1,5 м отмечены хорошо сохранившиеся створки раковин *Abra* sp.

При исследовании обнажений ракуши в центральной части косы пробы отобраны в двух точках. Разрезы схожи. Вся толща ракушечных отложений сложена целыми и мало разрушенными створками раковин *Cerastoderma* sp. с примесью песчано-илистых частиц. В верхней части толщи отмечается переслаивание целых створок с маломощными прослойками, в составе которых преобладает детрит. К основанию толщи количество и мощность детритовых прослоев сокращается. Створки *Cerastoderma* имеют разный размер и толщину. В основании расчистки встречаются крупные створки *Chamelea gallina*. В различных интервалах были встречены *Barnea candida* (Linnaeus, 1758), *Abra* sp., *Bittium* sp., *Tritia* sp., *Rissoa* sp. и *Theodoxus* sp.

Раковинный материал также отбирали на крупной банке островной гряды вблизи оконечности косы. В пробе преобладают створки недавнего вселенца – *Mya arenaria*. Также здесь зарегистрированы *Cerastoderma* sp., *Solen vagina*, *Gastrana fragilis*, *Chamelea gallina*, *Mytilus galloprovincialis*, *Bittium* sp., *Hydrobia* sp., свежая раковина *Viviparus viviparus* (Linnaeus, 1758). На отдельных створках отмечены раковины рака *Amphibalanus improvisus* (Darwin, 1854).

Образцы, отобранные из стенки обрыва на одном из островов косы Долгой (координаты отбора пробы: 46°44′15″ с.ш., 37°37′52″ в.д.), в основном сложены из створок *Cerastoderma* sp. (раковины в хорошем состоянии, сохранена окраска). В меньшем количестве встречаются отдельные створки и целые скрепленные раковины *Mytilaster lineatus* (Gmelin, 1791). Также в пробе много створок моллюсков-вселенцев *Mya arenaria* и *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906), впервые отмеченных в Азовском море в середине прошлого века. Сохранившиеся раковины, скрепленные створки мидий, наличие в пробе недавних вселенцев позволяют предположить, что мы имеем дело с молодым, современным материалом.

Предварительный анализ разрезов позволяет выявить 3–4 стадии накопления видимой (2–2,5 м) толщи ракушечных отложений, слагающих аккумулятивное тело косы. В основном в отобранных пробах раковинного материала преобладают створки раковин моллюска *Cerastoderma* sp. различной степени сохранности. Виды рода *Cerastoderma*, обитающие в настоящее время в Азово-Черноморском бассейне, эвригалинны, выносят опреснение до 5 ‰. Помимо них встречены раковины других моллюсков, способных обитать в условиях разной степени опреснения (*Mytilus galloprovincialis*, *Abra segmentum* (Récluz, 1843), *Hydrobia* sp.). При этом в ряде прослоев (чаще в верхней части разрезов) зарегистрированы раковины пресноводного и солоноватоводного моллюска рода *Theodoxus* Montfort, 1810, живущего при солености не более 5–7 ‰. Присутствие этой гастроподы указывает на периодический заток пресных вод [13].

О возможных периодах осолонения свидетельствуют слои створок морских видов *Chamelea gallina* и *Gastrana fragilis*. В настоящее время они обитают в Черном море. Наличие в отложениях раковин моллюска *Barnea candida*, поселяющегося на каменистом грунте, может указывать на мелководные условия и близость береговой зоны [14]. В верхней части некоторых разрезов встречены также раковины моллюска-вселенца *Mya arenaria*, появившегося в Азовском море в середине XX века.

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ КОСЫ ДОЛГОЙ

Из анализа литературных источников [3; 6; 8; 10; 12; 15–18] и данных ЮНЦ РАН с учетом палеогеографической роли косы Долгой следует вывод о сложной периодичности и этапности формирования Азовского моря.

«Меотийское озеро» (3,1–2,5 тыс. л. н.) в условиях фанагорийской регрессии (в VII–II веках до н. э.) было окружено осушенным азовским шельфом. Наличие древней суши подтверждается нахождением следов античных цивилизаций ниже современного уровня моря. Артефакты отмечены в ракушечных отложениях Песчаных островов (центральная часть Таганрогского залива), на пляжах косы Долгой, к северу от побережий Керченского и Таманского полуостровов [10]. К I веку н. э. Меотида уже представляла собой больше, чем «Меотийское озеро» в VII–VI веках до н. э.

Возникновение и развитие кос азовского типа происходило в период последовательного затопления азовского шельфа и заполнения водой долины Палео-Дона. За период голоценовых трансгрессий берега Азовского моря, в частности Таганрогского залива, были срезаны абразией с обеих сторон на 1–5 км [19]. Древнеазовская трансгрессия (8–3,1 тыс. л. н.) на пике своего развития 6–4 тыс. л. н. соотносится с климатическим оптимумом голоцена. Черноморская адвекция «проталкивала» азовские воды вверх по Дону. Такого рода затоки подтверждают формирование дельты Дона и кос Азовского моря в условиях максимума новочерноморской (4–6 тыс. л. н.) и нимфейской (2,4–1,5 тыс. л. н.) трансгрессий.

Анализ геологического строения косы Долгой на основе бурения и данных радиоуглеродных датировок [6] позволяет заключить, что основной рельеф образовался в течение нимфейской трансгрессии. По некоторым данным, возраст образования ракушечных валов в корневой части косы превышает 6 тыс. л. [6]. В данный момент новые валы непрерывно формируются на западном побережье. Поскольку отмель косы Долгая играет роль барьера на входе в Таганрогский залив, у ее оконечности возникают штормовые течения, скорость которых может достигать 1–1,5 м/с [6]. Такой силы водотоки способствуют активному размыву песчаных аккумулятивных тел (рис. 9).

Серии крупных древних береговых валов, последовательно причленяющихся друг к другу, сгруппированы в 5–6 генераций (рис. 1). Безусловно, такие аккумулятивные формы надводно-подводного рельефа отражают осцилляции нимфейской трансгрессии.

Можно условно обозначить 6 стадий развития косы Долгой:

Первая стадия – прикорневая терраса вдоль обрыва (до 12–16 м) коренного берега, по возрасту самая ранняя, вероятно, 7–6 тыс. л. н.

Вторая стадия – стадия лиманов и лагун. В современном рельефе косы Долгой лагуны выражены множеством вытянутых впадин. Абсолютное превышение перемычек, разделяющих лагуны, составляет 0,6–0,8 м БСВ. Лагуны и их перемычки возникли при низком стоянии уровня Азовского моря. В периоды высокого стояния уровня и в условиях сильных западных штормов эта часть косы затапливается, что было зафиксировано в 1914, 1960, 1969, 1970 гг. В условиях же низкого стояния уровня моря лагуны полностью осушались, давая толчок к возникновению сплошной красно-зеленой растительной пленки [8].

Третья и *четвертая стадии* развития береговых валов (рис. 1) отражают разные фазы нимфейской трансгрессии (2,4–1,5 тыс. л. н.). Абсолютный возраст (C^{14}) раковин моллюсков в ракушечных валах составил 1670–2300 лет [5]. Серия валов третьей и четвертой стадий срезается древней береговой линией. Формируясь во второй половине голоцена у Ейского полуострова (выступа), коса Долгая была гораздо короче и не являлась стрелкой в геоморфологическом смысле.

Пятая стадия развития косы Долгой относится к историческому времени (0,5–0,1 тыс. л. н.). В это время она развивалась как коса-стрелка (рис. 9).

Шестая стадия – современная динамика развития косы. С 1890 по 2000 г. прослеживалась устойчивая тенденция уменьшения длины оконечности косы. Интенсивно этот процесс происходил с 1890 по 1958 г. – на 1,35 км [6]. За период с 1964 по 1966 г. оконечность отступила на юг на 0,75 км, а за период с 2006 по февраль 2016 г. берег у базы «Серфприют» отступил на 50–60 м. При бурении в 2002 г. на глубине 4–5 м были обнаружены лиманно-лагунные отложения с сильным запахом сероводорода.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ ГОЛОЦЕНА

Анализ следующей информации: данных бурения и определения абсолютного возраста по C^{14}

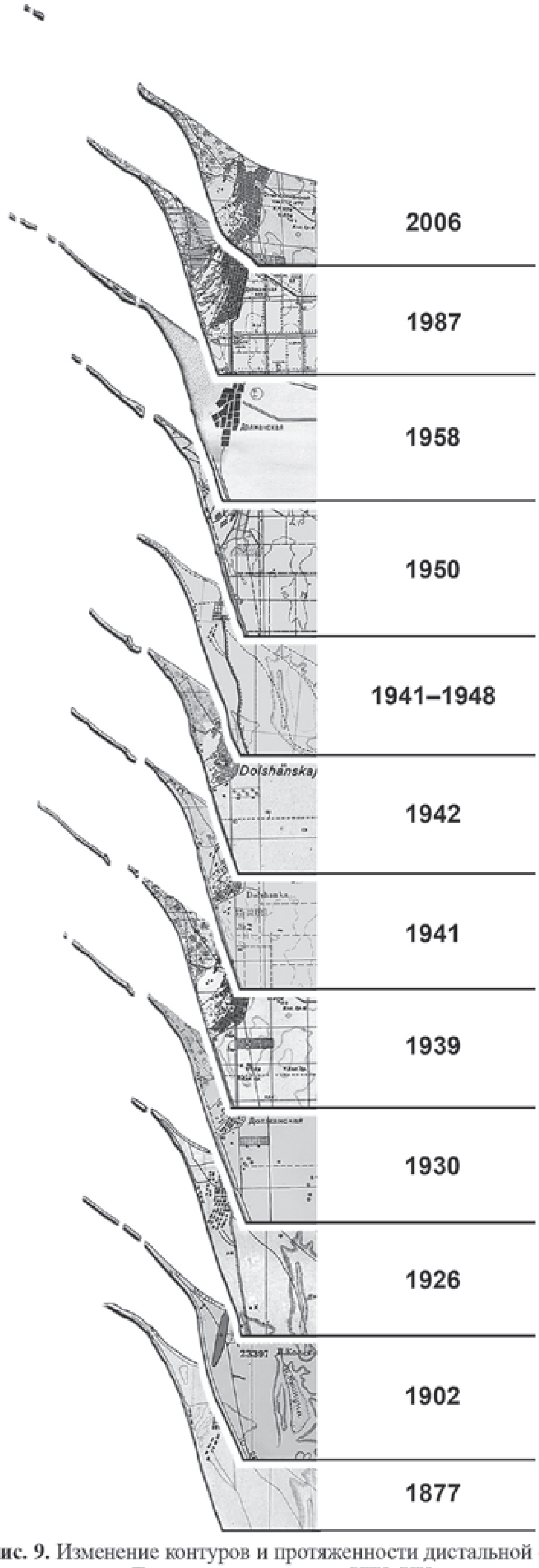


Рис. 9. Изменение контуров и протяженности дистальной оконечности косы Долгой на протяжении XIX–XX веков.
Fig. 9. Changes in the contours and length of the distal tip of Dolgaya Spit during the 19th and 20th centuries.

(по створкам моллюсков), топографических карт XIX–XX веков, космоснимков и фотодокументов, визуальных наблюдений с середины прошлого века – позволяет выявить некоторые общие литодинамические и палеоокеанологические закономерности. По всей видимости, в голоцене процессы седиментогенеза на косе Долгой и ее надводно-подводном продолжении были взаимосвязаны с климатическими циклами.

Аккумулятивный рельеф косы Долгой, созданный вдольбереговым потоком наносов, вещественный состав и стадийность древних береговых валов являются отличительным индикатором геоморфологической истории Азовского моря. В связи с высокой задернованностью исследуемого участка косы построение цифровых моделей рельефа на основе съемки с беспилотных летательных аппаратов пока затруднительно. Известно, что для территорий с растительным покровом цифровая модель строится по среднему уровню растительности, что выражается увеличением высотной отметки. А поскольку перепад микрорельефа (рис. 4) соизмерим с перепадом высот растительного покрова (высота 0,2–0,5 м), то погрешность будет значительная. Некоторые валы и понижения между ними приходятся на посадки кустарников шиповника высотой 1,5–2 м. Устранение подобных погрешностей весьма затруднительно и может быть выполнено только при наличии измерений на местности отметок высот. Построение цифровой модели рельефа приемлемого качества возможно для участков косы с разреженным растительным покровом (прибрежная часть) при проведении весенних съемок.

Выполнена ревизия ископаемой малакофауны из обнажений в карьерах на косе, из кернов, отобранных при бурении на береговых валах Долгой, а также из грунтовых колонок, взятых на азовском шельфе. В ходе работы составлен каталог видов моллюсков, обнаруженных в карьерах на косе Долгой. В совокупности сложилась согласованная картина расположения разных генераций валов в трех измерениях. Теперь предстоит выяснить, какие процессы начиная с 7 тыс. л. н. и до наших дней доминировали в каждом временнóм промежутке между образованием валов и каковы были средние скорости этих процессов.

Сочетание пяти генераций реликтовых береговых валов с их общим количеством порядка 150, залежи ракушняка и ракушечного детрита, видовое разнообразие моллюсков, господство среди видов зообентоса *Cerastoderma* sp., для которых установлены радиоуглеродные датировки, в совокупности приоткрывают неизвестные черты палеогеографии Азовского моря в голоцене, роль гляциоизостатических колебаний уровня Мирового океана в Азово-Черноморском бассейне.

Г.Г. Матишовым публикация подготовлена в рамках реализации гранта РНФ № 20-17-00196.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зенкович В.П. 1958. *Берега Черного и Азовского морей*. М., Географгиз: 374 с.
2. Панов Д.Г., Спичак М.К. 1961. Об условиях осадконакопления в Азовском море. В кн.: *Современные осадки морей и океанов*. М., изд-во АН СССР: 512–520.
3. Мамыкина В.А., Хрусталев Ю.П. 1980. *Береговая зона Азовского моря*. Ростов н/Д, изд-во РГУ: 176 с.
4. Матишов Г.Г., Польшин В.В., Титов В.В. 2020. Исследования отложений кос Азовского моря (на примере косы Долгой). *Океанология*. 60(1): 158–161. doi: 10.31857/S0030157420010165
5. Зуев Н.А., Кобзев А.А. 2017. Возможности применения аэрофотосъемки с БАС для комплексных кадастровых работ. *Геопрофи*. 4: 11–15.
6. Артюхин Ю.В., Артюхина О.И., Родионова Н.Б. 2015. *Ейское морское побережье: история и проблемы освоения, природные основы реконструкции*. Ейск, Фонд науки и образования: 205 с.
7. Леонтьев О.К., Сафьянов Г.А. 1975. *Геоморфология морских берегов*. М., изд-во МГУ: 336 с.
8. Артюхин Ю.В., Артюхина О.И., Суслов О.Н., Шереметьев В.М. 2016. *Природные условия северного региона Краснодарского края и проблемы хозяйственного освоения его морского побережья*. Ростов н/Д, Фонд науки и образования: 142 с.
9. Алейникова А.М., Крыленко В.В. 2018. Динамика ландшафтов косы Долгая. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 26(3): 379–385. doi: 10.22363/2313-2310-2018-26-3-379-385
10. Артюхин Ю.В. 2016. Факторы изменчивости природных условий существования греческих колоний на берегах Меотийского озера и Киммерийского Боспора в позднеантичную эпоху. В кн.: *Боспорские исследования. Вып. XXXIII*. Керчь, Керченская городская типография: 163–185.
11. Зенкевич Л.А. 1963. *Биология морей СССР*. М., изд-во АН СССР: 740 с.
12. Воробьев В.П. 1949. *Бентос Азовского моря*. Симферополь, изд-во и типография Крымиздата: 193 с.
13. Шохин И.В., Набоженко М.В., Сарвилина С.В., Титова Е.П. 2006. Современное состояние и закономерности распределения донных сообществ Таганрогского залива. *Океанология*. 46(3): 432–441.

14. Багдасарян К.Г., Татишвили К.Г., Казахашвили Ж.Р., Мусхелишвили Л.В., Бадзошвили Ц.И., Ахвелидиани Е.Г., Жгенти Е.М., Тактакишвили И.Г., Квалиашвили Г.А. 1966. *Справочник по экологии морских двустворок. Образ жизни двустворчатых моллюсков, принадлежащих к родам, представленным в морских и солоноватоводных отложениях кайнозоя юга СССР.* М., Наука: 353 с.

15. Арсланов Х.А., Балабанов И.П., Гей Н.А., Измайлов Я.А., Островский А.Б., Скиба С.И., Скрябина Н.С. 1982. Методы и результаты картирования и геохронологической привязки древних береговых линий на суше и шельфе Черноморского побережья Кавказа и Керченско-Таманского района. В кн: *Колебания уровня морей и океанов за 15000 лет.* М., Наука: 144–150.

16. Балабанов И.П., Измайлов Я.А. 1988. Изменение уровневого и гидрохимического режимов Черного и Азовского морей за последние двадцать тысяч лет. *Водные ресурсы.* 6: 54–62.

17. Зенкович В.П. 1962. *Основы учения о развитии морских берегов.* М., изд-во АН СССР: 710 с.

18. Панов Д.Г., Хрусталев Ю.П. 1966. Об истории развития Азовского моря в голоцене. *Доклады АН СССР.* 166(2): 429–432.

19. Матишов Г.Г., Польшин В.В., Титов В.В., Шевердяев И.В. 2019. Голоценовая история азовского шельфа. *Наука Юга России.* 15(1): 42–53. doi: 10.7868/S25000640190105

REFERENCES

1. Zenkovich V.P. 1958. *Berega Chernogo i Azovskogo morey.* [*Shores of the Black and Azov seas*]. Moscow, Geografgiz: 374 p. (In Russian).

2. Panov D.G., Spichak M.K. 1961. [About sedimentation conditions in the Sea of Azov]. In: *Sovremennye osadki morey i okeanov.* [*Modern precipitation of seas and oceans*]. Moscow, USSR Academy of Sciences: 512–520. (In Russian).

3. Mamykina V.A., Khrustalev Yu.P. 1980. *Beregovaya zona Azovskogo morya.* [*Coastal zone of the Sea of Azov*]. Rostov-on-Don, Rostov State University: 176 p. (In Russian).

4. Matishov G.G., Pol'shin V.V., Titov V.V. 2020. Studies of the sediments of the Sea of Azov (on the example of the Dolgaya Spit). *Oceanology*. 60(1): 138–141. doi: 10.1134/S0001437020010166

5. Zuev N.A., Kobzev A.A. 2017. [The possibility of using aerial photography with a BASS for the integrated cadastral works]. *Geoprofi.* 4: 11–15. (In Russian).

6. Artyukhin Yu.V., Artyukhina O.I., Rodionova N.B. 2015. *Eyskoe morskoe poberezh'e: istoriya i problemy osvoeniya, prirodnye osnovy rekonstruksii. [Yeysk sea coast: history and problems of development, natural foundations of reconstruction*]. Yeysk, Fund of Science and Education: 205 p. (In Russian).

7. Leont'ev O.K., Saf'yanov G.A. 1975. *Geomorfologiya morskikh beregov.* [*Geomorphology of sea coasts*]. Moscow, Moscow State University: 336 p. (In Russian).

8. Artyukhin Yu.V., Artyukhina O.I., Suslov O.N., Sheremet'ev V.M. 2016. *Prirodnye usloviya severnogo regiona Krasnodarskogo kraya i problemy khozyaystvennogo osvoeniya ego morskogo poberezh'ya.* [Natural conditions of the northern region of the Krasnodar Region and problems of economic development of its sea coast]. Rostov-on-Don, Fund of Science and Education: 142 p. (In Russian).

9. Aleinikova A.M., Krylenko V.V. 2018. [Dynamics of landscapes of the spit Dolgaya]. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 26(3): 379–385. (In Russian). doi: 10.22363/2313-2310-2018-26-3-379-385

10. Artiukhin Iu.V. 2016. [Variability factors of natural conditions for the existence of Greek colonies on the Meotian Lake banks and the Cimmerian Bosporus in the late ancient epoch]. In: *Bosporskie issledovaniya. Vyp. XXXIII.* [*Bosporos Studies. Vol. XXXIII*]. Kerch, Kerch City Printing House: 163–185. (In Russian).

11. Zenkevich L.A. 1963. *Biologiya morey SSSR.* [*Biology of the seas of the USSR*]. Moscow, USSR Academy of Sciences: 740 p. (In Russian).

12. Vorob'ev V.P. 1949. *Bentos Azovskogo morya.* [*Benthos of the Sea of Azov*]. Simferopol, Publishing house and typography of Krymizdat: 193 p. (In Russian).

13. Shokhin I.V., Nabozhenko M.V., Sarvilina S.V., Titova E.P. 2006. The present-day condition and regularities of the distribution of the bottom communities in Taganrog Bay. *Oceanology*: 46(3): 401–410. doi: 10.1134/S000143700603012X

14. Bagdasaryan K.G., Tatishvili K.G., Kazakhashvili Zh.R., Muskhelishvili L.V., Badzoshvili Ts.I., Akhvelidiani E.G., Zhgenti E.M., Taktakishvili I.G., Kvaliashvili G.A. 1966. *Spravochnik po ekologii morskikh dvustvorok. Obraz zhizni dvustvorchatykh mollyuskov, prinadlezhashchikh k rodam, predstavlennym v morskikh i solonovatovodnykh otlozheniyakh kaynozoya yuga SSSR.* [*Handbook of marine bivalve ecology. Lifestyle of bivalve mollusks belonging to genera represented in marine and brackish-water sediments of the Cenozoic of the South of the USSR*]. Moscow, Nauka: 353 p. (In Russian).

15. Arslanov Kh.A., Balabanov I.P., Gey N.A., Izmaylov Ya.A., OstrovskiyA.B., Skiba S.I., Skryabina N.S. 1982. [Methods and results of mapping and geochronological linking of ancient coastlines on the land and shelf of the Black Sea coast of the Caucasus and the Kerch-Taman region]. In: *Kolebaniya urovnya morey i okeanov za 15000 let.* [*Fluctuations in the level of seas and oceans over 15,000 years*]. Moscow, Nauka: 144–150. (In Russian).

16. Balabanov I.P., Izmaylov Ya.A. 1988. [Changes in the level and hydrochemical regimes of the Black and Azov seas over the past 20 thousand years]. *Vodnye resursy*. 6: 54–62. (In Russian).

17. Zenkovich V.P. 1962. *Osnovy ucheniya o razvitii morskikh beregov.* [*Fundamentals of the doctrine of the development of sea coasts*]. Moscow, USSR Academy of Sciences: 710 p. (In Russian).

18. Panov D.G., Khrustalev Yu.P. 1966. [About the history of the Sea of Azov development in the Holocene]. *Doklady Akademii nauk SSSR.* 166(2): 429–432. (In Russian).

19. Matishov G.G., Polshin V.V., Titov V.V., Sheverdyaev I.V. 2019. [Holocene history of the Sea of Azov shelf]. *Nauka Yuga Rossii*. 15(1): 42–53. (In Russian). doi: 10.7868/S25000640190105

Поступила 06.08.2020

УДК 551.35 : 551.794 : 551.795
DOI: 10.7868/S25000640210404

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОЛОЦЕНОВОЙ ИСТОРИИ ШЕЛЬФА АЗОВСКОГО МОРЯ[1]

© 2021 г. Академик Г.Г. Матишов[1, 2], В.В. Польшин[1], В.В. Титов[1], К.С. Григоренко[1], К.С. Сушко[1], Е.П. Коваленко[1], Е.Э. Кириллова[1]

Аннотация. В статье представлены результаты палеогеографических и океанологических экспедиционных исследований косы Долгой Азовского моря, полученные в 2021 г. Комплекс проводившихся мероприятий состоял из бурения скважин, измерения морских течений и термохалинной структуры прилегающих вод, отбора гидрохимических, гидробиологических, литологических проб и археологических работ.

При любом направлении ветра у западного (азовоморского) берега косы Долгой существует постоянное вдольбереговое течение. При западном ветре оно является дрейфовым, при восточном – компенсационным. Такой характер течений способствует транспортировке ракушечного материала с Елениной и Железинской банок и продуктов абразии с западного коренного берега. Приведены новые данные о строении разрезов скважин из различных районов косы Долгой. В нижних горизонтах скважин, пробуренных у основания косы, а также в лагунах, были отобраны пробы воды, общая минерализация в которых вдвое превышает соленость Азовского моря. Верхний водоносный горизонт островов косы Долгой хорошо промывается водами Азовского моря. Проведенные исследования островов позволили выявить различия в их строении, составе отложений и донной фауны. Отмеченные особенности стратиграфии и состава наносов, слагающих островные гряды, объясняются различиями их физико-механических характеристик и литодинамическими условиями транспортировки осадочного материала. Отложения островов в основном сложены ракушечным детритом различной степени раздробленности, органогенно-детритусовыми песками и отдельными створками раковин. В составе раковинного материала отложений преобладают створки моллюска *Cerastoderma*. Находки археологических артефактов на островной части косы относятся к различным эпохам и датируются II веком до н.э. и XIII–XIV веками н.э.

Ключевые слова: Азовское море, коса Долгая, вдольбереговые потоки наносов, течения, ракушечные отложения, скважины, состав малакофауны, береговые валы, острова.

NEW RESULTS OF THE HOLOCENE HISTORY INVESTIGATION OF THE SEA OF AZOV SHELF

Academician RAS G.G. Matishov[1, 2], V.V. Polshin[1], V.V. Titov[1], K.S. Grigorenko[1], K.S. Sushko[1], E.P. Kovalenko[1], E.E. Kirillova[1]

Abstract. The article presents the results of paleogeographic and oceanological expeditionary studies of the Dolgaya Spit of the Sea of Azov, obtained in 2021. The complex of conducted work consisted of: drilling wells, measurements of sea currents and the thermohaline structure of adjacent waters, as well as hydrochemical, hydrobiological, lithological sampling and archaeological finds. It is shown that for any wind direction near the western (Sea of Azov) coast of the Dolgaya Spit, there is a constant alongshore current. With a westerly wind, it is purely drift, with an easterly wind – compensatory. This current contributes the transportation of shell material from the Yelenina and Zhelezinskaya banks and abrasion products from the western bedrock

[1] Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: vlad0220vlad@mail.ru

[2] Мурманский морекой биологический институт Российской академии наук (Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17

[1] **Оригинальный текст:** *Матишов Г.Г., Польшин В.В., Титов В.В., Григоренко К.С., Сушко К.С., Коваленко Е.П., Кириллова Е.Э.* Новые результаты исследования голоценовой истории шельфа Азовского моря // Наука Юга России. 2021. Т. 17. № 4. С. 34–44.

coast. New data about the structure of well sections from different areas of the Dolgaya Spit are presented. In the lower horizons of wells drilled at the base of the spit, as well as in lagoons, water samples were taken, the total salinity in which is twice the salinity of the Sea of Azov. However, the upper water-bearing horizon of the Dolgaya Spit islands is well washed with the Sea of Azov waters. Investigations of the islands made it possible to reveal differences in their structure, composition of sediments and benthic fauna. The noted features of the stratigraphy and composition of sediments that compose the island bars, are explained by the differences in their physical and mechanical characteristics and the lithodynamic conditions for the transportation of sedimentary material. Most of the deposits of the islands are composed of shell detritus of varying degrees of fragmentation, organogenic detrital sands, and individual shell valves. The shellfish *Cerastoderma* dominates in the shell material of the sediments. Finds of archaeological artifacts on the insular part of the spit date back to the 2nd century BC and the 13th–14th centuries AD.

Keywords: Sea of Azov, Dolgaya Spit, alongshore sediment flows, currents, shell sediments, wells, composition of malacofauna, coastal bars, islands.

В течение последних десяти лет специалисты Южного научного центра Российской академии наук (ЮНЦ РАН) исследовали четвертичную историю южных морей. Работы велись с учетом опыта глубоководного бурения дна Мирового океана, проводившегося в 70–90 гг. прошлого столетия [1]. Особое внимание исследователями уделялось изучению акватории и побережья Азовского моря, уровень которого за последние 10 тыс. лет неоднократно менялся [2–8].

Для реконструкции истории климата двух-трех тысячелетий важно изучить прибрежную часть шельфа. Абсолютные датировки возраста отложений на косе Долгой свидетельствуют о том, что семиметровая толща ракушечных отложений накапливалась 4 тыс. лет. Однако основная часть аккумулятивного тела косы сформировалась примерно за одну тысячу лет, в интервале 2,5–1,5 тыс. л.н. [9; 10–16].

В 2021 г. на косе Долгой и прилегающих участках акватории Азовского моря сотрудниками ЮНЦ РАН были продолжены исследования, целью которых было получение новых данных об изменении природных условий, происходивших в Приазовье на протяжении позднего голоцена.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Новые данные получены в ходе экспедиционных исследований в период 24–29.06.2021 г. на территории косы Долгой и прилегающих участках акватории Азовского моря (рис. 1).

Работы были выполнены с использованием современных методик и оборудования на основе отработанных нами [5; 6; 10; 17] подходов с привлечением специалистов по различным направлениям. Для составления ортофотопланов и цифровых моделей рельефа, а также измерения морфометрических особенностей береговых валов, формирующих аккумулятивное тело косы Долгой, с помощью беспилотного летательного аппарата была проведена аэрофотосъемка поверхностного рельефа. Одновременно осуществлялась закладка ключевых геодезических точек для бурения скважин, привязка ортофотопланов и измерения морфометрических особенностей береговых валов, формирующих аккумулятивное тело косы.

При проведении океанологической съемки в прибрежной части косы Долгой измерены скорость и направление течений. Значения температуры и солености воды определены с помощью буйковой станции Aanderaa RCM 9LW. Дискретность измерений варьировалась от 30 с до 10 мин. Исследования выполнены на 10 океанографических станциях со стороны Таганрогского залива и Азовского моря (рис. 2).

Бурение скважин проводили с отбором керна. Было пробурено 6 скважин (рис. 1, 3), максимальная глубина пробуренной скважины составила 23 м (скважина 3), минимальная – 15,5 м (скважина 5). Всего же за 3 года на косе Долгой сотрудниками ЮНЦ РАН было пробурено 13 скважин.

Почвы и ракушечные отложения косы Долгой изучали как с помощью ручного бура РБГ-10, так и путем визуальных обследований естественных обнажений. На островной части косы ручным бурением было сделано четыре шурфа до глубины 2 м. Образцы ракушечных отложений из шурфов отбирали послойно каждые 0,4 м в двукратной повторности. Всего отобрано 17 образцов. В дальнейшем по общепринятым методикам [18; 19] проводили морфологическое описание отобранных проб (структура, механический состав, сложение, полевая влажность, признаки засоления и т.д.). Наличие карбо-

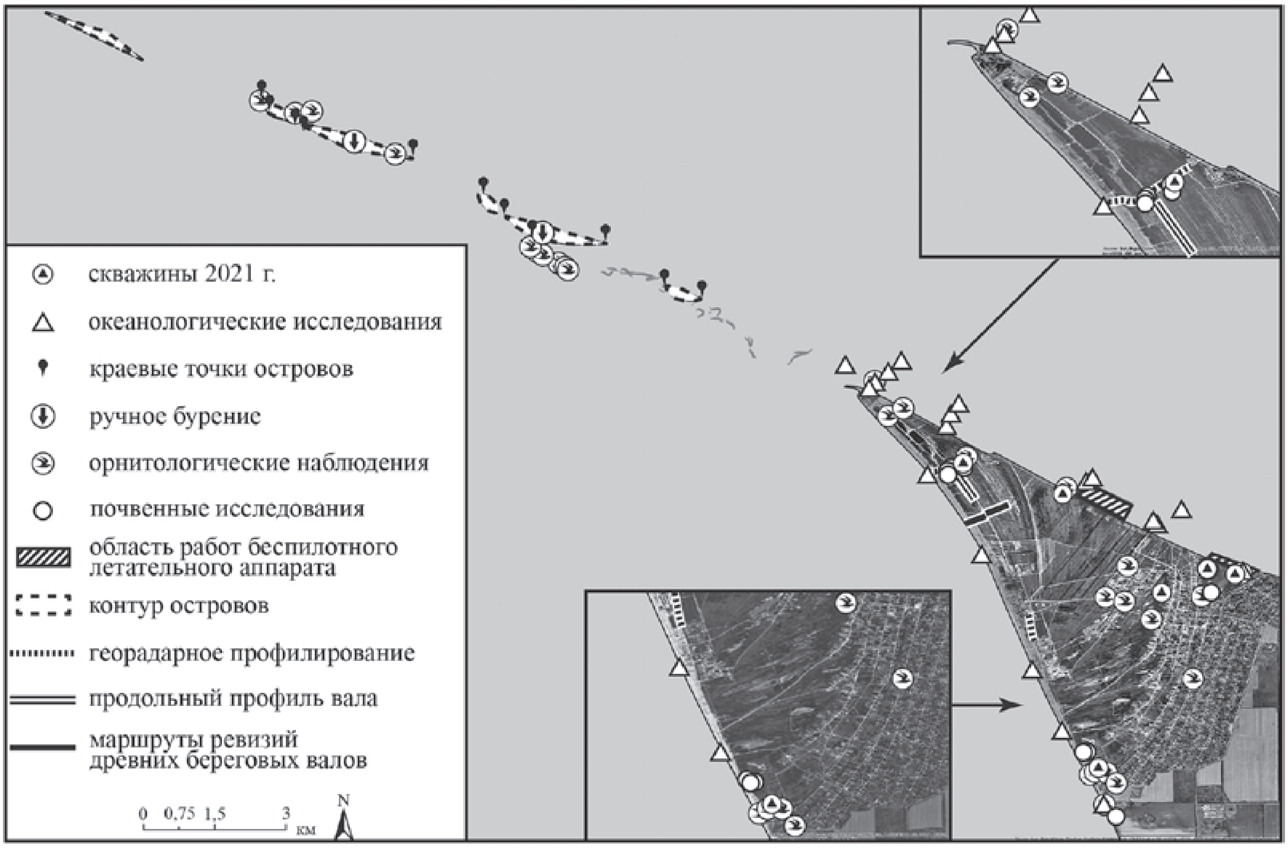


Рис. 1. Схема проведения экспедиционных исследований на косе Долгой в 2021 г.
Fig. 1. Plan of the field research on the Dolgaya Spit in 2021.

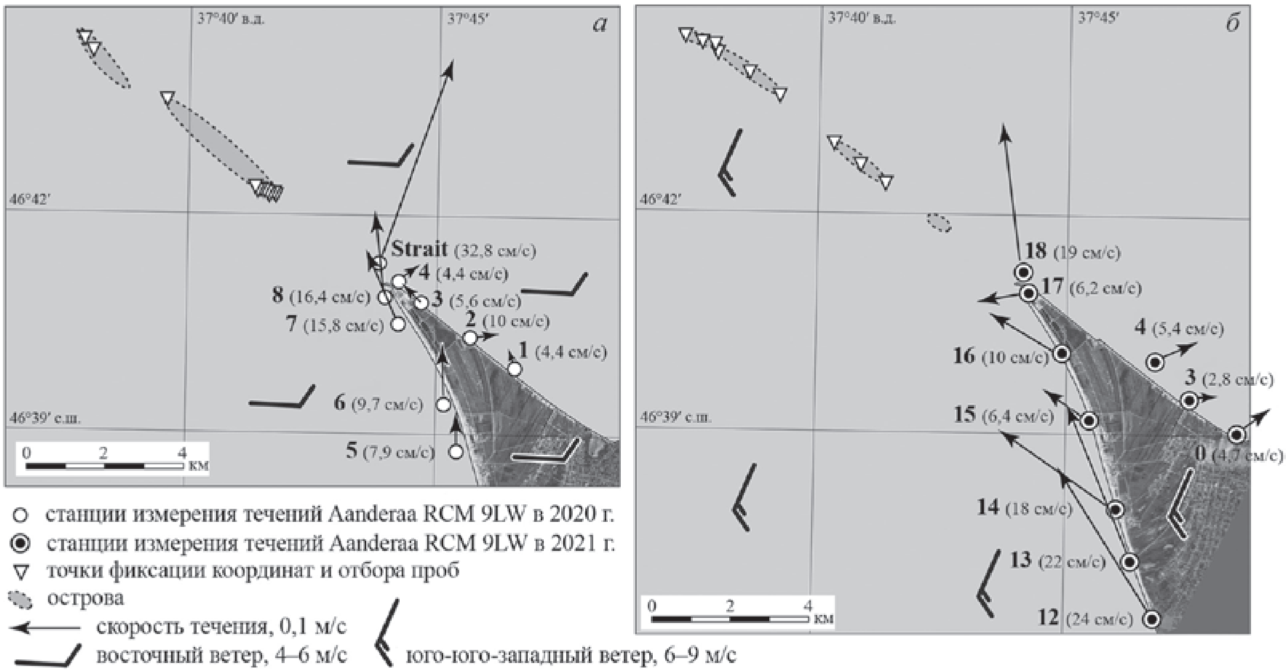


Рис. 2. Схема расположения океанологических станций: *а* – 30.06–04.07.2020 г.; *б* – 25–29.06.2021 г. Стрелками изображены векторы течений, в скобках – максимальная скорость, зафиксированная с помощью Aanderaa RCM 9LW.
Fig. 2. Oceanographic stations location: *a* – 30 June – 4 July 2020; *б* – 25–29 June 2021. Arrows depict the mean flow velocity vectors, in parentheses the maximum recorded via Aanderaa RCM 9LW.

натов в почве определяли с использованием 10%-го раствора соляной кислоты. Все образцы почв и ракушечных отложений упаковывали в пакеты и металлические бюксы (для определения увлажнения).

Пробы воды на ионный состав отобраны из трех скважин (3, 4 и 7), двух озер лагунного типа, а также из скважины, пробуренной на островной части косы Долгой.

Отбор раковинного материала для биостратиграфических (малакологических) исследований песчано-ракушечных отложений косы Долгой и ее островной части осуществляли по вертикали изучаемых разрезов шурфов, скважин и естественных обнажений. В пробах отмечали наиболее часто встречающиеся виды моллюсков. Параллельно отбирали створки раковин для определения абсолютного возраста береговых валов радиоуглеродным методом.

Рис. 3. Схема расположения скважин, пробуренных на косе Долгой в июле 2021 г.
Fig. 3. Layout of wells drilled on the Dolgaya Spit in July 2021.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Гидрологические и гидрохимические исследования вод необходимы для понимания роли косы Долгой в гидродинамике и истории формирования восточного побережья Азовского моря. Важно регулярно при различных направлениях ветра измерять параметры вдольбереговых течений. Установку и снятие буйковых станций во время экспедиции проводили в условиях юго-юго-западного ветра скоростью 6–9 м/с. Максимальные скорости течений, в соответствии с полем ветра, наблюдались с западной стороны косы и достигали 22–24 см/с. У центральной и северной частей западного берега косы скорости течений понижались до 6–10 см/с. Максимальная скорость вдольбереговых течений, направленных к оконечности косы, зафиксирована в районе станции 12 и составила 24 см/с (рис. 2).

Коренной берег испытывает активную волновую абразию; соответственно, при юго-западном направлении ветра и течений береговой материал переносится вдоль берега на север. Течения на станции 14 ослабевают до 18 см/с и поворачивают вместе с направлением береговой линии. На станции 15 зафиксирована наименьшая скорость течения у западного берега (6,4 см/с). Ближе к оконечности косы, на станции 16, скорость снова возрастает – до 10 см/с. На станции 17 зафиксировано обратное течение, образованное в результате завихрений в дистальной части. Для акватории, прилегающей к оконечности косы, в 2021 г. оказались нехарактерными высокие скорости переноса вод, максимальная скорость достигла 19 см/с в отличие от съемки 2020 г., когда в условиях более слабого ветра скорость течения в проливе между островами составила 32 см/с (рис. 2).

При западном ветре восточный берег косы является подветренным, поэтому наблюдаемые с этой стороны течения были слабее. Максимальная скорость составила 5,4 см/с. Течения были направлены на северо-восток. На станции 0 максимальная скорость течения составила 4,7 см/с, на станции 3 зарегистрирована наименьшая для всего периода измерений скорость 2,8 см/с. Станция 4 находилась дальше от берега в море. На ней заметно усиление дрейфовой составляющей. Соответственно, максимум скорости составил 5,4 см/с.

Для термического режима вод характерно понижение температуры в районах примыкания основания косы к коренному берегу. Возможно, у восточного побережья это явление связано с разгрузкой грунтовых вод, у западного – с перемешиванием всей водной толщи. Значения температуры составляли 25,9 °С для восточного берега и 25,7 °С для западного. У оконечности косы отмечалось повышение температуры до 27,01 °С (станция 16).

Наименьшая соленость воды была зафиксирована у основания косы с восточной стороны (станция 0) и составила 13,2 епс. Для воды у средней части восточного берега характерны значения в пределах 13,5–13,6 епс. У оконечности с восточной стороны зафиксированы максимальные значения солености, превышающие 14 епс. С западной стороны и в проливе между островами воды Азовского

Таблица 1. Ионный состав вод косы Долгой
Table 1. Ionic composition of the Dolgaya Spit waters

Место отбора Sampling place	Cl^-, мг/л mg/l	$HCO3^-$, мг/л mg/l	$SO4^{2-}$, мг/л mg/l	Жесткость, мг-экв./л / Hardness, meq/l	Ca^{2+}, мг/л mg/l	Mg^{2+}, мг/л mg/l	$Na^+ + K^+$, мг/л mg/l	Общая минерализация, г/л / Total mineralization, g/l
Скважина 3 (18–20 м) Well 3 (18–20 m)	4785,75	432,02	1729,08	64,00	601,20	413,44	2852	10,81
Скважина 4 (12–13 м) Well 4 (12–13 m)	7976,25	673,66	4322,70	104,00	641,28	875,52	5551	20,04
Скважина 4 (14–15 м) Well 4 (14–15 m)	8330,75	654,13	4418,76	106,00	681,36	875,52	5793	20,75
Скважина 4 (16–30 м) Well 4 (16–30 m)	16484,25	654,13	4514,82	100,00	641,28	826,88	11743	34,86
Скважина 7 (15–16 м) Well 7 (15–16 m)	17725,00	595,56	3266,04	122,00	521,04	1167,36	11394	34,67
Лагуна, коса Долгая Lagoon, Dolgaya Spit	12407,50	117,16	4034,52	124,00	821,64	1009,28	7798	26,19
Остров Долгий Dolgiy Island	8508,00	248,96	1921,20	60,00	240,48	583,68	5602	17,10
Озеро Лебяжье, станица Должанская / Lebyazh'e Lake, Dolzhanskaya village	15066,25	226,99	3458,16	124,00	601,20	1143,04	9418	29,91

моря оказались сильно перемешаны ветром, поэтому значения солености изменялись в узких пределах – 13,7–13,8 епс.

В ходе исследований грунтовых вод самая низкая концентрация растворенных веществ была зафиксирована в пробах, отобранных в молодых частях косы. Если минерализация грунтовых вод острова Длинного составила 17,1 г/л, то в скважине 3 зарегистрировано наименьшее значение – 10,8 г/л.

Вода во всех отобранных пробах относится к морскому хлоридно-натриевому типу. Небольшие колебания ионного состава позволяют выделить несколько групп. Наибольшая доля ионов натрия и калия среди катионов и хлоридов среди анионов характерна для вод с максимальной минерализацией из скважин 4, 7 и из оз. Лебединого. Ионный состав этого же типа выделен в пробе воды, отобранной на острове Длинном. Грунтовые воды из скважины 4 (горизонты 12–13 м и 14–15 м) отличаются повышенным содержанием катионов магния и сульфат-анионов. В безымянном лагунном озере, как и в пробах первой группы, значительно преобладают $Na^+ + K^+$ и Cl^-, однако их отличает немного повышенное содержание сульфатов и магния. В водах из скважины 3 меньше всего натрия и калия и максимальная доля иона Ca^{2+}, кроме этого, в этой пробе наибольший процент гидрокарбонатов при относительно низком содержании хлоридов.

Максимальная минерализация грунтовых вод отмечена в скважине 4 (горизонт 16–30 м), где ее значения составили 34,9 г/л. В этой же скважине в интервалах отбора 12–13 и 14–15 м показатели минерализации были на уровне 20 и 20,7 г/л соответственно. Показатель 34,7 г/л зафиксирован в скважине 7 (горизонт 15–16 м). Высокие относительно Азовского моря значения получены для оз. Лебединого (29,9 г/л) и безымянной лагуны (26,2 г/л) (табл. 1).

При обследовании геологических обнажений вдоль западного и восточного берегов косы была установлена полная обнаженность разрезов, что говорит о постоянной и достаточно равномерной береговой абразии. Мощность разреза по простиранию изменяется мало и составляет 7–8 м.

В обнажениях вскрываются субаэральные отложения лёссово-почвенной серии, включая несколько погребенных почв, которые предварительно можно интерпретировать как мезинский педокомплекс (начало позднего неоплейстоцена) и камен-

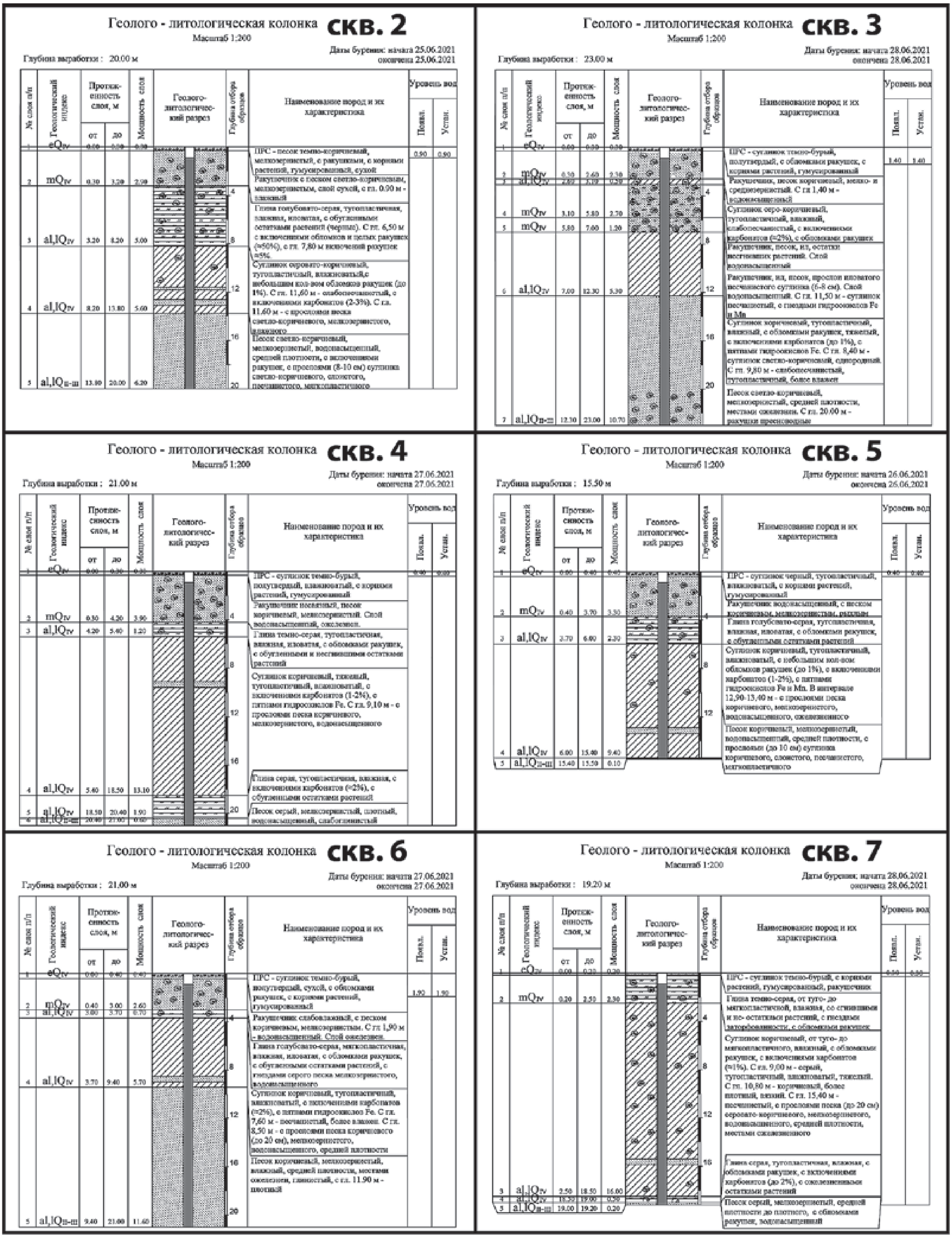


Рис. 4. Описание разреза скважин, пробуренных на косе Долгой в июле 2021 г.
Fig. 4. Description of the section of the wells drilled in the area of the Dolgaya Spit in July 2021.

ский педокомплекс (конец среднего неоплейстоцена). Таким образом, можно предположить, что возраст террасы, к которой примыкает основание косы Долгой, датируется второй половиной неоплейстоцена (около 240–200 тыс. л.н.).

В ходе предварительного осмотра *in situ* слоев остатков ископаемые организмы в них обнаружены не были. На осыпи была найдена нижняя челюсть суслика *Spermophilus* sp., который в настоящее время в районе Ейского полуострова не обитает. Можно предположить, что остатки грызуна происходят из кротовин, отмеченных в слое валдайского лёсса (ниже уровня современной почвы).

Новые сведения о строении четвертичных отложений получены в результате бурения скважин на различных участках косы Долгой (рис. 3, 4).

Заостряя внимание на встречаемости моллюсков, отметим, что во всех пробуренных скважинах наибольшее количество раковин отмечалось в песчано-ракушечных отложениях, залегающих на глубине до 2,5–3 м. Малакофауна в этом интервале глубин преимущественно была представлена створками *Cerastoderma* Poli, 1795 разного размера и степени сохранности. Часто встречались крупные обломки *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819, створки *Chamelea gallina* (Linnaeus, 1758), рако-

Таблица 2. Малакофауна из кернов скважин, пробуренных на косе Долгой
Table 2. Malacofauna from well cores drilled on the Dolgaya Spit

Скважина Well	Горизонт, м Horizon, m	Тип грунта Soil type	Малакофауна Malacofauna
Скважина 2 Well 2	3,8–3,9	Иловатая глина Silty clay	*Mytillus galloprovincialis* – обломки, единично / debris, single finds, *Cerastoderma* – крупные целые створки, много / large whole valves, many
	6–7,2	Илы с ракушечным детритом / Silt with shell detritus	*Cerastoderma* – обломки разного размера, массово / fragments of different sizes, mass, *Bittium reticulatum* (da Costa, 1778) – мало / few
	7,2–7,8	Заиленная ракуша Silted shell	*Mytillus galloprovincialis* – обломки крупных раковин, много / fragments of large shells, many
	~20	Песок Sand	*Lithoglyphus naticoides* (C. Pfeiffer, 1828) – много / many, *Dreissena* Van Beneden, 1835 – много / many, *Hypanis* Ménétries, 1832, *Viviparus viviparus*, Sphaeriidae, *Bittium reticulatum* – много / many, *Varicorbula gibba* (Olivi, 1792) – единично / single finds, *Loripes* Poli, 1791, *Polititapes* Chiamenti, 1900
Скважина 3 Well 3	5,5–6	Заиленная ракуша Silted shell	*Cerastoderma* – целые створки, много / whole valves, many, *Abra* Lamarck, 1818 – обычно / ordinarily, *Bittium* – единично / single finds
	20–22	Песок Sand	*Cerastoderma*, *Varicorbula gibba*, *Tritia*, *Gastrana* Schumacher, 1817, *Dreissena*, Unionidae
Скважина 5 Well 5	3,7	Ракуша Shell	*Tritia* – единично / single finds
Скважина 6 Well 6	3,2–3,5	Иловатая глина Silty clay	*Tritia* – единично / single finds, Mytilidae – обломки, единично / fragments, single finds, *Cerastoderma*

вины *Tritia* Risso, 1826, реже – раковины *Bittium* Gray, 1847, единично – *Hydrobia* (Hartmann, 1821) и *Theodoxus* Montfort, 1810, а также призамочные обломки створок Pholadidae. В более глубоких горизонтах моллюски были приурочены к серым илам, а на глубине 20 м и больше – к пескам плейстоценового возраста (табл. 2).

На берегу обследовали обнажения ракуши и выбросы донной фауны в пляжевую зону. У коренного берега со стороны Азовского моря были обнаружены живые моллюски: *Mya arenaria* Linnaeus, 1758, *Mytilus galloprovincialis* с кладками *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) и колониями *Balanus improvisus* Darwin, 1854, *Rhithropanopeus harrisii* (Gould, 1841). Кроме того, в массовом количестве отмечен двустворчатый моллюск *Barnea candida* (Linnaeus, 1758), обитающий в норах на выходах плотных грунтов. Также обнаружены рак *Upogebia pusilla* (Petagna, 1972), заселяющий норы в прибрежной части моря, и представитель кишечнополостных *Actinia equina* (Linnaeus, 1758).

Комплексность почвенного покрова является характерной чертой прибрежной части косы Долгой. Основными причинами комплексности являются: сложный мезо- и микрорельеф, различный характер увлажнения, развитие солонцового процесса. На косе преобладают маломощные песчаные почвы, которые часто залегают в комплексе с более гумусированными луговыми почвами. Гранулометрический состав почв преимущественно супесчаный (представлен мелким ракушечным детритом) либо тяжелосуглинистый супесчаный. Нижние горизонты почв, лежащих на ракушечных отложениях, в большинстве случаев имеют супесчаный состав.

Определение pH почв косы Долгой показало, что вниз по профилю происходит увеличение щелочности до 7,84–7,95, что связано с изменением окислительно-восстановительных условий при периодическом переувлажнении и подтоплении грунтовыми водами и при сгонно-нагонных явлениях. Также на прибрежных участках косы в районе лиманов и оз. Лебединого формируются ареалы гидроморфных почв, в профиле которых имеются признаки гидроморфизма: наличие железистых новообразований, гидроокисных пленок железа, сизоватых пятен оглеения. Почвы в шурфах 2, 4 отнесены по строению и свойствам к карбонатным.

Батиметрия дистальной части косы имеет сложную форму, встречаются затопленные острова, между которыми расположены глубокие промоины, неразличимые визуально с поверхности. Самая важная часть наших исследований – данные о строении островной гряды, которая включает цепочку из примерно десяти крупных и мелких островов, разделенных водным пространством с глубинами от 0,5 до 4 м (рис. 1).

Острова косы Долгой ежегодно сильно меняются, при этом дальние, расположенные на расстоянии до 12 км от оконечности косы, имеют более стабильные размеры, местоположение и форму. Данные экспедиционных исследований, проводившихся в 2020 и 2021 гг., свидетельствуют о том, что количество, размеры и форма аккумулятивных островов постоянно трансформируются. В 2020 г. были зафиксированы координаты оконечностей двух крупных островов. Первый, ближайший к косе, имел длину 3,6 км, второй – 1,7 км. В 2021 г. наблюдалась цепь из более мелких островов. Было исследовано три острова, два из которых имели длину около 1,5 км, третий – около 0,5 км.

Первый длинный остров гряды (второй от оконечности косы, рис. 1) сложен рыхлой ракушей, преимущественно целыми створками моллюска *Cerastoderma*. Часто встречается *Mya arenaria* и крупные обломки *Mytilus galloprovincialis*. В зоне прибоя на берегу отмечены целые раковины этих моллюсков со скрепленными лигаментом створками. Равномерно по всей площади острова распределены раковины *Chamelea gallina*, *Solen vagina* Linnaeus, 1758 и *Tritia reticulata* (Linnaeus, 1758), редко встречаются *Gastrana fragilis* (Linnaeus, 1758), в выбросах обнаружена раковина пресноводного моллюска *Viviparus viviparus* (Linnaeus, 1758). В поперечном сечении острова выделяется до 5 береговых валов. На его южной оконечности заметны около 10 боковых валов. На этом острове был заложен шурф глубиной 1,78 м. Вскрытые отложения сформированы преимущественно из створок раковин моллюсков, ракушечного детрита и ракушечного (органогенно-детритусового) песка при небольшом количестве кварцевых песков в нижней части профиля. Характер увлажненности отложений меняется (максимальный на глубине 0,6–0,7 м). Микрорельеф острова отличается значительной динамикой и формированием грядовых цепочек и валов, простирающихся параллельно береговой линии. Вероятно, важнейшую роль играют волновое воздействие и перемещение наносов, а также отчасти эоловый фактор перемещения осадочного материала.

Второй длинный остров гряды косы Долгой (рис. 1) отличает твердая поверхность, представ-

Рис. 5. Второй длинный остров косы Долгой, 2021 г.
Fig. 5. The second long island of the Dolgaya Spit, 2021.

ляющая из себя ракушу, сцементированную птичьим пометом, толщина слоя которой изменяется от 5 до 14 мм. Прочное покрытие и обилие птичьих гнезд позволяют предположить, что остров меньше размывается и меняет форму в период сильных штормов (рис. 5). С северной оконечности острова был заложен шурф глубиной 0,85 м. По результатам изучения вскрытого шурфом разреза можно говорить о том, что в целом поверхностные отложения острова сложены уплотненным мелким раковинным детритом с примесью песка. Нижележащие отложения представлены мелким ракушечным детритом с незначительной примесью песка, вероятно, эолового происхождения. На глубине 0,4 м начинается слой мощностью 0,07 м, сложенный в основном целыми створками *Cerastoderma*. Наличие в слое створок вселенца *Mya arenaria* свидетельствует о формировании отложений не ранее середины прошлого века. Нижняя часть разреза преимущественно сложена слоем ракушечного детрита.

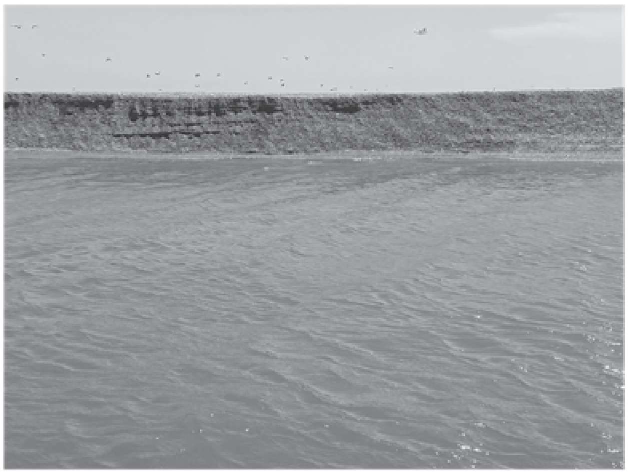


Рис. 6. Обнажение ракушечных отложений на островах косы Долгой, 2021 г.
Fig. 6. Outcrop of shell deposits on the islands of the Dolgaya Spit, 2021.

Третий, менее протяженный, остров (дальний от косы, рис. 1) со стороны Азовского моря имеет пологий рельеф и сложен спрессованным раковинным детритом. Со стороны Таганрогского залива его берег крутой и достигает высоты 1,5 м (рис. 6). Основной чертой отложений острова является четкая вертикальная дифференциация частиц крупнее 1 мм, доля которых вниз по профилю уменьшается до 20 %. На глубине более 1 м помимо ракушечного детрита в отложениях отмечаются включения кварцевого песка. В составе фракции крупнее 0,25 мм преобладает раковинный детрит. Частицы размером от 0,125 до 0,25 мм состоят в основном из тонких пластин детрита, которые, в отличие от округлых минеральных песчинок, могут планировать в ветровом потоке и быть перенесены на большее расстояние. По вертикали вскрытых разрезов влажность отложений изменяется. Ее максимальные значения зафиксированы в интервале 0,6–0,75 м. Ниже по профилю влажность уменьшается.

Важным археологическим открытием 2021 г. явилась находка в песчано-ракушечных отложениях на островах косы Долгой (46°43′49.14″ с.ш., 37°38′24.66″ в.д.) артефактов, относящихся к различным историческим эпохам (рис. 7). Одна находка, предварительно датируемая II веком до н.э., представляет собой верхнюю профильную часть греческой родосской амфоры с клеймом (рис. 7*а*). Находки XIII–XIV веков представлены фрагментами гончарных сосудов и амфор и, возможно, могут относиться к разрушенным слоям эпохи поселений Должанское I или Должанское II (рис. 7*б*).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование полей течений при разном направлении ветра позволяет сделать вывод о существовании у западного (азовоморского) берега косы постоянного вдольберегового переноса как при западном, так и при восточном ветре. Если в первом случае течение имеет дрейфовую природу, то во втором это компенсационное течение. Такой характер течений в районе исследований способствует переносу осадочного материала с Елениной и Железинской банок, а также продуктов абразии западного коренного берега.

Изучение гидрохимического режима подземных вод косы Долгой позволяет сделать следующие выводы: у коренного берега, в наиболее глубоких водоносных горизонтах, а также в лагунах находится концентрированная морская вода, общая минерализация которой вдвое превышает соленость Азовского моря и достигает средних значений солености Мирового океана; верхний водоносный слой аккумулятивных островов косы Долгой хорошо промывается водами Азовского моря, на острове Длинном выходы пресных вод не обнаружены; пониженная минерализация и отличия ионного состава в верхних горизонтах скважины у коренного берега, в некоторых лагунах, а также в скважине в средней части косы, скорее всего, являются свидетельством разгрузки не морских подземных вод в этих районах.

Исследование островов косы Долгой позволило выявить различия в их строении. Надводные части отличаются структурой, плотностью и устойчивостью к внешним воздействиям.

Отмеченные особенности стратиграфии и состава наносов, слагающих островные гряды, можно объяснить различиями их физико-механических характеристик и литодинамическими условиями переноса. Данные свойства влияют на длительность транспортировки и условия осаждения материала. Раковинный детрит крупнее 1 мм и целые створки раковин являются основой для формирования ветроустойчивой поверхности островов косы Долгой.

Предварительный анализ строения и механизма формирования аккумулятивного тела косы Долгой, а также островной гряды в Азовском море открывает новые возможности для изучения механизмов и факторов образования и трансформации азовских кос и разработки средств и подходов для прогнозирования дальнейшего развития прибрежной зоны в связи с изменением уровневого режима и климата. По результатам анализа данных можно более полно проследить внутривековые и межвековые тренды и закономерности природной изменчивости Азовского моря.

Рис. 7. Археологические находки различных эпох, обнаруженные на островной части косы Долгой в июне 2021 г.: *а* – верхняя профильная часть греческой родосской амфоры, II век до н.э.; *б* – фрагменты гончарных сосудов и амфор, XIII–XIV века.
Fig. 7. Archaeological finds from different eras, discovered on the insular part of the Dolgaya Spit in June 2021: *a* – upper profile part of a Greek amphora of Rhodes, 2nd century BC; *б* – fragments of pottery vessels and amphorae, 13th–14th centuries AD.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ 20-17-00196 «Комплексные исследования аккумулятивных береговых форм Азовского моря для понимания процессов их формирования и трансформации в голоцене».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Геологическая история Черного моря по результатам глубоководного бурения.* 1980. М., Наука: 212 с.
2. Артюхин Ю.В. 2010. К геоморфологической интерпретации природных условий античной колонизации вершины Таганрогского залива. В кн.: *Древности Боспора. Т. 14.* М., Таус: 28–38.
3. Артюхин Ю.В., Артюхина О.И., Родионова Н.Б. 2015. *Ейское морское побережье: история и проблемы освоения, природные основы реконструкции.* Ейск, Фонд науки и образования: 205 с.
4. Балабанов И.П., Измайлов Я.А. 1988. Изменение уровневого и гидрохимического режимов Черного и Азовского морей за последние двадцать тысяч лет. *Водные ресурсы.* 6: 54–62.
5. Матишов Г.Г., Польшин В.В. 2019. Новые результаты по истории Азовского моря в голоцене. *Доклады академии наук.* 489(2): 190–194. doi: 10.31857/S0869-56524892190-194
6. Матишов Г.Г., Польшин В.В., Коваленко Е.П., Григоренко К.С. 2021. Палеоокеанология Азовского моря в голоцене (по данным бурения и изучения малакофауны на косе Долгой). *Океанология.* 61(4): 609–619. doi: 10.31857/S0030157421030084
7. Панов Д.Г., Хрусталев Ю.П. 1966. Об истории развития Азовского моря в голоцене. *Доклады Академии наук СССР.* 166(2): 429–432.
8. Шнюков Е.Ф., Орловский Г.Н., Усенко В.П., Григорьев А.В., Гордиевич В.А. 1974. *Геология Азовского моря.* Киев, Наукова думка: 248 с.

9. Артюхин Ю.В. 2011. Проблемы изучения эволюции береговых зон морей на основе данных по структуре баланса наносов и содержанию гетерогенных компонентов рельефа. В кн.: *Географические исследования Краснодарского края. Сборник научных трудов. Вып. 6.* Краснодар, изд-во КубГУ: 40–54.

10. Матишов Г.Г., Польшин В.В., Титов В.В. 2020. Исследования отложений кос Азовского моря (на примере косы Долгой). *Океанология.* 60(1): 158–161. doi: 10.31857/S0030157420010165

11. Шохин И.В., Набоженко М.В., Сарвилина С.В., Титова Е.П. 2006. Современное состояние и закономерности распределения донных сообществ Таганрогского залива. *Океанология.* 46(3): 432–441.

12. Воробьев В.П. 1949. *Бентос Азовского моря.* Симферополь, Крымиздат: 193 с.

13. Зенкович В.П. 1958. *Берега Черного и Азовского морей.* М., Географгиз: 374 с.

14. Мамыкина В.А., Хрусталев Ю.П. 1980. *Береговая зона Азовского моря.* Ростов н/Д, изд-во РГУ: 176 с.

15. Матишов Г.Г., Шохин И.В., Набоженко М.В., Польшин В.В. 2008. Многолетние изменения донных сообществ Азовского моря в связи с характером осадконакопления и гидрологическим режимом моря. *Океанология.* 48(3): 425–435.

16. Хрусталев Ю.П. 1989. *Закономерности осадконакопления во внутриконтинентальных морях аридной зоны.* Л., Наука: 261 с.

17. Матишов Г.Г., Григоренко К.С. 2020. Динамический режим Азовского моря в условиях осолонения. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле.* 492(1): 107–112. doi: 10.31857/S268673972005014X

18. Александрова Л.Н., Найденова О.А. 1986. *Лабораторно-практические занятия по почвоведению.* Л., Агропромиздат: 295 с.

19. Кауричев И.С. 1980. *Практикум по почвоведению.* М., Колос: 280 с.

REFERENCES

1. *Geologicheskaya istoriya Chernogo morya po rezul'tatam glubokovodnogo bureniya.* [*Geological history of the Black Sea based on the results of deep water drilling*]. 1980. Moscow, Nauka: 212 p. (In Russian).

2. Artyukhin Yu.V. 2010. [On the geomorphological interpretation of the natural conditions of the ancient colonization of the top of the Taganrog Bay]. In: *Drevnosti Bospora. T. 14.* [*Antiquities of the Bosporus. Vol. 14*]. Moscow, Taus: 28–38. (In Russian).

3. Artyukhin Yu.V., Artyukhina O.I., Rodionova N.B. 2015. *Eyskoe morskoe poberezh'e: istoriya i problemy osvoeniya, prirodnye osnovy rekonstruktsii.* [*Yeisk sea coast: history and development problems, natural foundations of reconstruction*]. Yeisk, Science and Education Foundation: 205 p. (In Russian).

4. Balabanov I.P., Izmajlov Ya.A. 1988. [Changes in the level and hydrochemical regimes of the Black and Azov seas over the past twenty thousand years]. *Vodnye resursy.* 6: 54–62. (In Russian).

5. Matishov G.G., Polshin V.V. 2019. New results on the history of the Sea of Azov in the Holocene. *Doklady Earth Sciences.* 489(1): 1339–1344. doi: 10.1134/S1028334X19110138

6. Matishov G.G., Polshin V.V., Kovalenko E.P., Grigorenko K.S. 2021. Paleoceanology of the Sea of Azov in the Holocene (based on geological survey data and investigation of malacofauna on the Dolgaya Spit). *Oceanology.* 61(4): 533–542. doi: 10.1134/S0001437021030085

7. Panov D.G., Khrustalev Yu.P. 1966. About the history of the Sea of Azov in the Holocene. *Doklady Akademii nauk SSSR.* 166(2): 429–432. (In Russian).

8. Shnyukov E.F., Orlovskiy G.N., Usenko V.P., Grigoriev A.V., Gordievich V.A. 1974. *Geologiya Azovskogo morya.* [*Geology of the Sea of Azov*]. Kiev, Naukova dumka: 248 p. (In Russian).

9. Artyukhin Yu.V. 2011. [Investigation problems of the evolution of coastal zones of the seas based on data of the structure of sediment balance and the content of heterogeneous components of the relief]. In: *Geograficheskie issledovaniya Krasnodarskogo kraya. Sbornik nauchnykh trudov. Vyp. 6.* [*Geographical research in Krasnodar Region. Collection of scientific papers. Vol. 6*]. Krasnodar, Kuban State University: 40–54. (In Russian).

10. Matishov G.G., Polshin V.V., Titov V.V. 2020. Studies of the sediments of the Sea of Azov (on the example of Dolgaya Spit). *Oceanology.* 60(1): 138–141. doi: 10.1134/S0001437020010166

11. Shokhin I.V., Nabozhenko M.V., Sarvilina S.V., Titova E.P. 2006. The present-day condition and regularities of the distribution of the bottom communities in Taganrog bay. *Oceanology.* 46(3): 401–410. doi: 10.1134/S000143700603012X

12. Vorobiev V.P. 1949. *Bentos Azovskogo morya.* [*Benthos of the Sea of Azov*]. Simferopol, Krymizdat: 193 p. (In Russian).

13. Zenkovich V.P. 1958. *Berega Chernogo i Azovskogo morey.* [The shores of the Black and Azov seas]. Moscow, Geografgiz: 374 p. (In Russian).

14. Mamykina V.A., Khrustalev Yu.P. 1980. *Beregovaya zona Azovskogo morya.* [Coastal zone of the Sea of Azov]. Rostov-on-Don, Rostov State University: 176 p. (In Russian).

15. Matishov G.G., Shokhin I.V., Nabozhenko M.V., Polshin V.V. 2008. Long-term changes in the benthic communities of the Sea of Azov related to the sedimentation and hydrological regime. *Oceanology.* 48(3): 390–400. doi: 10.1134/S0001437008030119

16. Khrustalev Yu.P. 1989. *Zakonomernosti osadkonakopleniya vo vnutrikontinental'nykh moryakh aridnoy zony.* [*Regularities of sedimentation in the inland seas of the arid zone*]. Leningrad, Nauka: 261 p. (In Russian).

17. Matishov G.G., Grigorenko K.S. 2020. Dynamic mode of the Azov Sea in conditions of salinization. *Doklady Earth Sciences.* 492(1): 376–381. doi: 10.1134/S1028334X20050141

18. Aleksandrova L.N., Naydenova O.A. 1986. *Laboratorno-prakticheskie zanyatiya po pochvovedeniyu.* [*Laboratory and practical classes in soil science*]. Leningrad, Agropromizdat: 295 p. (In Russian).

19. Kaurichev I.S. 1980. *Praktikum po pochvovedeniyu.* [*Workshop on soil science*]. Moscow, Kolos: 280 p. (In Russian).

Поступила 13.09.2021

УДК [597.4/.5: 551.794] (262.54)
DOI: 10.7868/S25000640210108

ДИНАМИКА СОСТАВА ПРОМЫСЛОВОЙ ИХТИОФАУНЫ ВОДОЕМОВ ВОСТОЧНОГО ПРИАЗОВЬЯ В ГОЛОЦЕНЕ [1]

© 2021 г. С.В. Куршаков[1], В.В. Титов[2]

Аннотация. Изучены костные остатки рыб из ряда разновозрастных археологических памятников Нижнего Дона, Кубани, Таманского и Керченского полуостровов. Полученные данные рассмотрены в совокупности с результатами других исследователей и в контексте динамики состава ихтиофауны и рыбного промысла в эпоху голоцена. Подтверждается вывод о том, что в течение голоцена видовой состав ихтиофауны не претерпел существенных изменений. Прослежена тенденция изменения характера рыболовства от неолитической эпохи до современности. Установлено, что основная часть белковой пищи в неолите приходилась на долю рыбы. С развитием животноводства рыболовство уходит на второй план, что в общем сохраняется и до наших дней. Основной отмеченной тенденцией является увеличение доли крупных рыб (в частности, осетровых и сомов) в поселениях бронзового и железного веков по сравнению с неолитом и энеолитом. Связано это, вероятно, с совершенствованием способов и орудий лова. Значительное количество археологических памятников в раннем железном веке позволяет выделить три археоихтиологические провинции, различающиеся предпочтительными промысловыми видами: район Керченского пролива, Восточное Приазовье и Предкавказье, а также дельта р. Дон. Только в начале XX века в связи со значительным увеличением численности населения и последующим сооружением сети гидротехнических сооружений на реках некоторые виды, в частности из семейства осетровых, стали редкими и значительно сократили свой ареал.

Ключевые слова: ихтиофауна, голоцен, неолит, энеолит, бронзовый век, железный век, средневековье, Нижний Дон, река Кубань, Азовское море.

DYNAMICS OF THE COMMERCIAL ICHTHYOFAUNA COMPOSITION IN WATER BODIES OF THE EASTERN PART OF THE SEA OF AZOV REGION DURING THE HOLOCENE

S.V. Kurshakov[1], V.V. Titov[2]

Abstract. The bone remains of fishes from a number of archaeological sites of different ages in the lower course of the Don River, Kuban River, Taman and Kerch peninsulas have been studied. The obtained data are considered in conjunction with the results of other researchers and the context of the dynamics of ichthyofauna and fishery during the Holocene epoch. The investigation confirms the conclusion that during this historical period the ichthyofauna remained unchanged at the species composition. The trend of changes in the fisheries strategy from the Neolithic epoch to the present is traced. The major part of protein food during the Neolithic was fish. With the development of animal husbandry, fishing was pushed to the sidelines, which, in general, persists to the present time. The main tendency noted is an increase of the percent of large fishes (in particular sturgeons and wels) in the settlements of the Bronze and Iron Ages. This is probably due to the improvement of fishery techniques and tools. A significant number of archaeological sites in the early Iron Age makes it possible to distinguish three archaeoichthyological provinces, differing in preferred commercial species: the

[1] Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» (Federal Research Center "A.O. Kovalevsky Institute of Biology of Southern Seas of RAS", Sevastopol, Russian Federation), Российская Федерация, 299011, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2, e-mail: kurshackov@yandex.ru

[2] Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: vvtitov@yandex.ru

[1] **Оригинальный текст:** *Куршаков С.В., Титов В.В.* Динамика состава промысловой ихтиофауны водоемов восточного Приазовья в голоцене // Наука Юга России. 2021. Т. 17. № 1. С. 84–96.

Kerch Strait region, the Eastern part of the Sea of Azov region and Ciscaucasia, as well as the Don Delta. Only at the beginning of the 20th century, due to a significant increase of the human population and the subsequent construction of hydraulic facilities chain on the rivers, some species, particularly sturgeons, became rare and significantly reduced their area.

Keywords: ichthyofauna, Holocene, Neolithic, Eneolithic, Bronze Age, Iron Age, Middle Ages, lower course of the Don River, Kuban River, Sea of Azov.

ВВЕДЕНИЕ

Рыбный промысел для жителей Дона и Приазовья играл значительную роль на протяжении почти всего голоцена. Уникальные условия Азовского моря обеспечивали высокое разнообразие и численность ихтиофауны. Изучению остатков рыб из многочисленных археологических памятников региона посвящен целый ряд работ. Наиболее полные данные имеются по городищам среднего и позднего голоцена, которые раскапывались на протяжении многих лет, таких как Кобяковское, Нижне-Гниловское, Елизаветовское городища, Танаис, Фанагория, Пантикапей, Волна I, Азак и др. Наличие многослойных памятников дает возможность проследить динамику видового состава и размерного класса вылавливаемых рыб, а также интенсивность промысла на разных этапах истории в регионе. На сегодняшний день нет представления только о типе рыболовства в эпоху мезолита, поскольку памятники этого времени в рассматриваемом регионе охарактеризованы только каменными изделиями.

Целью исследования является анализ накопленных данных по ихтиофаунам из разновозрастных археологических памятников на территории юга Европейской России. Авторы не ставят перед собой цели выявить особенности хозяйствования различных народностей, населявших территорию Нижнего Дона, Кубани и Приазовья. Археоихтиологический материал позволяет уточнить уровень и динамику разнообразия рыб на разных этапах голоцена. При этом исследователи понимают, что материал из археологических слоев не дает достаточной информации о полном наборе не только вылавливаемых рыб, но и тем более обо всем комплексе ихтиофауны, существовавшем в районе поселений.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом послужили коллекции костных остатков рыб, собранных из археологических памятников Ракушечный Яр, Раздорская-1, Раздорская-2, Азовское крепостное городище, Елизаветовское городище и Азак, общей численностью более 5060 экземпляров костей. Использовались стандартные методики изучения ископаемых остатков рыб и реконструкции их индивидуального возраста и размеров, описанные в монографии В.Д. Лебедева [1]. Проанализирован и использован большой объем литературных данных по археологии и археозоологии, которые представлены в соответствующих разделах статьи.

Отчасти неполнота археозоологической летописи обуславливается спецификой археологических раскопок и худшей сохранностью остатков мелких видов. Зачастую использование мелкоячеистых сит для просеивания/промывки вмещающей породы культурного слоя позволяет значительно увеличить таксономический список животных, в том числе и рыб. В ходе выполнения наших исследований на ряде археологических памятников нами была применена промывка через сито в 1 мм.

В работе авторы используют систематику, приведенную в каталоге рыб морей России [2]. При этом все списки видов из литературных источников также приводятся согласно новой системе. Отдельного упоминания требует плотва. В бассейне Азовского моря сформировалась полупроходная форма плотвы обыкновенной *Rutilus rutilus*, которая в современном русском языке имеет название тарань. Она обладает более высокими вкусовыми качествами по сравнению со туводной формой. Таксономический статус тарани либо никак не обозначается и ее рассматривают как полупроходную форму *R. rutilus*, либо выделяют в подвид *R. r. heckelii* или в отдельный вид *R. heckelii* [2]. Идентификация по морфологическим признакам костей тарани, то есть полупроходной формы плотвы, на сегодняшний день не представляется возможной. Однако исходя из того, что в Азово-Донском бассейне и сегодня добывают тарань, являющуюся весьма востребованной на рынке, можно предположить, что и в историческое время вылавливалась в основном именно тарань, а не плотва. В тексте нами используется название «плотва *Rutilus rutilus*».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рыбный промысел в эпоху неолита и энеолита. Имеющиеся в настоящее время данные позволяют охарактеризовать рыбный промысел этого временного отрезка только на Нижнем Дону ввиду отсутствия сведений из других регионов Приазовья. Материал из таких памятников, как Раздорская-1, Раздорская-2, Ракушечный Яр (Ростовская область, Усть-Донецкий район), позволяет оценить как видовой состав добываемых рыб, так и динамику добычи этого пищевого ресурса.

По нашим данным, костные остатки рыб из неолитических слоев памятников Раздорская-1 и Раздорская-2 (9470 ± 300 л.н.) указывают на присутствие в уловах 11 видов: густера *Abramis bjoerkna*, лещ *A. brama*, жерех *Aspius aspius*, сазан *Cyprinus carpio*, язь *Leuciscus idus*, чехонь *Pelecus cultratus*, вырезуб *Rutilus frisii*, плотва *R. rutilus*, сом *Silurus glanis*, щука *Esox lucius* и судак *Sander lucioperca* [3]. Помимо указанных видов были идентифицированы позвонки, принадлежащие представителям семейства сельдевых (Clupeidae). В современном бассейне Дона, не считая дельты, из представителей этого семейства встречается два вида, которые заходят на нерест: азовский пузанок *Alosa caspia tanaica* и черноморско-азовская проходная сельдь *A. immaculata*. Также в выборке присутствовали сильно фрагментированные остатки покровных костей осетровых (Acipenseridae), относящихся к роду *Acipenser* (табл. 1). Все представленные виды рыб встречаются в современном Азово-Донском бассейне. Самую большую долю в уловах жителей Раздорской-2 составляла плотва (31 %), на втором месте лещ (20 %), затем судак (14 %) и сазан (10 %). Из всего остеологического материала видно, что приоритетов в вылове того или иного вида или особей определенного размера не было. Среди костных остатков были отмечены крупные позвонки сома возрастом около 19 лет, но чаще встречаются особи 3–11 лет (средний возраст 6,3 года). По данным Т.Д. Белановской [4], среди остатков сомов из неолитических слоев памятника Ракушечный Яр присутствовали экземпляры, принадлежавшие особям размером от 1 до 2,4 м и возрастом 10, 15 и 25 лет. Отмечены также многочисленные позвонки судаков возрастом от 2 до 7 лет (средний возраст около 6,5 лет). Возраст щуки колеблется от 2 до 5 лет. Встречаются фрагментарные костные остатки осетровых рыб, но в общем количестве они крайне малочисленны. Е.К. Сычевской [5], которая также определяла костные остатки рыб из археологического памятника Раздорская-2, были идентифицированы осетр *Acipenser* sp., елец *Leuciscus leuciscus*, плотва *Rutilus rutilus*, сом *Silurus glanis*, щука *Esox lucius* и судак *Sander lucioperca*.

Рыбы, приведенные в списке, вылавливались сетными орудиями (грузила для них изготавливались из мягких пород камня – сланца и песчаника), гарпунами и острогами, которые производились из костей животных, а также с помощью крючковых снастей. Использовались также плавсредства [4]. Редкая встречаемость осетровых рыб, вероятно, связана с отсутствием специализированных орудий для их лова. Промысел представителей семейства Acipenseridae в настоящее время осуществляется прочными сетями и крючковыми самоловными снастями в глубоких частях рек, например на фарватере и в ямах. На стоянке Раздорская-2 присутствовали остатки очагов, в которых были найдены обугленные кости карповых рыб, судаков, сомов, щук и др. Таким образом, в пищу, вероятно, употреблялись все добываемые виды. Учитывая значительное преобладание остатков рыб среди найденных костей наземных животных, очевидно, что основным источником белковой пищи для местного населения являлась рыба. По исследованиям, проведенным Т.Д. Белановской [4] и Е.А. Цепкиным [6], интенсивность рыболовства в раннем и среднем неолите Ракушечного Яра, наиболее вероятно, была такая же, как и в Раздорской-2. Интересно, что население Нижнего Дона, судя по материалам из Раздорской-2, кроме рыбы активно употребляло в пищу и других обитателей реки – моллюсков (в первую очередь живородок рода *Viviparus* Montfort, 1810), а также болотных черепах *Emys orbicularis* Linnaeus, 1758 [4].

Имевшиеся в нашем распоряжении костные остатки рыб из энеолитических слоев Ракушечного Яра и Раздорской-1 относятся к шести таксонам: стерлядь *Acipenser ruthenus*, осетр *Acipenser* sp., лещ *Abramis brama*, плотва *Rutilus rutilus*, рыбы семейства карповых Cyprinidae gen. indet. и сом *Silurus glanis*. Нужно отметить, что костные остатки рыб из этих слоев крайне малочисленны по сравнению с остатками домашних и диких млекопитающих. Небольшое количество находок не позволяет делать достоверные выводы о количестве и составе вылавливаемых рыб на данном временном отрезке. Из пластов 26, 27, 28 Раздорской-1 (конец V – середи-

Таблица 1. Костные остатки рыб из археологических памятников бассейна Кубани и Керченского пролива [14; 15; 19; 21]
Table 1. Fish bones remains from archaeological sites in the Kuban basin and the Kerch Strait [14; 15; 19; 21]

Виды Species	Керченский пролив Kerch Strait	Бассейн р. Кубань Kuban River basin
Dasyatidae		
Dasyatis pastinaca (Linnaeus,1758)	+	
Acipenseridae		
Acipenser gueldenstaedtii (Brandt et Ratzeburg, 1833)	+	+
A. huso (Linnaeus, 1758)	+	
A. nudiventris (Lovetsky, 1828)	+	
A. ruthenus (Linnaeus, 1758)	+	
A. stellatus (Pallas, 1771)	+	+
Engraulidae		
Engraulis encrasicolus (Linnaeus,1758)	+	
Clupeidae		
Clupeidae gen. sp.	+	
Cyprinidae		
Abramis brama (Linnaeus, 1758)	+	
Aspius aspius (Linnaeus, 1758)		+
Cyprinus carpio (Linnaeus, 1758)	+	+
Rutilus frisii (Nordmann, 1840)	+	+
R. rutilus (Linnaeus, 1758)	+	
Tinca tinca (Linnaeus, 1758)		+
Siluridae		
Silurus glanis (Linnaeus, 1758)	+	+
Esocidae		
Esox lucius (Linnaeus, 1758)	+	+
Percidae		
Sander lucioperca (Linnaeus, 1758)	+	+
Mugilidae		
Mugilidae gen. sp.	+	
Mullidae		
Mullus spp.	+	
Gobiidae		
Neogobius spp.	+	
Scombridae		
Sarda sarda (Bloch,1793)	+	
Scomber scombrus (Linnaeus, 1758)	+	
Thunnus thynnus (Linnaeus, 1758)	+	
Pleuronectiformes		
Pleuronectiformes gen. sp.	+	
Scophthalmidae		
Scophthalmus maeoticus (Pallas, 1814)	+	

на IV тысячелетия до н.э.) наибольшее количество находок принадлежит сому. Однако из пласта 29, порода из которого подверглась промывке через сито с ячеей 1 мм, около 80 % костных остатков относится к представителям семейства карповых (в том числе плотве). Обычными являются остатки осетровых (до 16 % в пласте 29) [7].

Таким образом, можно констатировать, что в неолите рыболовство имело первостепенное значение на территории Нижнего Дона. При этом особой избирательности в выловах не наблюдалось. Малое количество остатков осетровых рыб объясняется отсутствием эффективных методов лова. В энеолите Нижнего Дона рыбный промысел ушел на второй план и начало преобладать животноводство. Объектами несистематического рыболовства являлись сомы и осетровые наряду с другими обычными для Дона видами рыб.

Рыбный промысел в эпоху бронзы. Недостаточность археоихтиологической информации из памятников бронзы (III–II тыс. лет до н.э.) не позволяет проследить характеристики рыболовства на протяжении всей эпохи бронзы и на территории Приазовья. Однако в период финальной бронзы (кобяковская культура XII–X веков до н.э.) Нижнего Дона местное население интенсивно занималось рыболовством. Так, в слоях поздней бронзы Нижне-Гниловского городища костные остатки рыб составляли до 53,8 % от общего количества остеологического материала, а в Кобяковском городище – более 83,7 % (в расчет принимались только остатки рыб крупного размера) [8].

Среди уловов этого времени определено 13 видов рыб: осетр *Acipenser gueldenstaedtii*, стерлядь *A. ruthenus*, севрюга *A. stellatus*, лещ *Abramis brama*, жерех *Aspius aspius*, сазан *Cyprinus carpio,* чехонь *Pelecus cultratus*, вырезуб *Rutilus frisii*, плотва *R. rutilus*, красноперка *Scardinius erythrophthalmus*, сом *Silurus glanis*, щука *Esox lucius* и судак *Sander lucioperca.* Наибольшим спросом пользовались сом, судак, лещ и осетровые. Второстепенное значение имел сазан. Исследователи обращали внимание на отсутствие остатков белуги в культурных слоях Кобяковского и Нижне-Гниловского городищ, что связывалось с ее редкостью [9; 10] или трудностями лова этой крупной рыбы [11]. Размеры вылавливаемых сомов колебались от 40 до 310 см (в среднем 165 см), а судаков от 25 до 90 см (в среднем 61,3 см). Восстановленные размеры лещей составляли 15–55 см (в среднем 42,2 см), сазанов – 45–130 см (в среднем 70,6 см), плотвы – 15–42 см (в среднем 32,7 см). Известны также остатки осетровых, размеры которых составляли: русских осетров – 50–165 см (в среднем 71,4 см), стерлядей – 55–100 см (в среднем 71,7 см), севрюги – 118–171 см (в среднем 149,1 см) [9; 10].

Состав промысловых рыб эпохи поздней бронзы не отличался от современного состава рыб Нижнего Дона. Судя по всему, активный промысел не отражался на биологических показателях рыб. Средние размеры стерляди, сома и судака в уловах были несколько больше, чем у этих же видов в настоящее время. Ископаемый осетр, очевидно, имел в то время медленно растущую жилую форму. Найденные многочисленные каменные грузила указывают на существование в рассматриваемый период сетных орудий лова [9; 10; 12]. Находки металлических крючков говорят и о распространенности ловли рыбы на удочку [8]. Наличие большого числа костных остатков осетровых свидетельствует о совершенствовании орудий лова в сравнении с неолитом и энеолитом.

Рыбный промысел в раннем железном веке. Особенности рыбного промысла в Приазовье в раннем железном веке, за исключением предскифского периода, довольно хорошо изучены благодаря многочисленным и зачастую многослойным археологическим памятникам, исследованным в этом регионе. На территории Нижнего Дона и Северо-Восточного Приазовья располагался стык трех крупнейших этнокультурных массивов этого периода – скифов, савромато-сарматов и меотов. К тому же на развитие региона повлияла активная греческая колонизация территории Подонья и Приазовья [13]. Исторические хроники и археологические находки (например, рыбозасолочные ванны) указывают на то, что в раннем железном веке население помимо использования рыбных ресурсов для внутреннего потребления заготавливала их часть для продажи на экспорт в другие регионы. Для добычи использовались как рыболовные сети, так и удебные орудия лова, о чем свидетельствуют находки каменных и глиняных грузил для сетей, металлических (железных и бронзовых) крючков.

Характеристики рыболовства в данный период в регионах Приазовья различались из-за особенностей хозяйствования разных народностей и расположения поселений. На основе географического распространения остатков рыб для раннего железного века Азово-Черноморского региона было выделено несколько археоихтиологических провинций, три из которых относятся к Приазовью [14].

Первая археоихтиологическая провинция связана с районом Керченского пролива. В частности, в культурных слоях памятников, располагавшихся на азовском побережье Таманского и Керченского полуостровов в непосредственной близости к проливу в Черное море, кроме остатков проходных и полупроходных рыб становятся обычными находки костей морских рыб, таких как бычки *Negobius* spp., кефаль Mugilidae gen. indet., калкан *Scophthalmus maeoticus*, тунец *Thunnus thynnus*, скат-хвостокол *Dasyatis pastinaca* [1; 15]. Несмотря на явные свидетельства наличия рыбозасолочных комплексов, общее количество костных остатков рыб в культурных слоях в прикерченской зоне Приазовья довольно мало и составляет незначительную часть от общего числа костей животных (например, в Волне I не более 1,3 %) [16]. Это, вероятно, связано с недоучтенностью остатков таких мелких сельдеобразных рыб, как хамса *Engraulis* sp. и килька *Clupeonella cultriventris*, а также бычков и султанки *Mullus* spp. Наблюдается изменение количества рыбных остатков в культурных слоях разного времени. В частности, для Фанагории количество костей рыб в период поздней архаики – ранней классики составляло 2,4 %, в классический период – 40,4 %, в эллинистический период – 9,2 %, а в римский – 3,8 % от количества всех костных остатков [17; 18]. Общий список вылавливаемых рыб включает черноморского ската-хвостокола *Dasyatis pastinaca*, русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii*, белугу *A. huso*, шипа *A. nudiventris*, стерлядь *A. ruthenus*, севрюгу *A. stellatus*, хамсу *Engraulis* sp., сельдевых (Clupeidae), леща *Abramis brama*, сазана *Cyprinus carpio*, вырезуба *Rutilus frisii*, плотву *R. rutilus*, сома *Silurus glanis*, щуку *Esox lucius*, кефалевых (Mugilidae), судака *Sander lucioperca*, бычков *Negobius* spp., тунца *Thunnus thynnus*, камбалу-калкана *Scophthalmus maeoticus* и других камбал (Pleuronectiformes) [14; 15]. Из летописей известно, что в районе Керченского пролива добывали кефаль, скумбрию, сельдь, бычков, анчоусов (хамсу), султанку (барабульку), пеламиду и тунца [11]. Исследователями отмечается значительное количество остатков осетровых рыб (в первую очередь севрюги), судака и сазана. Для некоторых памятников (Тиритака, Мирмекий, I–III века н.э., Керченский полуостров) отмечается преобладание остатков сельди и хамсы, что в совокупности с большим количеством раскопанных рыбозасолочных ванн указывает на специализацию некоторых поселений на консервировании рыбной продукции [11]. Указывается также, что средние размеры добываемых рыб (в частности, севрюги и сазана) превышали таковые из современных уловов. По данным о находках из античных слоев Фанагории и Пантикапея, размеры выловленных особей составляли для севрюги 127–168 см (в среднем 141,7 см), для сазана – 50,7–78 см (в среднем 66,8 см), для судака – 45–77 см (в среднем 58,6 см), для тунца – 227,4–275,4 см [15].

Вторая археоихтиологическая провинция относится к территории Восточного Приазовья и Предкавказья. Данные по рыболовству происходят из целого ряда поселений/городищ меотов с территории современных Краснодарского края и Ростовской области: с низовий р. Кубань – Семибратнее городище (ст. Варениковская, V–II века до н.э.); с Приазовской низменности – «Чумяный редант» (Приморско-Ахтарский район, II–III века н.э.), «Мёртвый редант» (Приморско-Ахтарский район, II век до н.э. – II–III века н.э.), Ново-Джерешевская-3 (Брюховетский район, IV век до н.э – II–III века н.э.); со Средней Кубани – Елизаветинское городище (окр. г. Краснодар, IV век до н.э. – III век н.э.), Казанское-1 (I–II века н.э.); с низовий р. Дон – Азовское крепостное городище (г. Азов, I век до н.э. – I век н.э.), Кобяковское (г. Ростов-на-Дону, I–III века н.э.), Нижне-Гниловское (г. Ростов-на-Дону, I–III века н.э.) [1; 9; 10; 15; 16; 20]. Меоты вылавливали и потребляли большое количество рыбы и при этом активно охотились на диких птиц и зверей. Известно также, что рыбу они вывозили в консервированном виде и использовали ее для принесения в жертву божествам в ходе ритуальных действий [21].

В низовьях р. Кубань вылавливались осетр *Acipenser gueldenstaedtii*, севрюга *A. stellatus*, лещ *Abramis brama*, жерех *Aspius aspius*, сазан *Cyrpinus carpio*, вырезуб *Rutilus frisii*, линь *Tinca tinca*, щука *Esox lucius*, сом *Silurus glanis* и судак *Sander lucioperca* [19; 21]. Наибольший процент остеологического материала приходится на кости судака (до 52 %), сазана (до 31 %) и леща (до 11 %). Среди осетровых преобладала севрюга (до 1,2 %), а белуга и стерлядь не отмечались. Интересно, что среди выловленных видов не встречается тарань.

Из поселений, располагавшихся по берегам многочисленных лиманов в Восточном Приазовье (Приазовская низменность), определены остатки осетра *Acipenser* sp., севрюги *A. stellatus*, сазана *Cyrpinus carpio*, щуки *Esox lucius* и судака *Sander lucioperca* [15]. Наиболее часто вылавливаемыми были судак и сазан. В Среднем Прикубанье среди остатков рыб отмечены многочисленные сазан и сом. Сводные данные представлены в таблице 1.

Размеры судака из бассейна р. Кубань колебались в пределах 20–65 см (в среднем около 50 см), сазана – 35–65 см (в среднем 53,8 см), севрюги – 83–114 см (в среднем 118,2 см), сома – 11–290 см (в среднем 195,25 см) [15]. При этом нужно отметить, что, несмотря на находки целых слоев с костями и чешуей рыб, их доля от общего объема костных остатков животных была относительно невелика. В частности, для Казанской-1 на их долю приходилось около 1,3 % всех остатков [16].

Несколько иная картина с промысловыми рыбами наблюдается в меотических поселениях на Нижнем Дону. Из культурных слоев Кобяковского и Нижне-Гниловского городищ, датируемых I–III веками н.э., определены осетр *Acipenser gueldenstaedtii*, белуга *A. huso*, шип *A. nudiventris*, стерлядь *A. ruthenus*, севрюга *A. stellatus*, лещ *Abramis brama*, жерех *Aspius aspius*, сазан *Cyprinus carpio*, чехонь *Pelecus cultratus*, вырезуб *Rutilus frisii*, плотва *R. rutilus*, красноперка *Scardinius erythrophthalmus*, сом *Silurus glanis*, щука *Esox lucius* и судак *Sander lucioperca*. Наибольшее количество из найденных костей рыб принадлежало сому (Нижне-Гниловское – 34,8 %, Кобяковское – 14,3 %), осетру (Нижне-Гниловское – 28,2 %, Кобяковское – 10,1 %), севрюге (Нижне-Гниловское – 15,6 %, Кобяковское – 8,1 %), стерляди (Нижне-Гниловское – до 10,7 %, Кобяковское – 4,2 %), сазану (Нижне-Гниловское – 6 %, Кобяковское – 9,5 %) и судаку (Нижне-Гниловское – 3,7 %, Кобяковское – 10,1 %). Размеры вылавливаемых сомов были в пределах 60–450 см (в среднем 178,4 см для Нижне-Гниловского, 164,8 см для Кобяковского), судаков – 40–95 см (в среднем 65,8 см для Нижне-Гниловского, 61,4 см для Кобяковского), сазанов – 30–115 см (в среднем 67,9 см для Нижне-Гниловского, 71,7 см для Кобяковского), осетров – 45–140 см (в среднем 71,9 см для Нижне-Гниловского, 71,4 см для Кобяковского), севрюги – 120–190 см (в среднем 142,2 см для Нижне-Гниловского, 154,2 см для Кобяковского) [9; 10; 22].

Основными промысловыми видами у населения Азовского крепостного городища были сом (55 %) и судак (19 %), второстепенное значение имели плотва (до 9 %) и сазан (до 9 %). Количество осетровых в выборке относительно невелико и составляет всего 8,1 % от всех определенных костных остатков рыб. Из них наиболее многочисленны находки стерляди. Помимо уже указанных для Нижнего Дона видов определен еще и окунь *Perca fluviatilis*. Размер сомов колебался от 53 до 198 см, возраст от 1 года до 18 лет (в среднем 148,9 см и 9,2 года). Средний размер судака составлял 57 см при среднем возрасте 5,3 года [20]. Ранее некоторые глоточные зубы карповых из этого городища относились нами к вырезубу *Rutilus frisii*, однако дальнейшее исследование показало, что это были крупные (более 30 см длиной) особи плотвы *R. rutilus,* вероятнее всего тарани, которые питаются, как и вырезубы, моллюсками. За счет этого у них формируется схожая форма глоточных зубов.

Доля костных остатков рыб в культурных слоях упомянутых памятников была довольно высокой – в Нижне-Гниловском городище до 34,2 %, в Азовском крепостном городище – до 29,5 % [17].

Третья археоихтиологическая провинция относится к поселениям, расположенным в дельте Дона. Археоихтиологический материал происходит из культурных слоев эпохи античности Елизаветовского и Недвиговского (Танаис) городищ. Данные из этих двух археологических многослойных памятников, расположенных в приустьевой части р. Дон, позволяют проследить динамику рыболовства на нескольких временных срезах: в эллинистический период (V–IV века до н.э., III – середина I века до н.э.) и римский период (конец I века до н.э. – III век н.э., IV век н.э., V–VI века н.э.).

Ихтиофауна из Елизаветовского городища (V–IV века до н.э.) представлена такими промысловыми видами, как осетр *Acipenser gueldenstaedtii*, белуга *A. huso*, стерлядь *A. ruthenus*, севрюга *A. stellatus*, лещ *Abramis brama*, сазан *Cyprinus carpio*, плотва *Rutilus rutilus*, сом *Silurus glanis*, щука *Esox lucius*, судак *Sander lucioperca*, окунь *Perca fluviatilis*. Использование мелкоячеистых сит для промывки вмещающей породы из культурного слоя позволило увеличить список видов рыб еще на 3 вида (жерех *Aspius aspius*, чехонь *Pelecus cultratus* и голавль *Squalius cephalus*). Помимо определенных по костным остаткам видов отмечалось присутствие слоев рыбьей чешуи мощностью до 0,2 м и площадью до нескольких десятков квадратных метров [23]. Общая доля остатков рыб от всех остатков животных достигала порядка 7 %, хотя количество костей рыб на разных участках раскопа могло значительно изменяться: от 0,9 до 36,1 % [16]. Доля карповых рыб превосходит других по количеству костных остатков и чешуе (особенно выделяется плотва).

В античных памятниках Нижнего Дона отмечается отсутствие находок рыболовных крючков, но при этом получено большое количество массивных грузил и приспособлений для плетения сетей. Это указывает на широкое использование плавных и ставных сетей различного размера [23].

Из разных слоев Танаиса определены: осетр *Acipenser gueldenstaedtii*, белуга *A. huso*, стерлядь *A. ruthenus*, севрюга *A. stellatus*, лещ *Abramis brama*,

Таблица 2. Костные остатки рыб из археологических памятников Нижнего Дона. Цифрами указано количество определённых костей.
Table 2. Fish bones remains from the archaeological sites of the Lower Don. The numbers indicate the number of determinate bones.

Вид Species	Раздорская-2, 9470 л. н. (по [5], собственные данные) / Razdorskaya-2, 9470 years ago (by [5], own data)	Раздорская-1, V–IV тысячелетия до н.э. / Razdorskaya-1, V–IV milleniums BC	Нижний Дон, IV тысячелетие до н.э. (по [6]) / Lower Don, IV millenium BC (by [6])	Недвиговское городище (Танаис), IV–V века н.э. (по [25]) / Nedvigovka settlement (Tanais), IV–V AD (by [25])	Нижне-Гниловское городище, XII–X века до н.э. (по [9]) / Nizhne-Gnilovskoe settlement, XII–X BC	Нижний Дон, II тысячелетие до н.э. – IV век н.э. (по [6]) / Lower Don, II millennium BC – IV AD (by [6])	Танаис, II–I века до н. э. (по [24]) Tanais, II–I BC (by [24])	Кобяковское городище, XII–X века до н.э. (по [10]) / Kobyakovo settlement, XII–X BC (by [10])	Елизаветовское городище, V–IV века до н.э. (по [17; 23]) / Elizavetovka settlement, V–IV BC (by [17; 23])	Азовское крепостное городище, I век до н.э. – I век н.э. (по [20]) / Azov fortress settlement, I BC – I AD (by [20])	Нижне-Гниловское городище, I–III века н.э. (по [9]) / Nizhne-Gnilovskoe settlement, I–III AD (by [9])	Кобяковское городище, I–III века н.э. (по [10]) / Kobyakovo settlement, I–III AD (by [10])	Азак, XIII век (по [29; 30; 32]) Azak, XIII AD (by[29; 30; 32])	Азак, XIII век (по [28]) Azak, XIII AD (by [28])
					Acipenceridae									
Acipenser gueldenstaedtii (Brandt et Ratzeburg, 1833)				60	22	2183	43	517	6		588	632	4	
A. huso (Linnaeus, 1758)				3		293					4	11	2	
A. nudiventris (Lovetsky, 1828)						1					1			
A. ruthenus (Linnaeus, 1758)		1		199	10	1382	17	133		72	222	261	31	
A. stellatus (Pallas, 1771)				135	10	1731	26	298		9	352	509	10	12
Acipenser sp.	5	17								5			40	
					Cyprinidae									
Cyprinus sp.		48											11	
Abramis ballerus (Linnaeus, 1758)										1				
A. bjoerkna (Linnaeus, 1758)	6													
A. brama (Linnaeus, 1758)	67	3		27		324	10	170		28		106	11	47
Aspius aspius (Linnaeus, 1758)	21			2		34		10	1	18	4	10	7	1
Cyprinus carpio (Linnaeus, 1758)	33		6	192	1	1660	31	455	1	359	124	662	4	17
Leuciscus idus (Linnaeus, 1758)	1													
Pelecus cultratus (Linnaeus, 1758)	28					5		1		2		4	12	
Rutilus frisii (Nordmann, 1840)	8			4		9	3	2		11		1		
R. rutilus (Linnaeus, 1758)	102	15	96	4		398		41	40	365	1	319	82	3
Scardinius erythrophthalmus (Linnaeus, 1758)						5		2				3	1	
Squalius cephalus (Linnaeus, 1758)									1					
					Siluridae									
Silurus glanis (Linnaeus, 1758)	11	43	12	1605	199	8312	109	2395	7	2439	723	3121	106	42
					Esocidae									
Esox lucius (Linnaeus, 1758)	10		12	26		75		18		42	11	27		
					Percidae									
Perca fluviatilis (Linnaeus, 1758)	1			4						1				
Sander lucioperca (Linnaeus, 1758)	53			185	9	2820	25	1550	1	826	78	672	35	9

жерех *Aspius aspius*, сазан *Cyprinus carpio*, вырезуб *Rutilus frisii*, плотва *R. rutilus*, сом *Silurus glanis*, щука *Esox lucius*, окунь речной *Perca fluviatilis* и судак *Sander lucioperca* [24; 25]. Особых различий в видовом составе из разновозрастных слоев не отмечалось. При этом указывалось, что соотношение костей разных видов рыб, полученных в разные годы раскопок, изменялось [24]. Рыболовство играло значительную роль в жизни населения Танаиса – доля костных остатков рыб достигала 25,5 % от всех остатков животных [16]. Среди них преобладали кости сомов (около 36 %), стерлядей (20,5 %), судаков (около 15 %), сазанов (около 9 %). Второстепенное значение имели лещ (около 4,7 %), щука (около 3,6 %) и севрюга (3,2 %) [25]. Было отмечено, что максимальные размеры рыб были такими же, как и современные, однако в II–I веках до н.э. показатели среднего размера были значительно больше, чем в наше время.

Отмечается общий характер рыболовства в античных городищах Нижнего Дона и близких по возрасту меотических поселениях региона (Кобяковском и Нижне-Гниловском поселениях); среди всех найденных костей животных существенной была доля остатков рыб; в выловах преобладали сомы, а также в них отмечается довольно большое количество осетровых и некоторых видов карповых рыб, в то время как для меотических памятников с территории Прикубанья характерно преобладание остатков судака и сазанов. Меотические поселения с территории Таманского и Керченского полуостровов характеризуются относительно малой долей остатков крупных рыб, при этом значительным количеством находок осетровых и сельдевых, а также находками костей морских видов – кефалей, камбал, тунцов и скатов.

Рыбный промысел в средневековье. Важное место в хозяйственной деятельности населения Хазарского каганата Нижнего Дона (VII – середина X века) занимал рыбный промысел. Так, доля остатков рыб среди костей других животных в Саркеле (Ростовская область, Цимлянский район) составляла 10,2 % (учитывались кости только крупных рыб), а в Салтово-Маяцком поселении возле г. Константиновск – 10,8 % [16; 26]. Об этом же говорит значительный набор различных рыболовных приспособлений, найденных в культурных слоях памятников этого времени: крючных снастей, сетей, колющих орудий и запорных систем. Основными промысловыми видами рыб являлись осетр, сом, сазан, судак, лещ, вырезуб, карась и тарань. При этом отмечается, что анализ материала свидетельствует о преобладании средней и мелкой рыбы [27].

В XIII–XIV веках на Нижнем Дону рыболовство также было важной частью хозяйствования. Рыбу использовали для потребления на внутреннем рынке, а также активно экспортировали. Например, в Куричанском поселении (Неклиновский район, северный берег Таганрогского залива, X–XII века) находки остатков рыб составляли более 36 % всех костей животных [16]. На основании материалов из городища Азак (г. Азов, Ростовская область) выявлен список промысловых рыб, включающий 24 вида, обычных для р. Дон, в том числе осетра *Acipenser gueldenstaedtii*, белугу *A. huso*, стерлядь *A. ruthenus*, севрюгу *A. stellatus*, леща *Abramis brama*, рыбца *A. vimba*, жереха *Aspius aspius*, сазана *Cyprinus carpio*, чехонь *Pelecus cultratus*, вырезуба *Rutilus frisii*, плотву *R. rutilus*, сома *Silurus glanis*, щуку *Esox lucius* и судака *Sander lucioperca* (табл. 2). Основными промысловыми видами у местного населения были сом (до 30 %), судак (до 24 %), плотва (до 23 %) и стерлядь (до 19,2 %) ([28], собственные данные). Общая доля осетровых рыб в некоторых слоях доходит до 25 %. Доля костных остатков рыб среди других костей в культурном слое разных районов этого золотоордынского города составляла от 2,3 до 15,7 % [29]. В поселении Казачий Ерик (дельта Дона, вторая половина XII века) на долю находок костей рыб приходилось около 28 % от всего археозоологического материала [30].

В позднем средневековье рыбный промысел был одним из основных источников пропитания, особенно для среднего и низшего классов общества, а также в периоды неурожаев и войн. Показательно, что для гарнизона Семёновской крепости (устье р. Миус, первая половина XVIII века) рыба составляла значительную часть рациона (до 86 % всех костных остатков) [30]. Письменные источники говорят о том, что и в период осады Азовской крепости (1638 г.) рыба была основной пищей казаков [6].

Впоследствии для жителей Приазовья и Нижнего Дона рыба также имела ценность в качестве источника еды, разнообразного сырья и объекта торговли (рис. 1). В конце XIX – начале XX века на Дону 55 видов рыб имели промысловое значение. Из них помимо красной рыбы (осетровые)

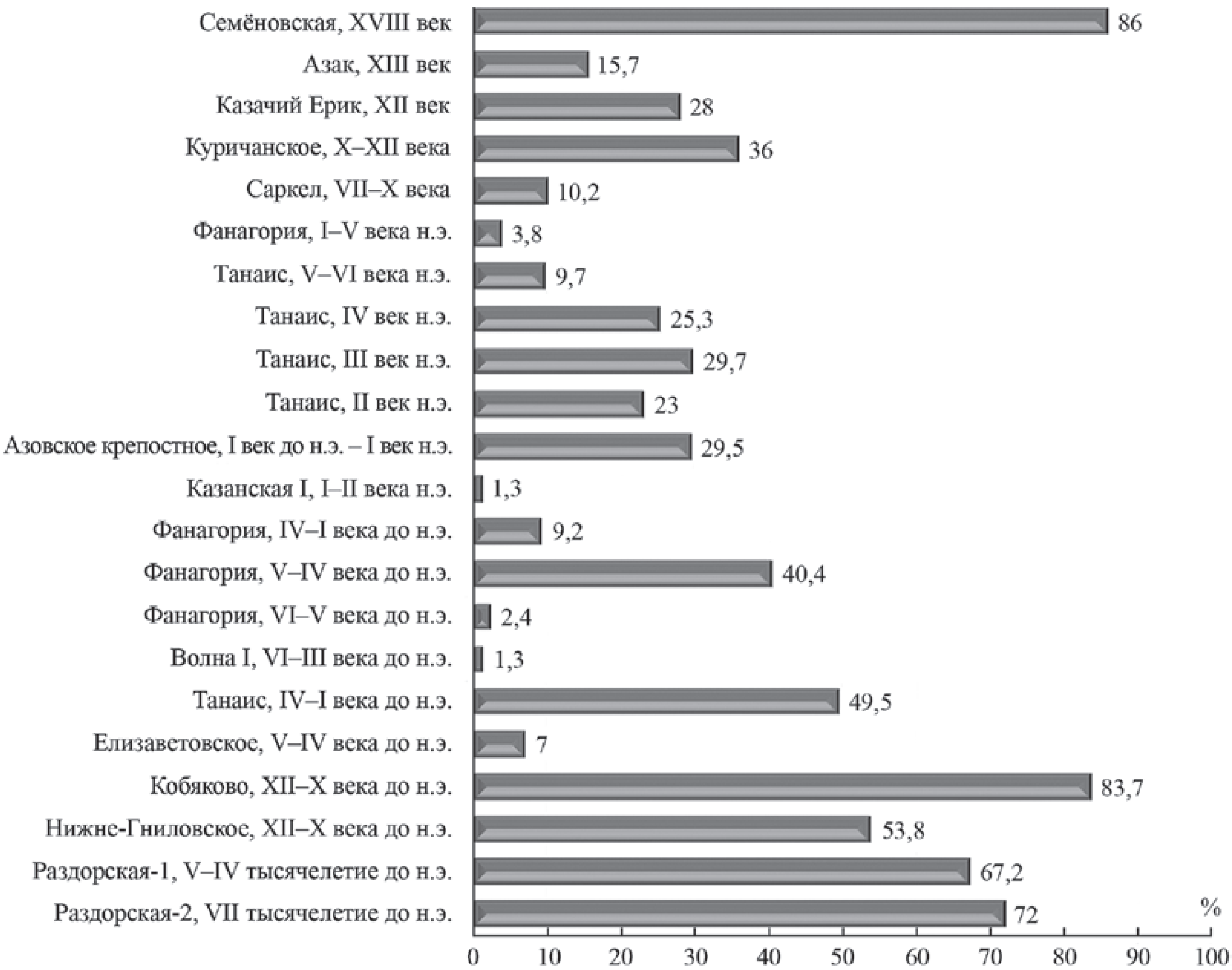


Рис 1. Доля костных остатков рыб в культурных слоях археологических памятников Приазовья, Нижнего Дона и Кубани (данные по [8; 17; 18; 28–30; 32]; собственные данные).
Fig. 1. The portion of fish bones remains in the cultural layers of the archaeological sites of the Sea of Azov Region, the Lower Don and the Kuban rivers (data from [8; 17; 18; 28–30; 32]; own data).

наибольшей популярностью пользовались сельдь, сазан, лещ и судак. При этом интенсивный вылов уже в то время, задолго до появления плотин и зарегулирования стока реки, приведших к нарушению нерестовых миграций рыб, вызвал значительное сокращение численности таких видов, как белуга, шип, севрюга и тарань. Из осетровых в начале XX века в бассейне р. Дон обычной оставалась только стерлядь. Примечательно, что камбала была вполне обычным обитателем Азовского моря, встречаясь в море и гирлах реки, не заходя выше в р. Дон [31]. В.В. Богачёв [31] также отмечал, что в начале XX века в Дону произошло уменьшение количества белой рыбы и сельди в 2–3 раза по сравнению с серединой XIX века.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ добываемой населением Приазовья, а также нижних течений рек Кубань и Дон рыбы на разных этапах голоцена подтверждает выводы других исследователей о важной роли этого вида деятельности начиная с неолита [1; 6]. Количество и видовой состав вылавливаемой рыбы в значительной степени изменялись в разные эпохи в зависимости от предпочтений жителей, наличия других источников белковой пищи, степени вовлеченности населения в торговлю водными биоресурсами. В неолите на долю рыбы приходилась существенная часть при добыче пропитания. Но с развитием животноводства рыболовство ушло на второй план, что в общем сохраняется и до наших дней. Несмотря на активный промысел, заметных различий в размерах и видовом разнообразии рыб на протяжении последних 9,5 тыс. лет не наблюдается. Размеры вылавливаемых в прошлом рыб в общем сходны с современными и отличаются только несколько бóльшими средними показателями [6]. Согласно археоихтиологическим данным, в Нижнем Дону, в Кубани и в Азовском море с неолита до современности наблюдается сходный видовой состав рыб, что указывает на отсутствие в этот временной отрезок существенных изменений условий указанных водоемов. И только в начале XX века в связи со значительным увеличением численности населения отдельные виды ценных промысловых видов стали редкими и значительно сократили свой ареал. Строительство речных гидротехнических сооружений, препятствующих нересту и свободной миграции рыб, а также изменения гидрохимических и седиментационных условий в низовьях рек и в море только усугубили данную тенденцию [32].

Исследования последних лет показали, что получаемый в результате стандартных методов археологических раскопок материал не позволяет в полной мере выявить реальное разнообразие ихтиофауны прошлых времен. Только использование мелкоячеистых сит для промывки/просеивания вмещающей породы культурных слоев дает возможность расширить список вылавливавшихся ранее видов рыб за счет обнаружения остатков сельдевых, бычковых и мелких карпообразных.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны К.В. Кузищину за полезные замечания к тексту рукописи. Работа выполнена в рамках темы НИР ФИЦ ИнБЮМ № АА-АА-А19-119060690014-5 (для С.В. Куршакова) и гранта РНФ № 16-17-10170-П (для В.В. Титова).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев В.Д. 1960. *Пресноводная четвертичная ихтиофауна европейской части СССР*. М., изд-во МГУ: 403 с.
2. Парин Н.В., Евсеенко С.А., Васильева Е.Д. 2014. *Рыбы морей России. Аннотированный каталог*. М., Товарищество научных изданий КМК: 733 с.
3. Куршаков С.В. 2013. Место рыболовства в хозяйственной деятельности человека в эпоху неолита и энеолита. В кн.: *Динамика современных экосистем в голоцене: материалы III Всероссийской научной конференции (с международным участием) (Казань, 12–15 марта 2013 г.)*. Казань, Отечество: 219–220.
4. Белановская Т.Д. 1975. К вопросу о рыболовстве на Нижнем Дону. *Краткие сообщения Института археологии*. 141: 107–111.
5. Сычевская Е.К. 2008. Определение остатков рыб из неолитической стоянки Раздорская-2. Раскоп 4 – 2003 г. В кн.: *Неолит Нижнего Дона и Северо-Восточного Приазовья*. Ростов н/Д, Изд-во АПСН СКНЦ ВШ ЮФУ: 100–101.
6. Цепкин Е.А. 1989. К истории промысловой ихтиофауны и рыболовства в бассейне Дона. *Вопросы ихтиологии*. 29(5): 771–776.
7. Титов В.В., Кашибадзе В.Ф., Дюжова К.В., Ковалева Г.В., Куршаков С.В., Фролов П.Д., Тесаков А.С. 2018. Палеоэкологические характеристики энеолита Нижнего Дона (на основании материалов из многослойного памятника Раздорское I). *Stratum plus*. 2: 303–315.
8. Шарафутдинова Э.С. 1980. *Памятники предскифского времени на Нижнем Дону (кобяковская культура)*. Л., Наука: 88 с.
9. Житенева Л.Д. 1966. Рыбы Нижне-Гниловского городища (эпоха бронзы, I–III вв. н.э.). *Вопросы ихтиологии*. 6(2): 222–236.
10. Житенева Л.Д. 1968. Рыбы Кобякова городища (эпоха поздней бронзы, I–III вв. н.э.). *Зоологический журнал*. 27(2): 269–282.
11. Марти В.Ю. 1941. Возникновение и развитие рыбного промысла в Азово-Черноморском бассейне. *Природа*. 5: 78–83.
12. Тихий М.И. 1927. Промысловые рыбы из Кобякова городища. *Природа: популярный естественно-исторический журнал*. 6: 509–510.
13. *Археология Нижнего Дона: учебник (проспект)*. 2013. Ростов н/Д, изд-во ЮФУ: 64 с.
14. Morales A., Antipina E., Antipina A., Roselló E. 2007. An ichthyoarchaeological survey of the ancient fisheries from the Northern Black Sea. *Archaeofauna*. 16: 117–172.
15. Лебедев В.Д., Лапин Ю.Е. 1954. К вопросу о рыболовстве в Боспорском царстве. В кн.: *Материалы и исследования по археологии СССР. 33. Материалы и исследования по археологии Северного Причерноморья в античную эпоху II*. М., изд-во АН СССР: 197–214.
16. Байгушева В.С. 2011. Субфоссильные остатки рыб в Приазовье. В кн.: *Историко-археологические исследования в Азове и на Нижнем Дону в 2009 г. Вып. 25*. Азов, изд-во Азовского музея-заповедника: 456–466.
17. Добровольская Е.В. 2008. Новые археозоологические материалы из раскопок Фанагории (2005–2007 гг.). В кн.: *Труды II (XVIII) Всероссийского археологического съезда в Суздале. Т. 3 (Суздаль, 20–25 октября 2008 г.)*. М., изд-во Института археологии РАН: 347–350.
18. Юрцева А.О. 2016. Кости рыб из Фанагории (раскопки 2006–2013 гг.) В кн.: *Фанагория. Результаты археологических исследований. Том 4. Материалы по археологии и истории Фанагории. Вып. 2*. М., изд-во Института археологии РАН: 353–360.
19. Житенева Л.Д. 1965. К вопросу о рыболовстве у синдов (по материалам раскопок Семибратнего городища, VI–II вв. до н.э.).

Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. 70(5): 50–59.

20. Куршаков С.В. 2014. Материалы изучения остатков рыб из меотских городищ Нижнего Дона (по результатам исследования Крепостного городища, г. Азов, I в. до н.э. – I в. н.э.). В кн.: *Историко-археологические исследования в г. Азове и на Нижнем Дону в 2012 г. Вып. 28.* Азов, изд-во Азовского музея-заповедника: 334–342.
21. Анфимов Н.В. 1983. Рыбный промысел у меотов. В кн.: *Проблемы археологии и этнографии. Вып. II. Историческая этнография: традиции и современность*. Л., изд-во Ленинградского университета: 117–124.
22. Мягкова Ю.Я., Васильева А.В. 2002. Животные Нижне-Гниловского городища. В кн.: *IV Донские археологические чтения*. Ростов н/Д: 34–39.
23. Житников В.Г. 1992. Рыбный промысел в хозяйственной системе Елизаветовского городища на Дону. В кн.: *Донские древности. Вып. 1.* Азов, изд-во Азовского краеведческого музея: 68–78.
24. Цепкин Е.А. 1970. Новые данные к истории рыбного промысла в Танаисе. *Краткие сообщения института археологии*. 124: 115–117.
25. Васильева А.В. 1999. Особенности рыбного промысла населения Недвиговского городища. *Донская археология*. 3–4: 68–71.
26. Плетнёва С.А. 1996. *Саркел и «шёлковый путь»*. Воронеж, изд-во Воронежского ун-та: 168 с.
27. Кулаков А.А. 2010. Рыбный промысел у населения Хазарского каганата (по материалам памятников Нижнего Дона). В кн.: *Боспорские чтения. Вып. XI. Боспор Киммерийский и варварский мир в период античности и средневековья. Ремесла и промыслы.* Керчь, Керченская городская типография: 266–269.
28. Васильева А.В. 1998. Об остатках рыб времен Золотой орды. В кн.: *Историко-археологические исследования в Азове и на Нижнем Дону в 1995–1997 гг. Вып. 15.* Азов, изд-во Азовского музея-заповедника: 300–304.
29. Байгушева В.С., Тимонина Г.И. 2006. Зооархеологические комплексы Азака XIV века (данные 2005 года). В кн.: *Историко-археологические исследования в Азове и на Нижнем Дону в 2005 г. Вып. 22.* Азов, изд-во Азовского музея-заповедника: 139–146.
30. Мягкова Ю.Я. 2002. Эколого-этнические аспекты в использовании млекопитающих в двух средневековых поселениях. В кн.: *Международные отношения в бассейне Чёрного моря в древности и средние века*. Ростов н/Д, изд-во Ростовского педагогического университета: 138–140.
31. Богачёв В.В. 1919. *Очерки географии Всевеликого Войска Донского.* Новочеркасск, издание Отдела народного просвещения Всевеликого Войска Донского: 523 с.
32. Матишов Г.Г., Титов В.В., Ковалёва Г.В., Польшин В.В., Дюжова К.В., Байгушева В.С., Зайцев А.В., Ильина Л.П., Нестерук Г.В., Сушко К.С., Тимонина Г.И., Куршаков С.В., Невидомская Д.Г. 2019. *Палеогеография Приазовья в голоцене*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 384 с.

REFERENCES

1. Lebedev V.D. 1960. *Presnovodnaya chetvertichnaya ikhtiofauna evropeyskoy chasti SSSR.* [*Freshwater Quaternary ichthyofauna of the European part of the USSR*]. Moscow, Moscow State University: 403 p. (In Russian).
2. Parin N.V., Evseenko S.A., Vasil'eva E.D. 2014. *Ryby morey Rossii. Annotirovannyy katalog.* [*Fishes of Russian seas: Annotated Catalogue*]. Moscow, KMK Scientific Press Ltd.: 733 p. (In Russian).
3. Kurshakov S.V. 2013. [The place of fishing in human economic activity in the Neolithic and Eneolithic periods]. In: *Dinamika sovremennykh ekosistem v golotsene: materialy III Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiem)* [*Dynamics of modern ecosystems in the Holocene: proceedings of the III All-Russian Scientific Conference (with international participation) (Kazan, Russia, 12–15 March 2013)*]. Kazan, Otechestvo: 219–220. (In Russian).
4. Belanovskaya T.D. 1975. [To the question of fishery on the Lower Don]. *Kratkie soobshcheniya Instituta arkheologii*. 141: 107–111. (In Russian).
5. Sychevskaya E.K. 2008. [Determination of fish remains from the Neolithic site Razdorskaya-2. Excavation 4 – 2003]. In: *Neolit Nizhnego Dona i Severo-Vostochnogo Priazov'ya.* [*The Neolithic of the Lower Don and the North-Eastern Sea of Azov Region*]. Rostov-on-Don, Publishing House "Actual problems of Modern Science" of Northern Caucasus Research Center of the Higher School of the Southern Federal University: 100–101. (In Russian).
6. Tsepkin E.A. 1989. [On the history of commercial ichthyofauna and fishery in the Don basin]. *Voprosy ikhtiologii*. 29(5): 771–776. (In Russian).
7. Titov V.V., Kashibadze V.F., Dyuzhova K.V., Kovaleva G.V., Kurshakov S.V., Frolov P.D., Tesakov A.S. 2018. [Paleoecological features of Eneolithic of the Lower Don Region (by Materials of Multilevel Site Razdorskoe I)]. *Stratum plus*. 2: 303–315. (In Russian).
8. Sharafutdinova E.S. 1980. *Pamyatniki predskifskogo vremeni na Nizhnem Donu (kobyakovskaya kul'tura).* [*Monuments of the pre-Scythian time on the Lower Don (Kobyakovskaya culture)*]. Leningrad, Nauka: 88 p. (In Russian).
9. Zhiteneva L.D. 1966. [Fishes of the Nizhne-Gnilovskoy settlement (Bronze Age, I–III centuries AD)]. *Voprosy ikhtiologii*. 6(2): 222–236. (In Russian).
10. Zhiteneva L.D. 1968. [Fishes of Kobyakovo settlement (Late Bronze Age, I–III centuries AD)]. *Zoologicheskiy zhurnal*. 27(2): 269–282. (In Russian).
11. Marti V.Yu. 1941. [The origin and development of fishery in the Azov-Black Sea basin]. *Priroda*. 5: 78–83. (In Russian).
12. Tikhiy M.I. 1927. [Commercial fishes of Kobyakovo settlement]. *Priroda: populyarnyy estestvenno-istoricheskiy zhurnal.* 6: 509–510. (In Russian).
13. *Arkheologiya Nizhnego Dona: uchebnik (prospekt)*. [*Archeology of the Lower Don: textbook (prospect)*]. 2013. Rostov-on-Don, Southern Federal University: 64 p. (In Russian).
14. Morales A., Antipina E., Antipina A., Roselló E. 2007. An ichthyoarchaeological survey of the ancient fisheries from the Northern Black Sea. *Archaeofauna*. 16: 117–172.
15. Lebedev V.D., Lapin Yu.E. 1954. [On the question of fishery in the Bosporan Kingdom]. In: *Materialy i issledovaniya po arkheologii SSSR. 33. Materialy i issledovaniya po arkheologii Severnogo Prichernomor'ya v antichnuyu epokhu II.* [*Materials

and research on the archeology of the USSR. 33. Materials and research on the archaeology of the Northern Black Sea in Antiquity II]. Moscow, Academy of Sciences of the USSR: 197–214. (In Russian).

16. Baygusheva V.S. 2011. [Subfossilic remains of fishes in the Sea of Azov Region]. In: *Istoriko-arkheologicheskie issledovaniya v Azove i na Nizhnem Donu v 2009 g. Vyp. 25.* [*Historical and archaeological research in Azov and on the Lower Don in 2009. Iss. 25*]. Azov, Publishing House of the Azov Museum-Reserve: 456–466. (In Russian).
17. Dobrovol'skaya E.V. 2008. [New archeozoological materials from the excavations of Phanagoria (2005–2007)]. In: *Trudy II (XVIII) Vserossiyskogo arkheologicheskogo s"ezda v Suzdale. T. 3.* [*Proceedings of the II (XVIII) All-Russian Archaeological Congress in Suzdal. Vol. 3 (Suzdal, Russia, 20–25 October 2008)*]. Moscow, Institute of Archeology of the Russian Academy of Sciences: 347–350. (In Russian).
18. Yurtseva A.O. 2016. [Fish bones from Phanagoria (excavations 2006–2013)]. In: *Fanagoriya. Rezul'taty arkheologicheskikh issledovaniy. Tom 4. Materialy po arkheologii i istorii Fanagorii. Vyp. 2.* [*Phanagoria. Results of archaeological research. Vol. 4. Materials on the archeology and history of Phanagoria. Iss. 2*]. Moscow, Institute of Archeology of the Russian Academy of Sciences: 353–360. (In Russian).
19. Zhiteneva L.D. 1965. [On the question of fishery of the Sinds (based on the materials of the excavations of the Semibratnee settlement, VI–II centuries BC). *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdel biologicheskiy*. 70(5): 50–59. (In Russian).
20. Kurshakov S.V. 2014. [Materials of the study of fishes' remains from Maeotians settlements of the Lower Don (by results of research of the Fortress settlement, town of Azov, I century BC – I century AD). In: *Istoriko-arkheologicheskie issledovaniya v g. Azove i na Nizhnem Donu v 2012 g. Vyp. 28.* [*Historical and archaeological research in the city of Azov and Lower Don in 2012. Iss. 28*]. Azov, Publishing House of the Azov Museum-Reserve: 334–342. (In Russian).
21. Anfimov N.V. 1983. [Fishery of the Maeotians]. In: *Problemy arkheologii i etnografii. Vyp. II. Istoricheskaya etnografiya: traditsii i sovremennost'.* [*Problems of Archeology and Ethnography. Iss. II. Historical ethnography: traditions and modernity*]. Leningrad, Leningrad State University: 117–124. (In Russian).
22. Myagkova Yu.Ya., Vasil'eva A.V. 2002. [Animals of the Lower-Gnilovskoe settlement]. In: *IV Donskie arkheologicheskie chteniya.* [*IV Don Archaeological Readings*]. Rostov-on-Don: 34–39. (In Russian).
23. Zhitnikov V.G. 1992. [Fishery in the economic system of the Elizavetovskoe settlement on the Don River]. In: *Donskie drevnosti. Vyp. 1.* [*Don Antiquities. Iss. 1*]. Azov, Publishing House of Azov Museum of Local Lore: 68–78. (In Russian).
24. Tsepkin E.A. 1970. [New data on the history of fishing in Tanais]. *Kratkie soobshcheniya Instituta arkheologii*. 124: 115–117. (In Russian).
25. Vasil'eva A.V. 1999. [Features of the fishery of Nedvigovskoe settlement]. *Donskaya arkheologiya*. 3–4: 68–71. (In Russian).
26. Pletneva S.A. 1996. *Sarkel i "shelkovyy put'".* [*Sarkel and "The Silk Road"*]. Voronezh, Voronezh State University: 168 p. (In Russian).
27. Kulakov A.A. 2010. [Fishery of the population of the Khazar Khaganate (based on the materials of the monuments of the Lower Don)]. In: *Bosporskie chteniya. Vyp. XI. Bospor Kimmeriyskiy i varvarskiy mir v period antichnosti i srednevekov'ya. Remesla i promysly.* [*Bosporus Readings. Vol. XI. Bosporus of Cimmeria and the Barbarian World in the period of antiquity and the Middle Ages. Crafts and skills*]. Kerch, Kerch City Typography: 266–269. (In Russian).
28. Vasil'eva A.V. 1998. [About the remains of fish from the time of the Golden Horde]. In: *Istoriko-arkheologicheskie issledovaniya v Azove i na Nizhnem Donu v 1995–1997 gg. Vyp. 15.* [*Historical and archaeological research in Azov and on the Lower Don in 1995–1997. Iss. 15*]. Azov, Publishing House of Azov Museum-Reserve: 300–304. (In Russian).
29. Baigusheva V.S., Timonina G.I. 2006. [Zooarchaeological complexes of Azak of the XIV century (data from 2005)]. In: *Istoriko-arkheologicheskie issledovaniya v Azove i na Nizhnem Donu v 2005 g. Vyp. 22.* [*Historical and archaeological research in Azov and on the Lower Don in 2005. Iss. 22*]. Azov, Publishing House of Azov Museum-Reserve: 139–146. (In Russian).
30. Myagkova Yu.Ya. 2002. [Ecological and ethnic aspects of the using of mammals in two medieval settlements]. In: *Mezhdunarodnye otnosheniya v basseyne Chernogo morya v drevnosti i srednie veka.* [*International relations in the Black Sea basin in the Antiquity and in the Middle Ages*]. Rostov-on-Don, Rostov Pedagogical University: 138–140. (In Russian).
31. Bogachev V.V. 1919. *Ocherki geografii Vsevelikogo Voyska Donskogo.* [*Essays on the Geography of the All-Great Don Army*]. Novocherkassk, Edition of the Department of Public Education of the All-Great Don Army: 523 p. (In Russian).
32. Matishov G.G., Titov V.V., Kovaleva G.V., Pol'shin V.V., Dyuzhova K.V., Baigusheva V.S., Zaitsev A.V., Il'ina L.P., Nesteruk G.V., Sushko K.S., Timonina G.I., Kurshakov S.V., Nevidomskaya D.G. 2019. *Paleogeografiya Priazov'ya v golotsene.* [*Paleogeography of the Sea of Azov region in the Holocene*]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 226 p. (In Russian).

Поступила 27.11.2020

УДК 551.3.051: 551.35: 902.66: 551.799(262.54)
DOI: 10.7868/S25000640210205

ИЗМЕНЕНИЕ ПАЛЕОЛАНДШАФТОВ В ЭПОХУ ГОЛОЦЕНА ПОД ВЛИЯНИЕМ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПРИМЕРЕ АКВАТОРИИ ТАГАНРОГСКОГО ЗАЛИВА И ПРИЛЕГАЮЩЕГО УЧАСТКА ДЕЛЬТЫ ДОНА[1]

© 2021 г. В.В. Польшин[1], И.В. Толочко[1], К.С. Сушко[1], А.Ю. Московец[1], С.В. Бирюкова[2]

Аннотация. Представлены новые данные исследований, отражающие изменение природной среды в регионе. Особое внимание уделено изучению антропогенного прессинга, который ощутимо влиял на экосистему района в течение последних 200–300 лет, но особенно сильно с середины XX века, то есть после зарегулирования стока реки Дон. Дана характеристика донных отложений восточной части Таганрогского залива. Приведены результаты исследований, позволяющие предположить, что изменения условий осадконакопления в этом районе Азовского моря произошло около 4,5 тыс. лет назад. Проанализированы данные по изменению твердого стока после зарегулирования Дона и трансформации речного стока на юге донской дельты после введения в строй в 1927 г. Азово-Донского морского канала. Сделан вывод о деградации этого участка дельты. Малакологические исследований показали присутствие в отложениях восточной части Таганрогского залива и прилегающего района донской дельты донной фауны, относящейся к морским, солоноватоводным (понто-каспийским) и пресноводным видам. Проведено изучение и последующее ранжирование по степени деградации почвенного покрова дельты Дона.

Ключевые слова: Азовское море, Таганрогский залив, дельта Дона, природные условия, изменение уровня моря, антропогенный фактор, твердый сток, почвы.

CHANGES IN THE PALEOLANDSCAPES UNDER THE INFLUENCE OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC PROCESSES DURING THE HOLOCENE EPOCH ON THE EXAMPLE OF THE WATER AREA OF THE TAGANROG BAY AND THE ADJACENT SECTION OF THE DON RIVER DELTA

V.V. Polshin[1], I.V. Tolochko[1], K.S. Sushko[1], A.Yu. Moskovets[1], S.V. Biryukova[2]

Abstract. The presented new research data reflect changes in the natural environment in the region. Special attention has been given to studying anthropogenic load, which significantly affects the ecosystem of the region over the last 200–300 years, and especially since the middle of the 20th century when the Don River flow has been regulated. The bottom sediments in the eastern area of the Taganrog Bay are characterized. The study results suggest that changes in the depositional conditions in this area of the Sea of Azov occurred about 4.5 thousand years ago. We analyzed data on the change in the suspended sediment flow since the Don River regulation and the transformation of the river runoff on the southern flank of the Don delta, caused by the Azov-Don sea canal put into operation in 1927. We concluded about the degradation of that part of the Don delta. Malacological studies revealed bottom fauna presented with marine, brackish (Ponto-Caspian), and freshwater

[1] Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: vlad0220vlad@mail.ru

[2] Мурманский морской биологический институт Российской академии наук (Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17

[1] **Оригинальный текст:** *Польшин В.В., Толочко И.В., Сушко К.С., Московец А.Ю., Бирюкова С.В.* Изменение палеоландшафтов в эпоху голоцена под влиянием природных и антропогенных процессов на примере акватории Таганрогского залива и прилегающего участка дельты Дона // Наука Юга России. 2021. Т. 17. № 2. С. 49–56.

species, in sediments of the eastern part of the Taganrog Bay and the adjacent area of the Don River delta. The soil cover in the Don River delta has been studied with the subsequent ranking according to the degradation factor.

Keywords: Sea of Azov, Taganrog Bay, Don River delta, natural environment, sea level change, anthropogenic factor, suspended sediment flow, soils.

ВВЕДЕНИЕ

В целях долгосрочного планирования развития прибрежных территорий изучение происходящих изменений природной среды в бассейне Азовского моря является критически важным. В полной мере это относится к акватории Таганрогского залива и прилегающему участку дельты Дона. На протяжении последних нескольких тысяч лет ландшафты в этой части Северо-Восточного Приазовья постоянно трансформировались. Менялись размеры залива, его глубины, конфигурация берегов, очертания и расположение дельты р. Дон [1–5].

Вопросы, связанные с изменением природных условий в регионе, и сегодня не потеряли своей актуальности. В настоящее время рассматриваемая территория регулярно испытывает последствия опасных процессов: периодических нагонных повышений уровня моря, абразии берегов, заиления проток донской дельты и деградации ее почвенного покрова. Вследствие зарегулирования в 50-х гг. XX века р. Дон произошло сокращение твердого стока и изменение фракционного состава донской взвеси. Доля речного аллювия в дельтообразовании резко снизилась. В результате этого стали повсеместно отмечаться деформации и размыв островов дельты. На участках морского взморья фиксируются уменьшение глубин и изменение состава донных отложений [6].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проведены на основе комплексного подхода с использованием современных методик и оборудования. Геофизические работы в акватории Таганрогского залива и в рукавах дельты Дона осуществляли методами непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСП) и эхолотирования. При проведении сейсмоакустической съемки использовали параметрический узколучевой профилограф SES-2000 light. В ходе гидрологических исследований применяли эхолот Lowtance Elite 7 Ti с функцией бокового обзора. Расчетные значения речного стока р. Дон получены по результатам анализа многолетних наблюдений, проводившихся на замыкающем створе гидрологического поста «Раздорская».

Морские экспедиционные работы вели в акватории Таганрогского залива и в рукавах дельты Дона с борта научно-исследовательского судна «Денеб», несамоходного понтона и моторной лодки. При отборе донных отложений использовали гравитационная и вибрационная грунтовые трубки, а также дночерпатель Ван-Вина. Средняя мощность отобранных грунтовых колонок составила 1,5–2 м. В образцах донных отложений изучали раковинный материал из различных горизонтов грунтовых колонок, определяли гранулометрический состав. Абсолютный возраст донных осадков устанавливали радиоуглеродным методом по раковинам моллюсков.

Отбор почвенных образцов на островах донской дельты проводили с помощью ручного бура РБ-10. В дальнейшем в отобранных почвах определяли гранулометрический состав, содержание гумуса, карбонатность, плотность и полевая влажность. Проведен сравнительный анализ полученных результатов исследований с фондовыми материалами середины XX века. Для ранжирования территории по степени деградации использована шкала Харрингтона [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Развитие Азовского моря в голоцене следует рассматривать как процесс постепенного повышения уровня моря со времени последней ледниковой эпохи, который прерывался относительно кратковременными регрессивными периодами. Если в конце плейстоцена площадь современной акватории представляла собой участок низменной суши, по которой протекал древний Дон, то в начале голоцена наметилась тенденция к проникновению черноморских вод на эту территорию [8; 9].

За временной этап, соответствующий голоцену, максимальные подъемы уровня Азовского моря отмечались в интервалах от 7 до 4 тыс. лет назад и от 2 до 1 тыс. лет назад. Эти этапы соответствуют древнеазовской (новочерноморской) и нимфейской трансгрессиям, которые разделяются периодом кратковременного уровневого спада, соотносящегося со временем проявления фанагорийской регрессии [3; 8].

Начиная с середины XIX века произошли существенные изменения природных условий в регионе. Во многом это связано с влиянием антропогенного фактора и прежде всего с зарегулированием речного стока Дона и началом функционирования Цимлянского водохранилища.

Геолого-геоморфологические исследования. Результаты многочисленных исследований показывают, что, по всей видимости, наиболее сильно проявилась древнеазовская (новочерноморская) трансгрессия, по времени совпадающая с климатическим оптимумом голоцена (≈ 7,5–4,6 тыс. лет назад). В этот период на востоке Азовское море доходило до устья Маныча, а на юго-востоке береговая линия располагалась на 40 км южнее своего современного положения [1; 2; 8]. На площади Таганрогского залива в это время уровень моря также повышался. Судя по данным НСП и литологического изучения грунтовых колонок, подкрепленных результатами определения абсолютного возраста отложений, можно предположить, что это произошло ранее 4,6 тыс. лет назад в очередную фазу древнеазовской трансгрессии [3].

На ряде акустических записей под поверхностным слоем осадков в центральной части залива выделяются положительные валообразные формы палеорельефа, образованные при более низком уровне моря. Они имеют относительную высоту 2–3 м и перекрываются отложениями возрастом около 4,5–5,5 тыс. лет. Валы прослеживаются параллельно линии современного берега и восточнее Очаковской косы уже не выделяются. Судя по данным проведенного сейсмопрофилирования, они разделяются ложбинами, тальвеги которых находится на глубинах 7–10 м от современного уровня моря. Такое строение погребенного палеорельефа может быть обусловлено деятельностью речных потоков (древнего Дона и его притоков) на ранних этапах голоценовой истории и последующим развитием трансгрессии, в результате которой низменные прибрежные территории были затоплены водами наступающего моря [2; 3].

Около 2,7 тыс. лет назад в Азово-Черноморском бассейне наметилась тенденция снижения уровня моря (фанагорийская регрессия). По всей видимости, максимальное обмеление в это время (до −5... −6 м относительно современного уровня) проявилось на площади Таганрогского залива. Осушенное морское дно подвергалось активной денудации, а прибрежная зона представляла собой низменную заболоченную сушу, дренируемую реками [2–4].

Определенным маркером изменений природных условий, происходивших в регионе во время фанагорийской регрессии, могут являться археологические памятники донской дельты.

Падение уровня моря создало благоприятные условия для активной колонизации островной части дельты Дона. Анализ изученных артефактов показывает, что треть территории донской дельты в это время была заселена, а основным занятием местного населения было рыболовство. При этом система расселения была тесно связана с ландшафтом территории: максимальная концентрация поселений отмечается на естественных возвышенностях и по берегам стариц – отмерших проток Дона.

На южном побережье Таганрогского залива в отличие от территории дельты Дона отмечается низкий процент археологических памятников эпохи бронзы и античности. Небольшое число выявленных археологических памятников в прибрежной зоне Азовского моря на отрезке дельта Дона – Ясенский залив может быть объяснено активной абразией пород береговой зоны (легко размываемых суглинистых берегов) [3].

Около 2,3–2,5 тыс. лет назад уровень моря вновь стал подниматься (начало нимфейской трансгрессии). На пике трансгрессии (1,5 тыс. лет назад) прибрежные участки современной суши были затоплены водами наступающего моря, а дельта Дона отступила на восток от своего современного положения. Очередное повышение уровня Азовского моря могло в корне изменить ландшафт островной части дельты и вызвать миграцию населения в III веке до н.э. на возвышенные участки коренного берега. Именно в это время на берегу Мертвого Донца был основан город Танаис [2; 3; 5].

По результатам многочисленных грунтовых съемок, проведенных сотрудниками Южного научного центра Российской академии наук, в последние годы можно судить о характере распространения современных донных осадков по площади дна залива. В его восточной части поверхностный горизонт донных отложений представлен алеврито-во-глинистыми мелкозернистыми песками с включением ракуши и ракушечного детрита, а также алевритами. Кроме этого участка моря зона локализации песчаных осадков приурочена к районам кос с их подводными продолжениями и к аллювиальным выносам рек, впадающих в залив. В незначительном удалении от морского края донской дельты аккумулируются осадки смешанного типа, в которых фракции ила, алеврита и песка находятся примерно в одинаковых пропорциях. К западу с увеличением глубин гранулометрический состав отложений изменяется в сторону уменьшения размера частиц. Основная площадь накопления глинистых илов приурочена к осевой ложбине залива, которая в плане соответствует долине древнего течения Дона [10; 11].

Малакологические исследования. В колонках донного грунта мощностью до 2 м, отобранных в восточной части Таганрогского залива и в приморской части дельты Дона, кроме современной пресноводной и солоноватоводной (понто-каспийской) фауны были встречены раковины морских моллюсков (табл. 1).

Наиболее часто встречался понто-каспийский вид *Dreissena polymorpha*, массово распространенный в этом районе в настоящее время. Раковины других понто-каспийских видов, *Adacna glabra* и *Monodacna colorata*, которые в последние годы образуют биоценозы в восточной части Таганрогского залива, представлены незначительно.

Морские виды – *Cerastoderma glaucum* и заморoустойчивый *Hydrobia acuta* – отмечены в большом количестве в различных горизонтах грунтовых колонок из приморской части донской дельты. Другие виды брюхоногих моллюсков морского происхождения родов *Tritia*, *Bittium*, *Rissoa*, *Retusa*, *Cylichnina*, *Parthenina*, *Ebala*, которые также были найдены нами повсеместно в исследуемых грунтовых колонках, в современный период в восточной части Таганрогского залива не обитают.

Это может свидетельствовать о периодах осолонения в прошлом. В то же время нахождение в поверхностных горизонтах грунтовых колонок молоди *Cerastoderma* может быть обусловлено сбросом балластных вод или ее приносом с потоками более соленых вод из западных районов моря и позже гибелью из-за неподходящих условий обитания. Большое количество раковин *Cerastoderma* (в основном отдельных створок) в пробах из верхних горизонтов колонок может быть следствием перемещения раковинного материала из западной части Таганрогского залива во время нагонов воды, периодически возникающих при сильных и устойчивых ветрах.

Изучение почв дельты Дона. В ходе изучения почв в соответствии с различными природными и природно-хозяйственными особенностями донская дельта была разделена на северный ($S = 12{,}256$ км²),

Таблица 1. Состав фауны моллюсков из колонок (мощность до 2 м), отобранных в восточной части Таганрогского залива и прилегающей части дельты р. Дон.
Table 1. List of mollusca fauna in core samples (up to 2 meters high) from the eastern part of the Taganrog Bay and the adjacent part of the Don River delta

Морские виды средиземноморского происхождения (соленость 7–30 ‰) / Marine species originated from the Mediterranean (salinity of 7–30 ‰)	Солоноватоводные понто-каспийские виды (соленость 1–8 ‰) / Brackish Ponto-Caspian species (salinity of 1–8 ‰)	Пресноводные виды Freshwater species
Tritia reticulata (Linnaeus, 1758) *Bittium reticulatum* (da Costa, 1778) *Hydrobia acuta* (Draparnaud, 1805) *Retusa truncatula* (Bruguière, 1792) *Cylichnina variabilis* (Milachevitch, 1909) *Parthenina* sp. *Ebala pointeli* (de Folin, 1868) *Cerastoderma glaucum* (Bruguière, 1789) *Abra segmentum* (Récluz, 1843)	*Turricaspia* sp.* *Adacna glabra* (Ostroumoff, 1905) *Monodacna colorata** (Eichwald, 1829) *Dreissena polymorpha** (Pallas, 1771)	*Viviparus viviparus** (Linnaeus, 1758) *Theodoxus fluviatilis** Linnaeus, 1758 *Lithoglyphus naticoides** (C. Pfeiffer, 1828) *Bithynia tentaculata** (Linnaeus, 1758) *Lymnaea* sp.* *Planorbis* sp.* *Unio pictorum** (Linnaeus, 1758)

Примечание. * – виды, обитающие в настоящее время в районе исследований.
Note. * – species currently living in the research area.

центральный ($S = 32,81$ км^2) и южный ($S = 12,28$ км^2) районы (рис. 1).

Для северного района характерны маломощные аллювиальные почвы, залегающие на слоистом песчаном аллювии, и лугово-аллювиальные оглеенные почвы, образующиеся на пойменных и старичных песках. В структуре почв центрального района широкое распространение получили аллювиально-луговые карбонатные в комплексе с аллювиальными солонцеватыми, а также лугово-болотные почвы. Почвообразование в южной части дельты характеризуется формированием комплексов маломощных аллювиальных почв на слоистом песчаном аллювии, аллювиально-луговых карбонатных почв, лугово-аллювиальных солонцеватых почв на аллювиальных супесчаных отложениях.

Сравнительный анализ новых данных с фондовыми материалами середины XX века показал, что в структуре почвенного покрова дельты Дона произошли изменения: в результате заиления и перераспределения наносов комплексы луговых почв преобразовались в маломощные аллювиальные слоистые почвы, формирующиеся на пойменных и старичных песках.

Физико-химические свойства почв дельты Дона обладают пространственной неоднородностью, обусловленной как естественными условиями почвообразования, так и антропогенной нагрузкой. Содержание гумуса и карбонатов по профилю изученных почв от верхних к нижним горизонтам уменьшается от 3,36 до 0,79% и от 1,32–1,56 до 0,2 % соответственно. При этом ареалы наибольшей дегумификации почв донской дельты связаны с развитием сельского хозяйства в данных районах. Верхние горизонты изученных почв легкосуглинистые и среднесуглинистые, а нижние – среднесуглинистые, легкосуглинистые и супесчаные. Плотность в аллювиальных легкосуглинистых и среднесуглинистых почвах с глубиной увеличивается от 0,42 до 1,32 г/см^3 (в селитебных зонах >1,2 г/см^3).

По степени деградации почв в соответствии со шкалой Харрингтона [7] донскую дельту можно разделить на пять зон с различным весовым показателем: очень высокий, высокий, средний, ниже среднего, низкий (рис. 2).

Пространственный анализ распределения почв по степени деградации показал, что недеградированные почвы преимущественно встречаются на участках, которым присвоен статус особо охраняемых природных территорий. Данный тип почв не образует сплошных ареалов, занимая 18 % исследованной территории (1078 га).

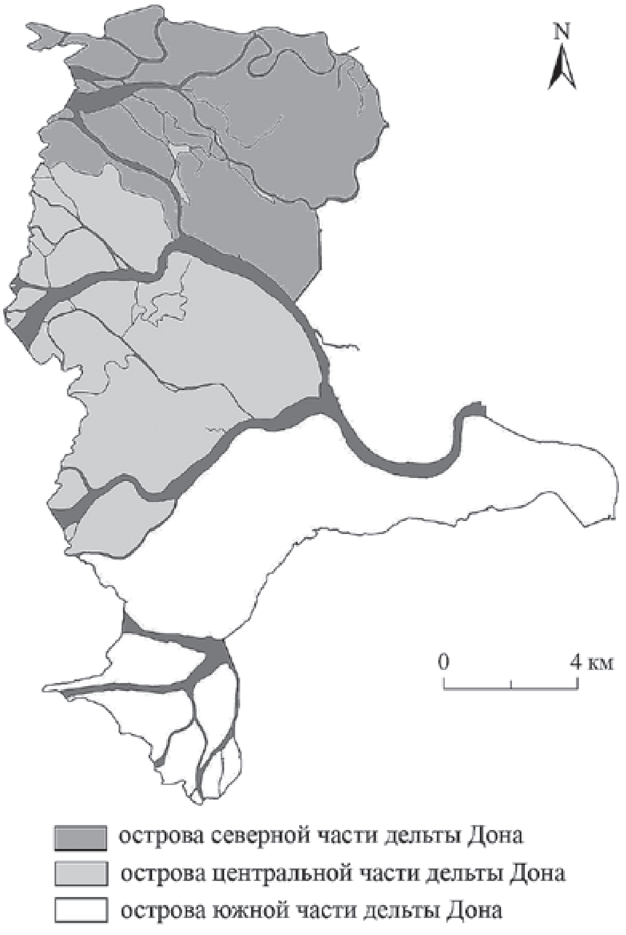


Рис. 1. Районирование дельты Дона в соответствии с природными и природно-хозяйственными особенностями.
Fig. 1. The Don River delta zoning in accordance with natural and natural-economic characteristics.

Слабодеградированные почвы характеризуются незначительным проявлением негативных процессов и занимают площадь, равную 21 % территории района исследований, что составляет 1266 га.

Среднедеградированные почвы сосредоточены в центральной части района исследований. На их долю приходится 35 % территории района, что составляет 2049,6 га. Данный тип почв распространен в селитебных ландшафтах.

Сильнодеградированные почвы приурочены к местам интенсивной антропогенной нагрузки, подверженным процессам дефляции, засоления и дегумификации. Очень сильно деградированные почвы занимают юго-восточную часть островов дельты Дона. Эти почвы подвержены сильным потерям гумуса, переуплотнению, а также уменьше-

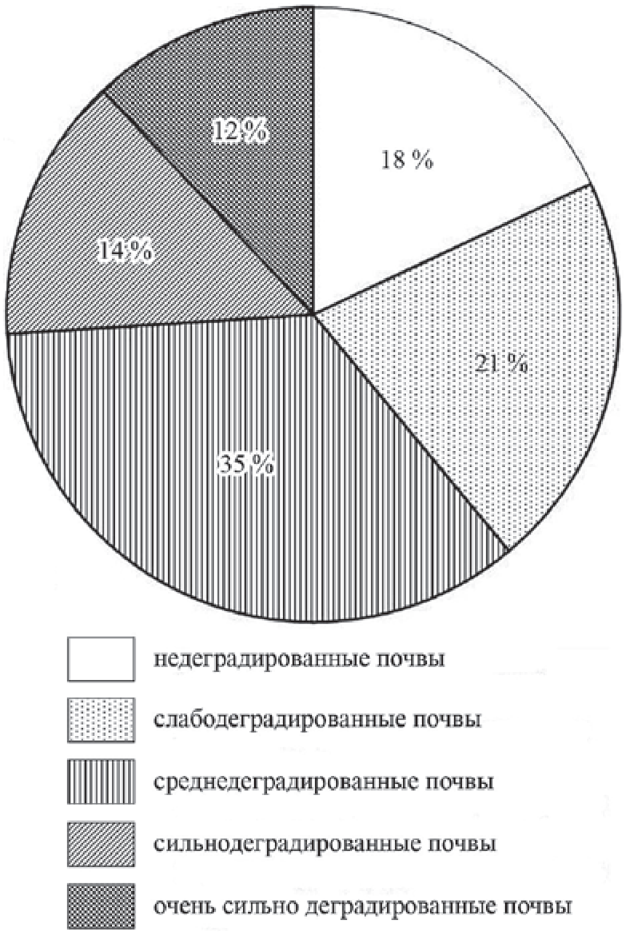


Рис. 2. Распределение почв дельты Дона по степени деградации.
Fig. 2. Soil distribution in the Don River delta based on degradation factor.

нию мощности плодородного слоя в 2,1–2,3 раза по сравнению с почвами заповедных участков. Сильнодеградированные и очень сильно деградированные почвы составляют 26 % территории (1546,46 га).

Гидрологические исследования. В начале XX века гидрологический режим донской дельты претерпел значительные изменения. Основным фактором этого являлось проведение интенсивных дноуглубительных работ на участке устьевого взморья во второй половине XIX века и строительство Азово-Донского морского канала в первой половине XX века. С началом функционирования Цимлянского водохранилища в середине XX века кардинально уменьшился твердый сток р. Дон и произошло перераспределение речного стока между рукавами дельты.

До постройки Цимлянского водохранилища основная доля твердого стока поступала с водосборного участка Верхнего и Среднего Дона (255 тыс. км^2) и водосборного участка р. Северский Донец (98,9 тыс. км^2). Среднемноголетний объем твердого стока, по данным наблюдений на замыкающем гидрологическом посту «Раздорская» в период с 1932 по 1952 г., составил 4,4 млн т. Максимальный годовой объем измеренного твердого стока наблюдался в 1941 г. и равнялся 11 млн т при годовом стоке 48,6 км^3. В 1942–1943 гг. в связи с активными боевыми действиями в период Великой Отечественной войны наблюдения были временно прекращены. При этом в 1942 г. был зафиксирован максимальный годовой сток. Восстановленный ряд наблюдений позволил получить теоретически возможный объем твердого стока для этого периода, который составил 12 млн т. Минимальный годовой объем твердого стока наблюдался в 1935 г. и был на уровне 1,5 млн т при годовом стоке р. Дон 12,8 км^3 (рис. 3).

После строительства Цимлянского водохранилища 95 % твердого стока с водосборного участка Верхнего и Среднего Дона стало аккумулироваться в границах его акватории. Анализируя данные по донскому стоку, можно выделить два периода: 1953–1971 гг. и с 1972 г. по сегодняшнее время. В период 1953–1971 гг. наблюдалось значительное снижение объемов твердого стока, поступавшего на участок Нижнего Дона. Его среднегодовые объемы в этот период составляли 2,796 млн т. С 1972 г. фиксировалось дальнейшее уменьшение среднегодового твердого стока до 515 тыс. т. Для последнего десятилетия этот показатель составил 193 тыс. т.

На трансформацию гидрологического режима повлияло и введение в строй в первой половине XX века Азово-Донского морского канала. После начала его функционирования в 1927 г. произошло значительное перераспределение речного стока между рукавами Большая Каланча и Старый Дон. Строительство судоходного канала отразилось на характере проявлений сгонных явлений и участившимся проникновением солоноватых морских вод (соленость в пределах 5 ‰) из Таганрогского залива в донскую дельту в районе гирла Песчаное (район Азово-Донского морского канала). Произошло перераспределение стока на юге дельты между Свиным, Мериновым, Песчаным и Кривым гирлами. Объем стока Песчаного гирла, по которому проложена трасса канала, увеличился в 4–5,6 раза. В других протоках в этой части дельты отмечается его уменьшение: в гирлах Свином и Кривом – в 6–12 раз, в гир-

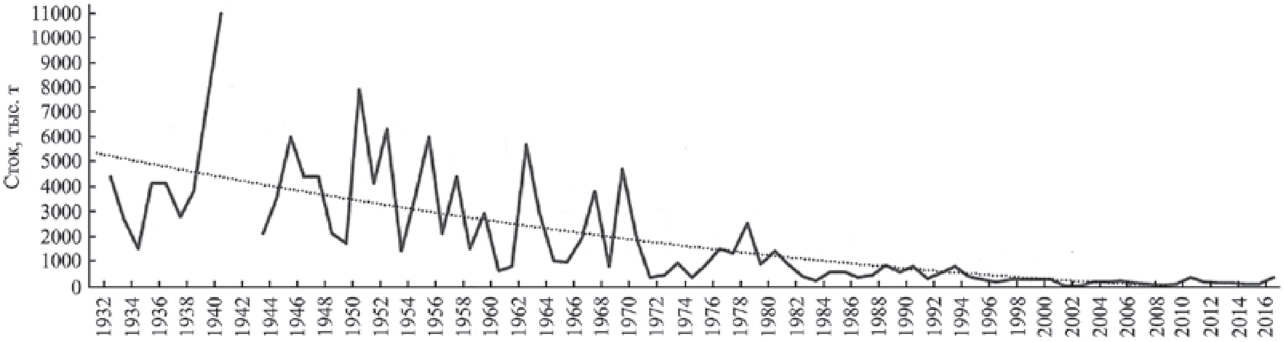


Рис. 3. Годовой сток наносов р. Дон в период с 1932 по 2017 г. (по данным наблюдений на гидрологическом посту «Раздорская»).
Fig. 3. Annual sediment runoff for the Don River during the period from 1932 to 2017 (according to records of the hydrometeorological station "Razdorskaya").

ле Мериново – в 1,5–3,8 раза (рис. 4). Скорость стоковых течений в этих рукавах также уменьшилась.

По результатам эхолотных съемок установлено, что малые водотоки юго-западной узловой системы донской дельты характеризуются незначительной водопропускной способностью, которая на современном этапе имеет тенденцию к дальнейшему уменьшению. Это приводит к заилению и постепенному отмиранию некоторых проток. Так, например, по результатам анализа космических снимков нами было установлено, что ширина типичной для южного участка дельты протоки – гирла Кривого – с 1971 г. уменьшилась более чем в 2 раза, с 150 до 70 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На протяжении последних нескольких тысяч лет процесс формирования донской дельты и акватории Таганрогского залива был связан с неоднократным изменением уровня Черного и Азовского морей. Значительное повышение уровня моря на акватории Таганрогского залива произошло ранее 4,6 тыс. лет назад, в очередную фазу древнеазовской трансгрессии. Этот процесс сопровождался интенсивной абразией пород береговой зоны, в результате чего площадь водного зеркала залива увеличилась. Площадь и конфигурация островов дельты Дона в голоцене также менялись. Определенным маркером происходящих изменений при-

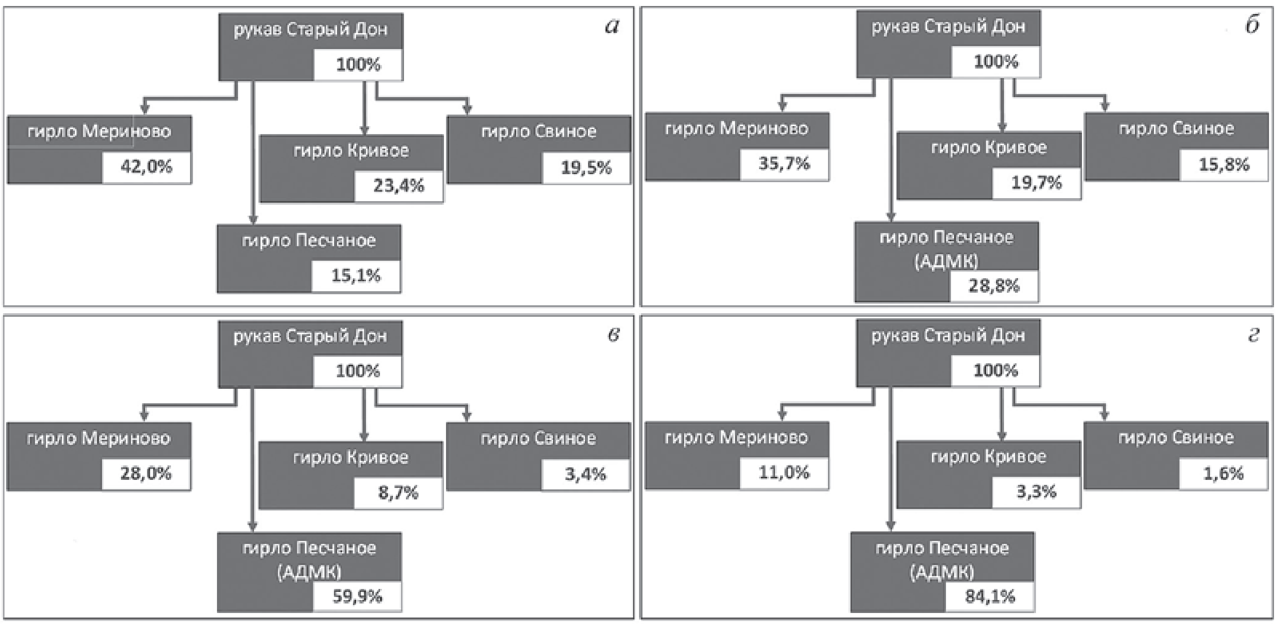


Рис. 4. Распределение стока р. Дон (рукав Старый Дон) в различные годы: *а* – 1924–1927 г.; *б* – 1928–1932 г.; *в* – 1963 г.; *г* – 1972 г.
Fig. 4. The Don River runoff distribution figures (the Stary Don branch) in different years: *а* – 1924–1927; *б* – 1928–1932; *в* – 1963; *г* – 1972.

родных условий в регионе во второй половине голоцена могут являться археологические памятники. Очевидно, что их местоположение в Приазовье может быть объяснено с точки зрения трансформации ландшафтов прибрежных территорий.

В настоящее время район впадения р. Дон в Таганрогский залив Азовского моря находится под действием высокой антропогенной нагрузки, которая значительно возросла после ввода в строй Азово-Донского морского канала и Цимлянского водохранилища. В сравнении с фоновыми показателями фиксируются изменения в параметрах речного стока р. Дон, почвенного покрова донской дельты и донных отложений восточной части Таганрогского залива.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-05-80022 «Реконструкция и изменение палеоландшафтов в эпоху голоцена под влиянием природных и антропогенных процессов на примере акватории Таганрогского залива и прилегающего участка дельты Дона».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беркович К.М., Тимофеева В.В. 2007. Морфология и направленные деформации русла Нижнего Дона. *Геоморфология*. 3: 54–62. doi: 10.15356/0435-4281-2007-3-54-62

2. Иванов В.В., Коротаев В.Н., Римский-Корсаков Н.А., Пронин А.А., Чернов А.В. 2013. Строение поймы и динамика русла Нижнего Дона. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 5: 60–66.

3. Матишов Г.Г., Польшин В.В., Титов В.В., Шевердяев И.В. 2019. Голоценовая история азовского шельфа. *Наука Юга России*. 15(1): 42–53. doi: 10.7868/S25000640190105

4. Маев Е.Г., Мысливец В.И., Зверев А.С. 2009. Строение верхнего слоя осадков и рельеф дна Таганрогского залива Азовского моря. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 5: 78–82.

5. Зайцев А.В., Зеленщиков Г.В. 2009. Голоцен дельты Дона. В кн.: *Геология, география и экология океана. Материалы международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Д.Г. Панова (Ростов-на-Дону, 8–11 июня 2009 г.)*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 124–126.

6. Матишов Г.Г., Московец А.Ю., Инжебейкин Ю.И., Ильичев В.Г., Кириллова Е.Э. 2019. Этапы сооружения плотин, пересыпей, каналов и трансформация речного стока в авандельте Дона (XVIII–XXI века). *Наука Юга России*. 15(4): 46–54. doi: 10.7868/s25001640190406

7. Harrington E.C. 1965. The desirable function. *Industrial Quality Control*. 21(10): 494–498.

8. Балабанов И.П., Измайлов Я.А. 1988. Изменение уровневого и гидрохимического режимов Черного и Азовского морей за последние 20 тысяч лет. *Водные ресурсы*. 6: 54–62.

9. Шнюков Е.Ф., Орловский Г.Н., Усенко В.П., Григорьев А.В., Гордиевич В.А. 1974. *Геология Азовского моря*. Киев, Наукова думка: 248 с.

10. Матишов Г.Г. 2006. Новые данные о геоморфологии дна Азовского моря. *Доклады Академии наук*. 409(3): 375–380.

11. Польшин В.В. 2009. Донные отложения позднего голоцена Азовского моря. В кн.: *Геология, география и экология океана*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 269–272.

REFERENCES

1. Berkovitch K.M., Timofeyeva V.V. 2007. [Lower Don River bed morphology and deformation trend]. *Geomorfologiya*. 3: 54–62. (In Russian). doi: 10.15356/0435-4281-2007-3-54-62

2. Ivanov V.V., Korotayev V.N., Rimsky-Korsakov N.A., Pronin A.A., Chernov A.V. 2013. [Floodplain structure and channel dynamics in the lower reaches of the Don River]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 5: 60–66. (In Russian).

3. Matishov G.G., Polshin V.V., Titov V.V., Sheverdyaev I.V. 2019. [Holocene history of the Sea of Azov shelf]. *Nauka Yuga Rossii*. 15(1): 42–53. (In Russian). doi: 10.7868/S25000640190105

4. Maev E.G., Myslivets V.I., Zverev A.S. 2009. [Structure of the upper sediment layer and the bottom relief of the Taganrog Bay of the Azov Sea]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 5: 78–82. (In Russian).

5. Zaitsev A.V., Zelenshchikov G.V. 2009. [Holocene of Don River Delta]. In: *Geologiya, geografiya i ecologiya okeana. Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya D.G. Panova*. [*Geology, geography and ecology of the ocean. Materials of the international scientific conference dedicated to the 100th anniversary of D.G. Panov (Rostov-on-Don, Russia, 8–11 June 2009)*]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 124–126. (In Russian).

6. Matishov G.G., Moskovets A.Yu., Inzhebeykin Yu.I., Il'ichev V.G., Kirillova E.E. 2019. [Stages of construction of dams, embankments, and canals and the transformation of river runoff in the front-delta of the Don (the 18th–21st centuries)]. *Nauka Yuga Rossii*. 15(4): 46–54. (In Russian). doi: 10.7868/S25001640190406

7. Harrington E.C. 1965. The desirable function. *Industrial Quality Control*. 21(10): 494–498.

8. Balabanov I.P., Izmaylov Ya.A. 1988. [Changes in the level and hydrochemical regimes of the Black and Azov Seas over the past 20 thousand years]. *Vodnye resursy*. 6: 54–62. (In Russian).

9. Shnyukov E.F., Orlovskiy G.N., Usenko V.P., Grigoriev A.V., Gordievich V.A. 1974. *Geologiya Azovskogo morya*. [*Geology of the Sea of Azov*]. Kiev, Naukova dumka: 248 p. (In Russian).

10. Matishov G.G. 2006. New data on bottom geomorphology of the Sea of Azov. *Doklady Earth Sciences*. 409(2): 853–858. doi: 10.1134/S1028334X06060031

11. Polshin V.V. 2009. [Bottom sediments of Late Holocene of the Sea of Azov Region]. In: *Geologiya, geografiya i ekologiya okeana*. [*Geology, geography and ecology of the Ocean*]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 269–272. (In Russian).

Поступила 19.04.2021

Thalassiosira kozyrenkoae sp. nov. (Bacillariophyta) from the outcrops on the Taman Peninsula (Russia)[1]

G. V. Kovaleva[1], R. M. Gogorev[2]

[1]Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia
[2]Komarov Botanical Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia
Corresponding author: G. V. Kovaleva, kovaleva_galina@mail.ru

Abstract. A study of the Upper Miocene deposits on the Taman Peninsula revealed a new centric diatom *Thalassiosira kozyrenkoae* Kovaleva et Gogorev. The absence of findings of this species in the modern diatom flora suggests that it is extinct. The species was likely endemic for the Sea of Azov – the Black Sea basin. Single findings of valve fragments in the New Azov layers make it possible to use *T. kozyrenkoae* as a stratigraphic marker and to estimate the distribution extent of the Neogene sediments from the outcrops. This study will contribute to the more precise identification of the origin of the redeposited fossil diatoms in the Quaternary sediments from the Sea of Azov.
Keywords: *Biddulphia tuomeyi*, *Thalassiosira*, diatoms, Miocene, morphology, taxonomy.

Thalassiosira kozyrenkoae sp. nov. (Bacillariophyta) из обнажений на Таманском полуострове (Россия)

Г. В. Ковалева[1], Р. М. Гогорев[2]

[1]Южный научный центра РАН, Ростов-на-Дону, Россия
[2]Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН, Санкт-Петербург, Россия
Автор для переписки: Г. В. Ковалева, kovaleva_galina@mail.ru

Резюме. Приводится описание нового для науки вида диатомовых водорослей — *Thalassiosira kozyrenkoae* Kovaleva et Gogorev. из верхнемиоценовых отложений Таманского полуострова. Отсутствие находок этого вида в современной флоре дает основание считать описанный таксон вымершим. Вероятно, этот вид был эндемиком Азово-Черноморского бассейна. Находки обломков створок этого вида в новоазовских слоях позволяют использовать *T. kozyrenkoae* в качестве стратиграфического маркера, который поможет оценить масштабы разноса неогеновых осадков из обнажений и уточнить происхождение переотложенных ископаемых диатомовых в четвертичных осадках Азовского моря.
Ключевые слова: *Biddulphia tuomeyi*, *Thalassiosira*, диатомовые водоросли, миоцен, морфология, таксономия.

A vast marine basin in the Neogene, the Paratethys, stretched from the Alps to the Aral Sea and included the Pannonian, Dacian and Euxinian-Caspian water bodies linked by straits (Rostovtseva, 2009a). The Paratethys diminished in size in the Middle Sarmatian, resulting in the isolation and emergence of the Pannonian Sea. During the Maeotian Stage, the Paratethys continued to be separated into the Pannonian and Dacian-Euxinian-Caspian (the Eastern Paratethys) basins, completely isolated from

[1] **Оригинальный текст:** *Kovaleva G.V., Gogorev R.M. Thalassiosira kozyrenkoae* sp. nov. (Bacillariophyta) from the outcrops on the Taman Peninsula (Russia) // Новости систематики низших растений. 2021. Т. 55. № 1. С. 19–34.

each other. While the Pannonian Sea during that period was a brackish-water body with an endemic fauna of molluscs, the Dacian-Euxinian-Caspian basin was a semi-marine reservoir in the early Maeotian and a brackish one in the late Maeotian Regional Stage (Rostovtseva, 2009b).

The exposures of the Neogene deposits of the Taman Trough are well-known and have been thoroughly studied (Neveskaya *et al.,* 2004). Beginning with the Middle Miocene, they were well-exposed on the Black Sea coast of the Taman Peninsula. The more ancient deposits are exposed only in the kernels of diaper folds and registered on the Sea of Azov coast, where they are broken by landslides. A light, denser alternation cluster of clays and marls, which is of marker value, is well-distinguished in the Middle Sarmatian deposits. Deepwater facies with diatomite interlayers comprise the Upper Miocene deposits (to the Upper Maeotian), and typical facies of valencienneside clays comprise the Pontian ones. Clayey deposits (the Lower Cimmerian) comprise the Pliocene layers in the lower parts of transects and shallow-water deposits, and lenses of brown ironstones (the Kamysh-Burun layers of the Cimmerian) comprise the upper ones. The brackish shallow water deposits of supra-ore thickness, overlain with a cluster of semi-marine Akchagyl deposits, comprise the top layers of the Late Pliocene–Lower Pleistocene deposits (Neveskaya *et al.,* 2004).

Studies by D. Pantochek, A. S. Savchenko, A. B. Missuna, A. P. Zhuze, A. I. Proschkina-Lavrenko, I. V. Makarova, T. F. Kozyrenko, A. P. Ol'shtynskaya, E. P. Rodionova, and others have provided detailed descriptions of fossil diatom complexes of the Neogene from the Taman and Kerch peninsulas. A detailed review of these studies has been given earlier (Makarova, 1960, 1965; Makarova, Kozyrenko, 1966; Kozyrenko, Makarova, 1968; Rostovtseva, Kozyrenko, 2006).

Studying the Sea of Azov Quaternary deposits, especially from the southern part of the sea, we regularly register poorly preserved fragments of diatom valves and try to identify these redeposited forms. It is important to determine the age and origin of redeposited valves to interpret the presence of these forms in the Ancient and New Azov layers of the Sea of Azov deposits more precisely. When we identified the fragments of valves of *Thalassiosira* species in one of the cores sampled in the Northern Kerch Strait, their morphology indicated that they did not correspond to any of *Thalassiosira* species previously registered in the Sea of Azov (Gogorev, Kovaleva, 2017). A comparison of the redeposited fragments with the earlier results showed that they are similar to a *Thalassiosira* species, registered in a sample of diatomite from the exposures on Cape Panagia (the Taman Peninsula). A thorough study of the species morphology using scanning electronic microscopy allowed the description of a new species, *Thalassiosira kozyrenkoae* Kovaleva et Gogorev.

Material and Methods

We sampled the exposures on Cape Panagia in June 2006 during the expedition of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (SSC RAS). Cape Panagia (45°08′26.0″N, 36°38′00.5″E), located in the Temryuk District of Krasnodar

Territory, is in the south-west of the Taman Peninsula, 12 km from the stanitsa (Cossack village) of Taman (Fig. 1). This is the eastern entry cape to the Kerch Strait from the Black Sea. The specimen was sampled in the upper part of the open exposure, 150 m north of the tip of Cape Panagia (Fig. 1). We discovered the outcrop of diatomite in the upper part of the sampling site (Fig. 2).

Part of the sample of diatomite (approximately 3 g) was boiled in distilled water with several drops of 32% hydrogen peroxide in the laboratory. After rock disintegration, the sample was rinsed several times with distilled water and centrifuged (Elmi SM-6M; 3000 rpm). An aliquot of the rinsed sample was examined with a light microscope (LM) Leica DME (× 1000); permanent slides were made with the highly refractive *Naphrax* medium (refractive index of 1.73). The sample was then examined with a Carl Zeiss EVO 40 XVP (covered Au/Pd; accelerating voltage 15–25 kV; working distance 7.5–10.5 mm) scanning electronic microscope (SEM) (Centre of Collective Usage of Facilities of the Southern Scientific Centre RAS, No. 501994). The names of taxa of higher rank are according to Round *et al.* (1990) and Cox (2015).

Results and Discussion

The Miocene diatoms on the coast of the Taman Peninsula have been thoroughly studied along the transects on Capes Tuzla, Popov Kamen' and Zheleznyi Rog near the stanitsa of Taman (Makarova, Kozyrenko, 1966; Kozyrenko, Makarova, 1968; Rostovtseva, Kozyrenko, 2006). As for the diatom flora from the transects on Cape Panagia, the results of studying a series of specimens from the coastal exposures are given

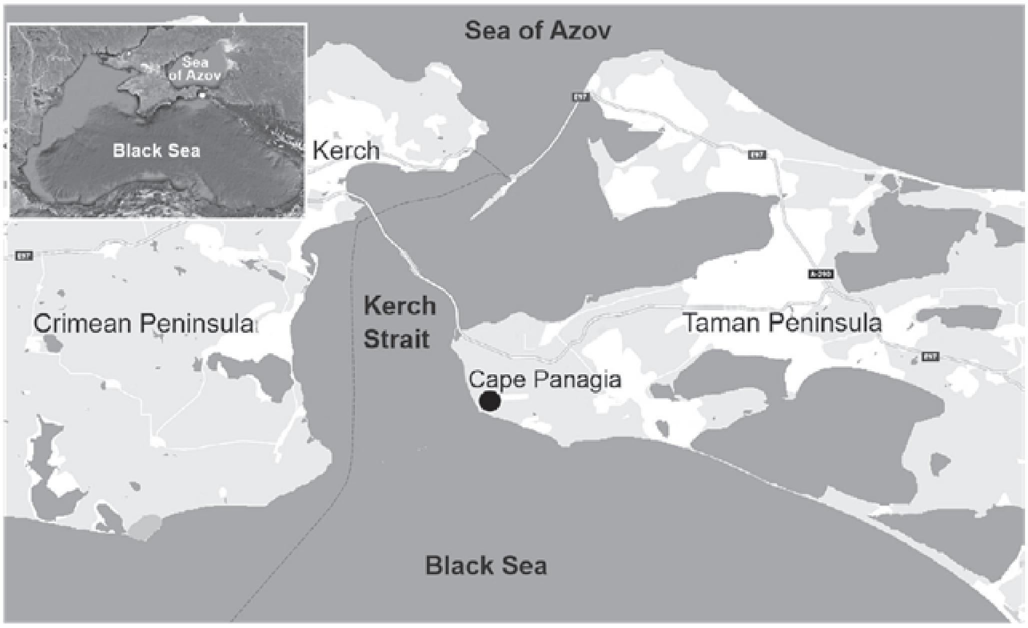


Fig. 1. Map with the sampling site at Cape Panagia.

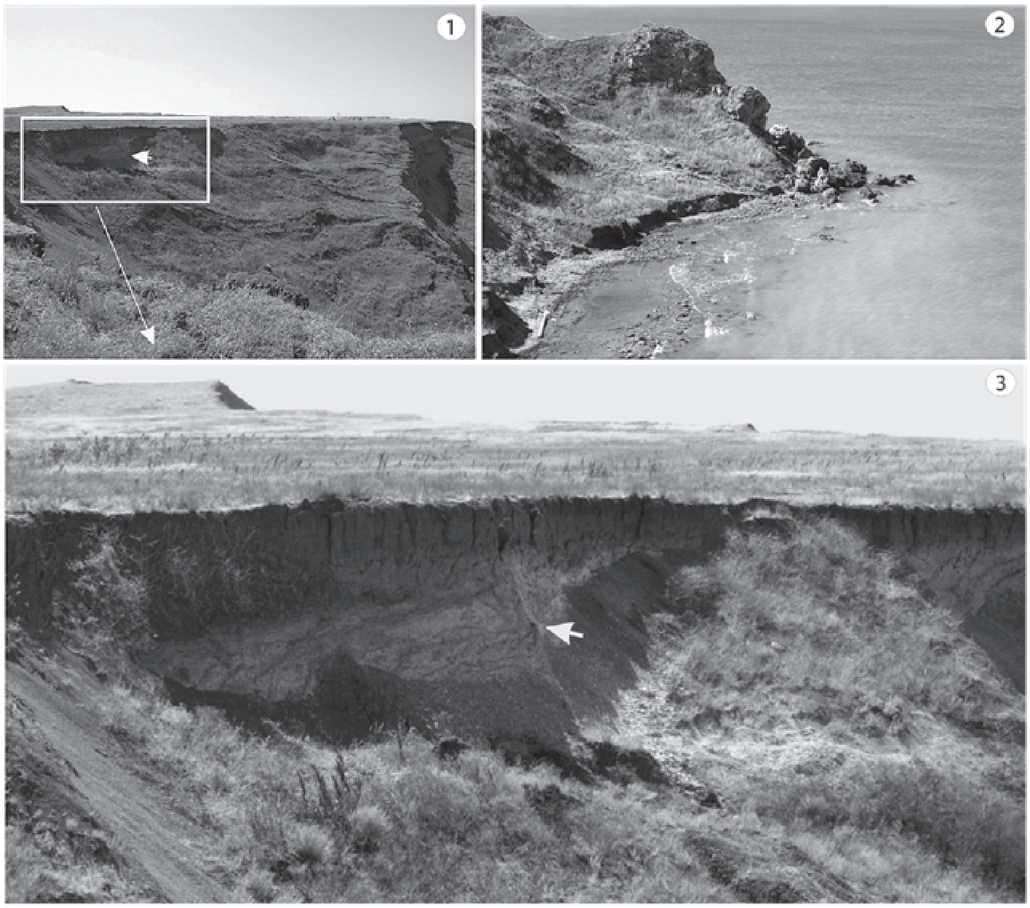


Fig. 2. Sampling site at the coastal exposure at Cape Panagia.
1 — general view of exposure; 2 — Cape Panagia's tip; 3 — enlarged view of diatomite outcrop; the arrow indicates the sample site.

by Makarova (Milovanova, 1955; Makarova, 1960), the author who first described the diatom complexes of the Middle and Late Sarmatian and Maeotian in this region. These data were subsequently generalized and extended in joint publications with Kozyrenko (Makarova, Kozyrenko, 1966; Kozyrenko, Makarova, 1968).

According to these, abundant development of *Biddulphia tuomeyi* (Bailey) Roper var. *tuomeyi* [= *Biddulphia tridens* (Ehrenb.) Ehrenb.] and var. *tridentata* (Ehrenb.) Jousé was a typical feature of the Late Miocene diatom flora. In their opinion, the valve thickness of this species is typical of the Late Sarmatian–Early Maeotian Regional Stages. They registered *B. tuomeyi* in the upper layers of the Upper Sarmatian Period on the Taman Peninsula (Makarova, 1960) and the lower layers of the Maeotian in the North-Eastern Crimea (Makarova, Kozyrenko, 1966). The presence of this

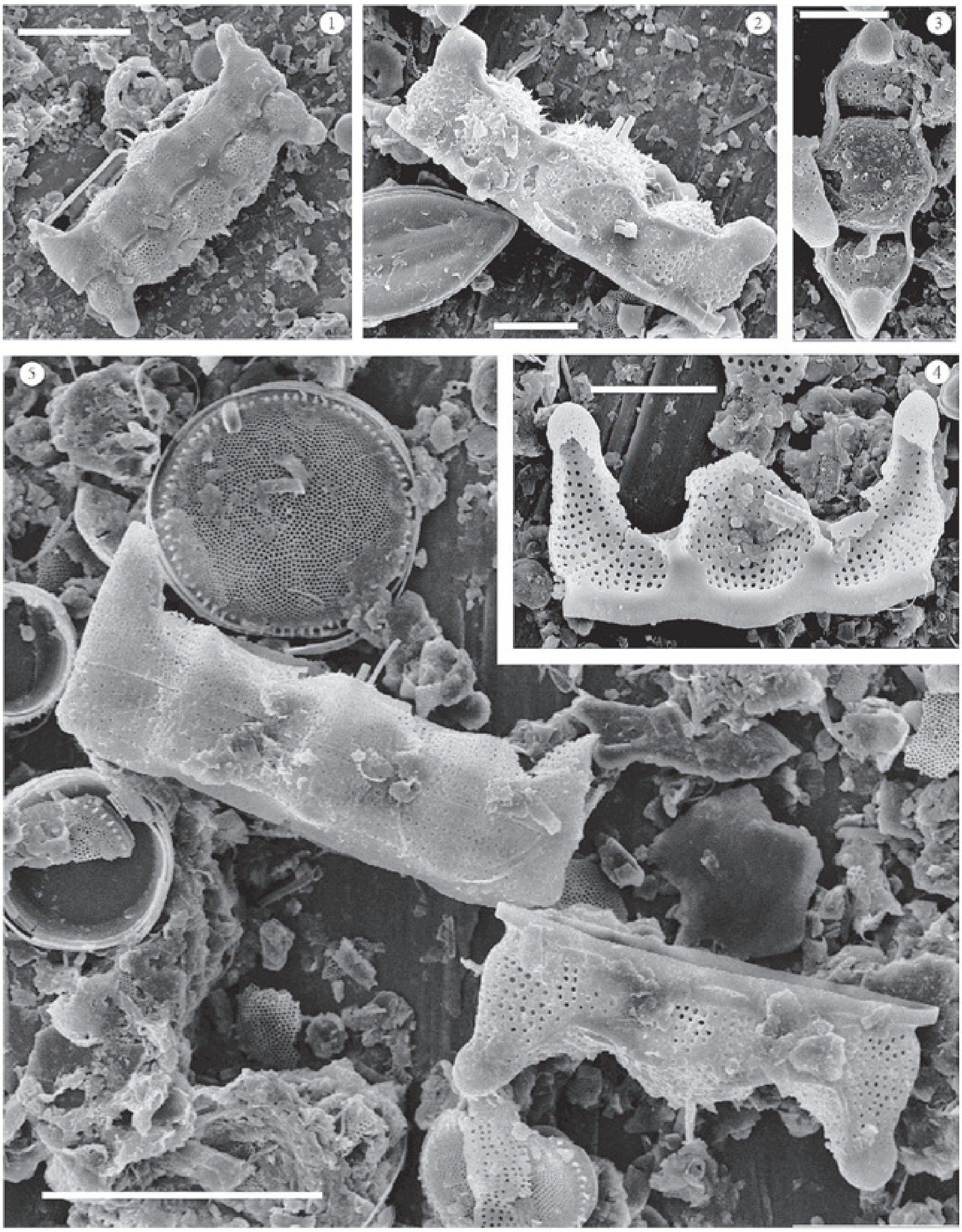


Plate I. Diatom complex from diatomite outcrop at Cape Panagia.
1–2 — *Biddulphia tuomeyi* var. *tuomeyi*; 3–4 — *B. tuomeyi* var. *tridentata*; 5 — valve of *Thalassiosira kozyrenkoae* (top), *B. tuomeyi* var. *tuomeyi* (middle), and *B. tuomeyi* var. *tridentata* (bottom).
Scale bars: 1, 5 — 50 μm; 2–4 — 20 μm.

species-marker (Plate I) in our diatomite specimen allowed us to relate the examined deposits to the Late Sarmatian–Early Maeotian (the Late Miocene).

Makarova and Kozyrenko (1966) also stated that neritic species belonging to the genus *Thalassiosira*, such as *T. variabilis* I. V. Makarova, *T. tenera* Proshk.-Lavr., *T. delicatissima* Proshk.-Lavr., *T. subsalina* Proshk.-Lavr., *T. maeotica* Proshk.-Lavr. and *T. coronifera* Proshk.-Lavr., often accompanied the diatom complex with *Biddulphia tuomeyi* var. *tuomeyi* and var. *tridentata*. Because they had at their disposal only a LM, we assume that they misidentified the species under the name of *T. coronifera*. When studied using LM, the valves of *T. kozyrenkoae* are very similar to *T. coronifera*; however, the use of SEM for a detailed study of valve structure allowed us to determine significant differences between them (Table 1). The species diagnosis is given below.

Phylum **BACILLARIOPHYTA**
Class **MEDIOPHYCEAE** Medlin et Kaczmarska
Order **THALASSIOSIRALES** Glezer et I. V. Makarova
Family **Thalassiosiraceae** M. Lebour

Thalassiosira kozyrenkoae Kovaleva et Gogorev, sp. nov. (Plates II–V)

Valves flat, slightly concave in center, 20–61 µm in diam., with a rather high mantle. Areolae pattern radial and fasciculated, 12–13 (rarely 14) areolae in 10 µm, 26–30 areolae in 10 µm on valve mantle. Foramina of areolae big, round in center. Rarely, foramina are smaller, slit-like, tri- or quadrangular near the margin. Cribrum round to elongated ellipsoid with 18–24 cribrum pores in 1 µm (n = 23) (Plate V: 2, 3, 5, 6).

One central strutted process with 5 satellite pores, with external short tube (Plate III: 6; IV: 4) and usually surrounded by 1–2 larger areolae (Plate V: 6). Marginal strutted processes with 4 satellite pores in a ring, 6 in 10 µm (Plate V: 3, 5); rarely 4–5 in 10 µm on great valves (45–60 µm in diam.). External marginal processes with rather long tubes, sometimes surrounded by extension (coil) at the end (Plate IV: 7) and with internal very short tubes inside the valve (Plate V). Single rimoportula between two marginal strutted processes, on external surface with external tube longer than in marginal processes (Plate III: 1, 3, 7; Plate IV: 3), 1.9–2.7 µm long (Plate IV: 3); internal slit of labiate process about 1 µm long, located radially (Plate V: 2, 5, 7).

Holotype: The specimen on slide No. 7, stored at the Southern Scientific Centre RAS, Rostov-on-Don (Russia), illustrated at Plate II: 4. Isotype: Slide LE A0000299 (No. 716).

Type locality: Russia, Taman Peninsula, Cape Panagia, 45°08′26.0″N, 36°38′00.5″E, Late Miocene deposits, VI 2006, *G. V. Kovaleva.*

Distribution. Fossil species, frequently registered in the Late Miocene deposits (from the layers of the Late Sarmatian to the Early Maeotian Regional Stages); single finds registered in the Quaternary sediments from the Sea of Azov as redeposited valves.

Etymology. The specific epithet was chosen in honor of the Russian diatomologist Tatiana Fedorovna Kozyrenko who studied the Miocene diatoms of the Taman Peninsula for many years.

Differentiation. *Thalassiosira kozyrenkoae* is morphologically similar to both *T. coronifera* and *T. punctigera* (Castrac.) Hasle in valve size and areolae pattern. *Thalassiosira kozyrenkoae* differs from the first description of *T. coronifera* (Proschkina-Lavrenko, 1955) by a greater density of areolae and marginal processes. In the emended diagnosis of *T. coronifera* (Genkal, Terenko, 2009), the areolae density is within a wider range (Table 1), but the density of marginal processes is also less when compared to *T. kozyrenkoae*. Moreover, Genkal, Terenko (2009) indicated up to three central strutted processes and also observed a long external tube of labiate process, which differs from our data (2–5 µm in length, unlike 1.8–2.7). In addition, according to other data (Diatomovye..., 1988), the *T. coronifera*'s central strutted processes on the external surface has only aperture, unlike *T. kozyrenkoae* that has an external tube. *Thalassiosira kozyrenkoae*, *T. angulata* (W. Greg.) Hasle, and *T. tenera* are similar in morphology by the density of areolae and differ by the external valve view and areolae pattern. The main morphological differences between *T. kozyrenkoae* and the compared species are in the different density of the marginal processes and the different number of satellite pores of the central strutted process (Table 1).

Acknowledgments

We express our gratitude to Roman G. Mikhalyuk (Rostov-on-Don, Russia), Yuri B. Okolodkov (Veracruz, Ver., Mexico) and Marcia M. Gowing (Seattle, WA, USA) for the English language assistance and improving the style. Data collection and sampling, laboratory analysis, microphotograph preparation, primary analysis of diatom morphology are by G. V. Kovaleva (at the Southern Scientific Centre RAS with the financial support from the Russian Science Foundation, grant No. 16-17-10170-P). We used the logistic support of the Centre of Collective Usage of Facilities of the Southern Scientific Centre RAS, No. 501994 (SEM, etc.). The analysis of morphology and species description by R. M. Gogorev was carried out within the institutional research project "Flora and taxonomy of algae, lichens and bryophytes in Russia and phytogeographically important regions of the world" (No. 121021600184-6) of the Komarov Botanical Institute RAS.

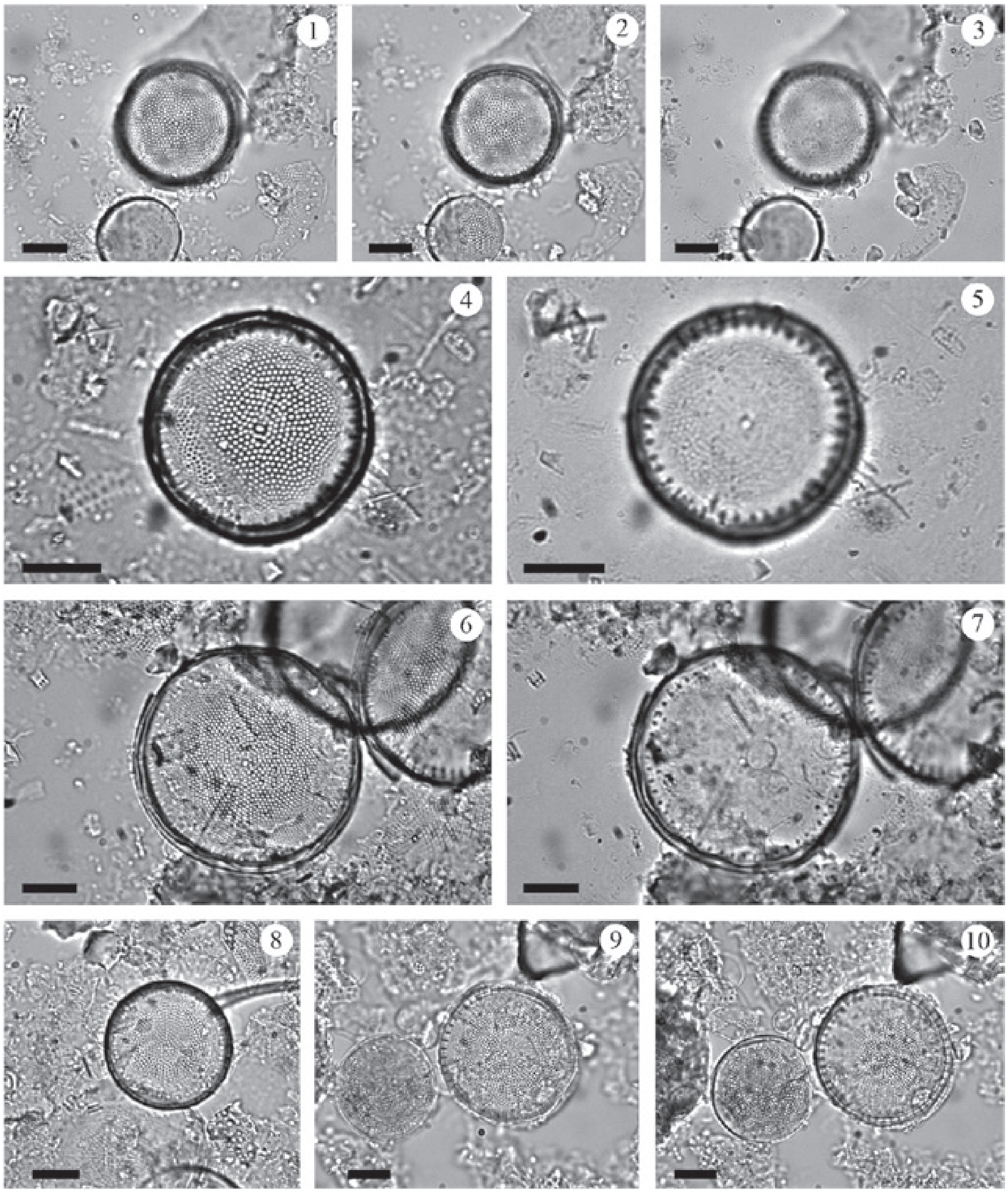


Plate II. *Thalassiosira kozyrenkoae* from the sample of diatomite, LM.
1–10 — valve: 4 — holotype of *T. kozyrenkoae*, slide No. 7.
Scale bars: 10 µm.

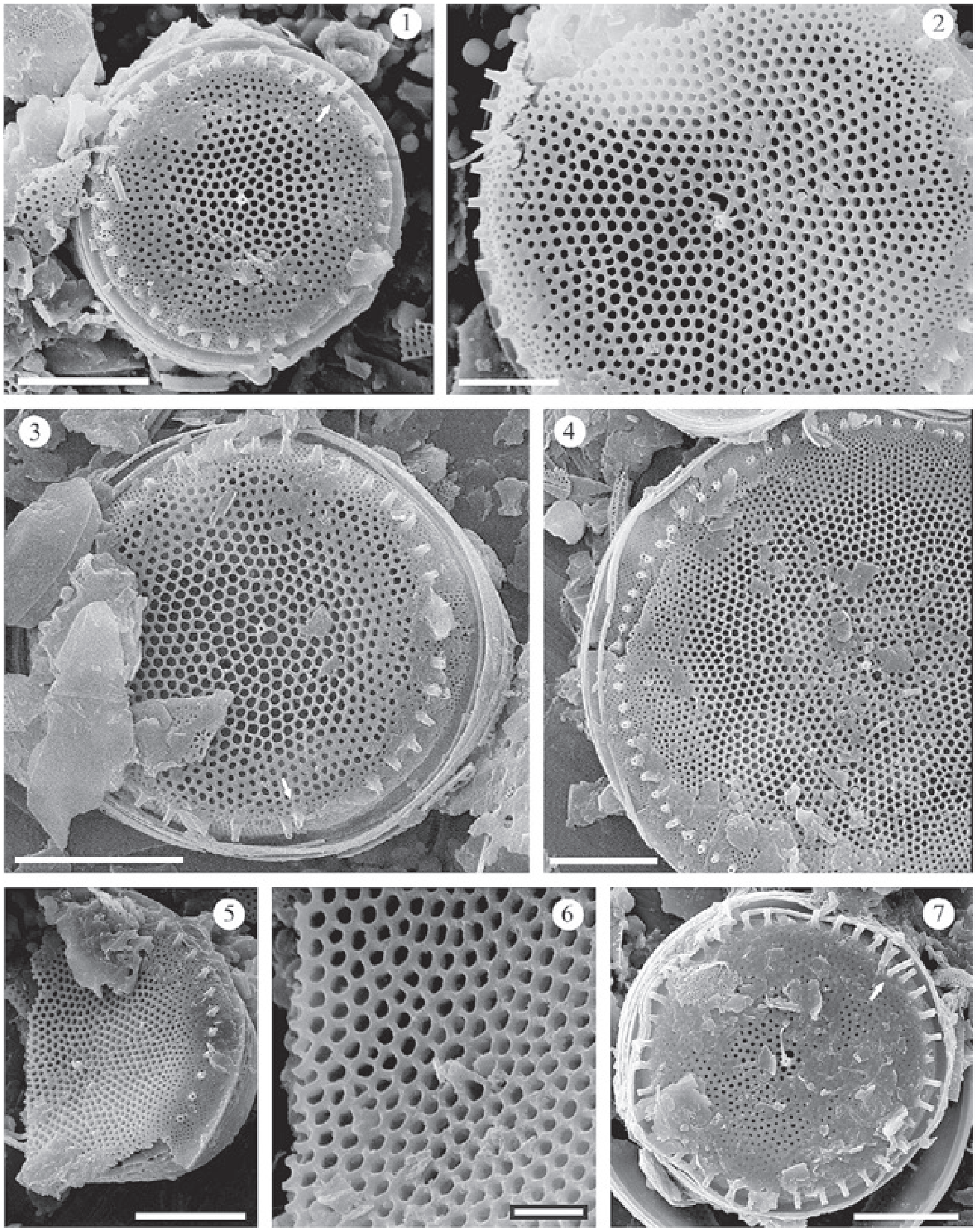


Plate III. *Thalassiosira kozyrenkoae* (external valve surface) from the sample of diatomite, SEM.
1, 3, 7 — external valve surface (external tube of rimoportula marked with arrows);
2, 4–6 — part of exterior valve: 6 — central strutted process.
Scale bars: 1, 3–5, 7 — 10 μm; 2 — 5 μm; 6 — 2 μm.

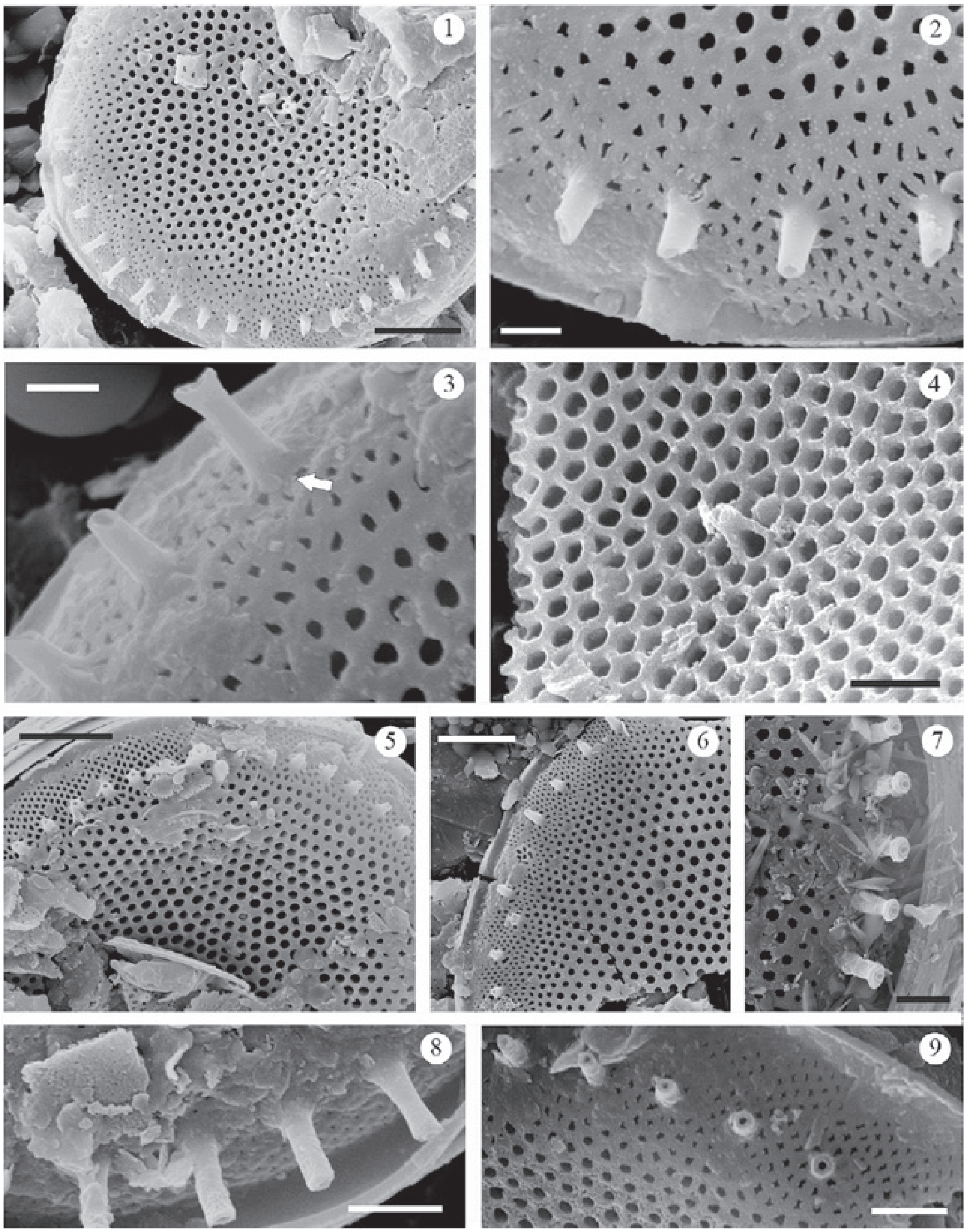


Plate IV. *Thalassiosira kozyrenkoae* (external valve surface) from the sample of diatomite, SEM.
1–3, 5–9 — margin of valve, several marginal strutted processes,
rimoportula (3) marked with arrow; 4 — central strutted process.
Scale bars: 1, 5, 6 — 5 μm; 2, 3 — 1 μm; 4, 7–9 — 2 μm.

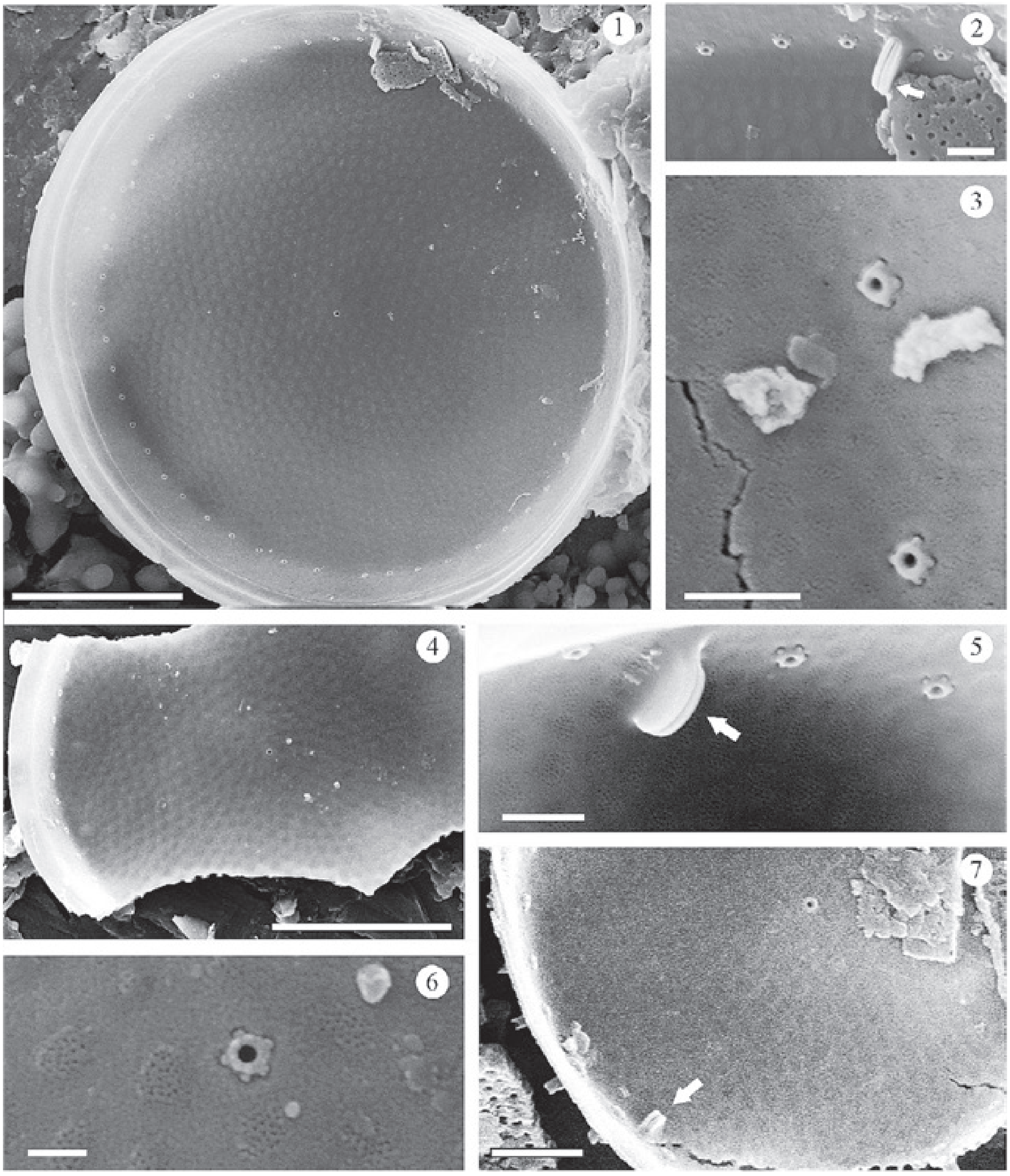


Plate V. *Thalassiosira kozyrenkoae* (internal valve surface) from the sample of diatomite, SEM.
1 — internal valve surface; 2–7 — part of interior valve with marginal strutted processes, rimoportula (2, 5, 7 — arrows), central strutted process (6).
Scale bars: 1, 4 — 10 μm; 2, 3, 5 — 1 μm; 6 — 0.5 μm; 7 — 2 μm.

Table 1

Morphological features of *Thalassiosira kozyrenkoae* sp. nov. and similar species

	Valve diameter, µm	Number of areolae in 10 µm			Areolae pattern	Number of CF	Number of MF in 10 µm	Number and size of rimoportula	References*
		Center	Margin	Mantle					
T. kozyrenkoae sp. nov.	20–61	12–13	14	26–30	radial, in fascicles	1	6 (rarely 4–5)	1, 1.8–2.7 µm	[1]
T. aestivalis Gran	20–32	18		20–22	radial, in fascicles	1	3–5	1	[2]
	14–56	18		>20		1	4	1	[3]
	14–56	>20			in fascicles	1	4	1	[4]
T. angulata	17–40	8–12	12–15	16–20	tangential	1	3	1, 2.6–2.7 µm	[2]
	12–39	8–18		14–24	tangential	1	3 (2–4)	1	[3]
	11–39	14–24			tangential, in fascicles	1	4	1	[4]
T. coronifera	16–48	10	16–17	-	tangential, radial, in fascicles	1	3–4	1	[5]** Black Sea
	11–18	8–10	15–16	-	tangential-radial, in fascicles	1	3–5	1	[6] Caspian Sea
	11–48	8–10	15–17	16–17	tangential, radial	1	4–5	1, approximately 2 µm	[2]
	17–41	9–14	11–16	15–20		1 (rarely 2–3)	3–5	1, 2.8–5 µm	[7] Black Sea
T. decipiens (Grunow) E.G. Jørg.	12–42	6–8	10–17		tangential		3–5		[8]
	9–28	8–12		10–15	tangential, radial	1	4–7	1	[9]
	9–40	8–12		10–15	tangential	1	4–6	1	[2]
	9–40	8–12		10–15	tangential	1	4–6	1	[3]
	10–30	8–10	13	15	tangential	1	4–5	1	[10]
	8–32(40)	10–15			tangential	1	4–6	1	[4]

	Valve diameter, µm	Number of areolae in 10 µm			Areolae pattern	Number of CF	Number of MF in 10 µm	Number and size of rimoportula	References*
		Center	Margin	Mantle					
T. maeotica	11–45	16	18–20	20–22	radial, in fascicles	1	7–8	-	[11]
	11–45	16	18–20	20–22	radial, in fascicles	1?	7–8	1	[2]
T. punctigera	50–130	13–16		10–12	radial, in fascicles	1	5–6	1	[2]
	40–186	10–23		10–23	in fascicles	1	4–5	1	[3]
	24–80 (40–186)	10–23			in fascicles	1	4–5	1	[4]
T. tenera	6.5–15	12–13	15	23–26	tangen-tial-linear	1	4–6	-	[12]
	6.5–15	12–13	15	23–26	tangen-tial-linear	1	4–6	1	[2]
	10–29	(9)10–16	10–16	20–24	tangen-tial-linear	1	3–5	1	[3]
	7–18	16	40	24–30	linear	1	5	1	[10]
	10–46 (10–29)	10–16			linear	1	3–5	1	[4]
T. variabilis	16–23	9–10	11–12	14–15 (18–20)	tangential	1	4–8 per valve		[13] Cas-pian Sea
	16–31	9–10	11–12	14–15 (18–20)	tangential		4–8 per valve		[8] Sea of Azov
	10–37	9–10	11–12	18–20	tangen-tial-radial		4–8 per valve		[6] Cas-pian Sea

Note. CF — central strutted processes; MF — marginal strutted processes.

* References: [1] — This study; [2] — Diatomovye ..., 1988; [3] — Hasle, Syvertsen, 1996; [4] — Hoppenrath *et al.*, 2007; [5] — Proschkina-Lavrenko, 1955; [6] — Proschkina-Lavrenko, Makarova, 1968; [7] — Genkal, Terenko, 2009; [8] — Proschkina-Lavrenko, 1963; [9] — Hasle, 1979; [10] — Ake-Castillo *et al.*, 1999; [11] — Proschkina-Lavrenko, 1960; [12] — Proschkina-Lavrenko, 1961; [13] — Makarova, 1959.

** — given as *T. coronata*.

References

Aké-Castillo J. A., Hernández-Becerril D. U., Meave Del Castillo M. E. 1999. Species of the genus *Thalassiosira* (Bacillariophyceae) from the Gulf of Tehuantepec. *Botanica Marina* 42: 487–503. https://doi.org/10.1515/BOT.1999.056

Cox E. J. 2015. Coscinodiscophyceae, Mediophyceae, Fragilariophyceae, Bacillariophyceae (Diatoms). *Syllabus of plant families. Adolf Engler's Syllabus der Pflanzenfamilien. Part 2/1. Photoautotrophic eukaryotic algae: Glaucocystophyta, Cryptophyta, Dinophyta/Dinozoa, Haptophyta, Heterokontophyta/Ochrophyta, Chlorarachniophyta/Cercozoa, Euglenophyta/Euglenozoa, Chlorophyta, Streptophyta p.p.* Berlin: 64–103.

Diatomovye vodorosli SSSR (iskopaemye i sovremennye). T. 2, Vyp. 1 [The diatoms of the USSR. Fossil and recent. Vol. 2, Fasc. 1]. 1988. Leningrad: 116 p. (In Russ.).

Genkal S. I., Terenko L. M. 2009. New data on morphology, ecology, and distribution of *Thalassiosira coronifera* Pr.-Lavr. (Bacillariophyta). *Ukrainskii botanicheskii zhurnal* 66(1): 88–93. (In Russ.).

Gogorev R. M., Kovaleva G. V. 2017. *Thalassiosira azovica* sp. nov. and other species of the genus *Thalassiosira* (Bacillariophyta) from the Holocene deposits of the Sea of Azov. *Novosti sistematiki nizshikh rastenii* 51: 37–56. (In Russ. with Engl. abstract). https://doi.org/10.31111/nsnr/2017.51.37

Hasle G. R. 1979. *Thalassiosira decipiens* (Gran) Jørg. (Bacillariophyceae). *Bacillaria* 2: 85–108.

Hasle G. R., Syvertsen E. E. 1996. Marine diatoms. *Identifying marine diatoms and dinoflagellates.* San Diego: 5–385. https://doi.org/10.1016/B978-012693015-3/50005-X

Hoppenrath M., Beszteri B., Drebes G., Halliger H., Beusekom J. E. E. van, Janisch S., Wiltshire K. H. 2007. *Thalassiosira* species (Bacillariophyceae, Thalassiosirales) in the North Sea at Helgoland (German Bight) and Sylt (North Frisian Wadden Sea) — a first approach to assessing diversity. *European Journal of Phycology* 42: 271–288. https://doi.org/10.1080/09670260701352288

Kozyrenko T. F., Makarova I. V. 1968. *Morskie i solonovatovodnye diatomei miotsena yuga Evropeiskoi chasti SSSR. Iskopaemye diatomovye vodorosli SSSR* [Marine and brackish-water diatoms of the Miocene of the Southern European part of the USSR. Fossil diatoms of the USSR]. Moscow: 44–51. (In Russ.).

Makarova I. V. 1959. New representatives of the genus *Thalassiosira* from the Caspian Sea. *Botanicheskie materialy otdela sporovykh rastenii Botanicheskogo Instituta imeni V. L. Komarova Akademii Nauk SSSR* 12: 82–86. (In Russ.).

Makarova I. V. 1960. On the flora of the Neogene diatoms of the Taman Peninsula. *Vestnik Leningradskogo universiteta* 3: 79–89. (In Russ.).

Makarova I. V. 1965. New data on the flora of the Neogene diatoms of the Taman Peninsula. *Novosti sistematiki nizshikh rastenii* 2: 9–12. (In Russ.). https://doi.org/10.31111/nsnr/1965.2.9

Makarova I. V., Kozyrenko T. F. 1966. *Diatomovye vodorosli iz morskikh miotsenovykh otlozhenii yuga Evropeiskoi chasti SSSR i ikh znachenie dlya stratigrafii* [Diatoms from the Miocene marine sediments of the Southern European part of the USSR and their importance for stratigraphy]. Moscow; Leningrad: 70 p. (In Russ.).

Milovanova I. V. 1955. New and interesting diatoms from the Neogene of the Taman Peninsula. *Botanicheskie materialy otdela sporovykh rastenii Botanicheskogo Instituta imeni V. L. Komarova Akademii Nauk SSSR* 10: 69–72. (In Russ.).

Neveskaya L. A., Kovalenko E. I., Beluzhenko E. V. , Popov S. V., Goncharova I. A., Danukalova G. A., Zhidovinov I. Ya., Zaitsev A. V., Zastrozhnov A. S., Il'ina L. B. 2004. *Ob'yasnitel'naya zapiska k unifitsirovannoi regional'noi stratigraficheskoi skheme neogenovykh otlozhenii yuzhnykh regionov evropeiskoi chasti Rossii* [Explanatory note to the unified regional stratigraphic scheme of the Neogene deposits of the southern regions of European Russia]. Moscow: 83 p. (In Russ.).

Proschkina-Lavrenko A. I. 1955. Relict diatoms in the plankton of the Black Sea. *Botanicheskie materialy otdela sporovykh rastenii Botanicheskogo Instituta imeni V. L. Komarova Akademii Nauk SSSR* 10: 45–54. (In Russ.).

Proschkina-Lavrenko A. I. 1960. New and interesting diatoms from the Maeotian sediments of the Black Sea Region. *Botanicheskie materialy otdela sporovykh rastenii Botanicheskogo Instituta imeni V. L. Komarova Akademii Nauk SSSR* 13: 54–66. (In Russ.).

Proschkina-Lavrenko A. I. 1961. New diatoms from the Black Sea and the Sea of Azov. *Botanicheskie materialy otdela sporovykh rastenii Botanicheskogo Instituta imeni V. L. Komarova Akademii Nauk SSSR* 14: 33–39. (In Russ.).

Proschkina-Lavrenko A. I. 1963. *Diatomovye vodorosli planktona Azovskogo morya* [Planktonic diatoms of the Sea of Azov]. Moscow; Leningrad: 190 p. (In Russ.).

Proschkina-Lavrenko A. I., Makarova I. V. 1968. *Vodorosli planktona Kaspiiskogo morya* [Plankton algae of the Caspian Sea]. Moscow; Leningrad: 293 p. (In Russ.).

Rostovtseva Yu. V. 2009a. Middle Sarmatian facies of the Taman Trough. *Lithology and Mineral Resources* 44(4): 367–378. https://doi.org/10.1134/S0024490209040051

Rostovtseva Yu. V. 2009b. Upper Meotian facies of the Taman Trough. *Lithology and Mineral Resources* 44(6): 531–543. https://doi.org/10.1134/S0024490209060029

Rostovtseva Yu. V., Kozyrenko T. F. 2006. Specific features of the Late Miocene sedimentation in the Kerch-Taman Trough. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4. Geologiya* 4: 20–29. (In Russ.).

Round F. E., Crawford R. M., Mann D. G. 1990. *The diatoms. Biology and morphology of the genera*. Cambridge: 747 p.

Литература

Aké-Castillo J. A., Hernández-Becerril D. U., Meave Del Castillo M. E. 1999. Species of the genus *Thalassiosira* (Bacillariophyceae) from the Gulf of Tehuantepec. *Botanica Marina* 42: 487–503. https://doi.org/10.1515/BOT.1999.056

Cox E. J. 2015. Coscinodiscophyceae, Mediophyceae, Fragilariophyceae, Bacillariophyceae (Diatoms). *Syllabus of plant families. Adolf Engler's Syllabus der Pflanzenfamilien. Part 2/1. Photoautotrophic eukaryotic algae: Glaucocystophyta, Cryptophyta, Dinophyta/Dinozoa, Haptophyta, Heterokontophyta/Ochrophyta, Chlorarachniophyta/Cercozoa, Euglenophyta/Euglenozoa, Chlorophyta, Streptophyta p.p.* Berlin: 64–103.

[Diatomovye...] *Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т. 2, Вып. 1.* 1988. Л.: 116 с.

[Genkal, Terenko] Генкал С. М., Теренько Л. М. 2009. Новые данные по морфологии, экологии, и распространению *Thalassiosira coronifera* Pr.-Lavr. (Bacillariophyta). *Украинский ботанический журнал* 66(1): 88–93.

[Gogorev, Kovaleva] Гогорев Р. М., Ковалева Г. В. 2017. *Thalassiosira azovica* sp. nov. и другие виды рода *Thalassiosira* (Bacillariophyta) из голоценовых отложений Азовского моря. *Новости систематики низших растений.* 51: 37–56. https://doi.org/10.31111/nsnr/2017.51.37

Hasle G. R. 1979. *Thalassiosira decipiens* (Gran) Jørg. (Bacillariophyceae). *Bacillaria* 2: 85–108.

Hasle G. R., Syvertsen E. E. 1996. Marine diatoms. *Identifying marine diatoms and dinoflagellates*. San Diego: 5–385. https://doi.org/10.1016/B978-012693015-3/50005-X

Hoppenrath M., Beszteri B., Drebes G., Halliger H., Beusekom J. E. E. van, Janisch S., Wiltshire K. H. 2007. *Thalassiosira* species (Bacillariophyceae, Thalassiosirales) in the North Sea at Helgoland (Germand Bight) and Sylt (North Frisian Wadden Sea) — a first approach to assessing diversity. *European Journal of Phycology* 42: 271–288. https://doi.org/10.1080/09670260701352288

[Kozyrenko, Makarova] Козыренко Т. Ф., Макарова И. В. 1968. *Морские и солоноватоводные диатомеи миоцена юга Европейской части СССР. Ископаемые диатомовые водоросли СССР.* М.: 44–51.

[Makarova] Макарова И. В. 1959. Новые представители рода *Thalassiosira* из Каспийского моря. *Ботанические материалы отдела споровых растений Ботанического института имени В. Л. Комарова Академии наук СССР* 12: 82–86.

[Makarova] Макарова И. В. 1960. К флоре диатомовых водорослей неогена Таманского полуострова. *Вестник Ленинградского университета* 3: 79–89.

[Makarova] Макарова И. В. 1965. Новые данные к флоре диатомовых водорослей неогена Таманского полуострова. *Новости систематики низших растений* 2: 9–12. https://doi.org/10.31111/nsnr/1965.2.9

[Makarova, Kozyrenko] Макарова И. В., Козыренко Т. Ф. 1966. *Диатомовые водоросли из морских миоценовых отложений юга Европейской части СССР и их значение для стратиграфии*. М.; Л.: 70 с.

[Milovanova] Милованова И. В. 1955. Новые и интересные диатомовые из неогена Таманского полуострова. *Ботанические материалы отдела споровых растений Ботанического института имени В. Л. Комарова Академии наук СССР* 10: 69–72.

[Neveskaya *et al.*] Невесская Л. А., Коваленко Е. И., Белуженко Е. В. , Попов С. В., Гончарова И. А., Данукалова Г. А., Жидовинов И. Я., Зайцев А. В., Застрожнов А. С., Ильина Л. Б. 2004. *Объяснительная записка к унифицированной региональной стратиграфической схеме неогеновых отложений южных регионов европейской части России*. М.: 83 с.

[Proschkina-Lavrenko] Прошкина-Лавренко А. И. 1955. Реликтовые диатомовые в планктоне Черного моря. *Ботанические материалы отдела споровых растений Ботанического института имени В. Л. Комарова Академии наук СССР* 10: 45–54.

[Proschkina-Lavrenko] Прошкина-Лавренко А. И. 1960. Новые и интересные диатомовые водоросли из мэотических отложений Причерноморья. *Ботанические материалы отдела споровых растений Ботанического института имени В. Л. Комарова Академии наук СССР* 13: 54–66.

[Proschkina-Lavrenko] Прошкина-Лавренко А. И. 1961. Новые диатомовые из Черного и Азовского морей. *Ботанические материалы отдела споровых растений Ботанического института имени В. Л. Комарова Академии наук СССР* 14: 33–39.

[Proschkina-Lavrenko] Прошкина-Лавренко А. И. 1963. Диатомовые водоросли планктона Азовского моря. М.; Л.: 190 с.

[Proschkina-Lavrenko, Makarova] Прошкина-Лавренко А. И., Макарова И. В. 1968. *Водоросли планктона Каспийского моря*. М.; Л.: 293 с.

Rostovtseva Yu. V. 2009a. Middle Sarmatian facies of the Taman Trough. *Lithology and Mineral Resources* 44(4): 367–378. https://doi.org/10.1134/S0024490209040051

Rostovtseva Yu. V. 2009b. Upper Meotian facies of the Taman Trough. *Lithology and Mineral Resources* 44(6): 531–543. https://doi.org/10.1134/S0024490209060029

[Rostovtseva, Kozyrenko] Ростовцева Ю. В., Козыренко Т. Ф. 2006. Особенности позднемиоценового осадконакопления в Керченско-Таманском прогибе. *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология* 4: 20–29.

Round F. E., Crawford R. M., Mann D. G. 1990. *The diatoms. Biology and morphology of the genera*. Cambridge: 747 p.

Infraspecies complex of *Thalassiosira incerta* (Bacillariophyta) from Holocene deposits of Taganrog Bay (Sea of Azov): *Thalassiosira incerta* var. *strelnikovae* var. nov. and *Thalassiosira incerta* var. *fluvialis* var. nov. [1]

G. V. Kovaleva[1], R. M. Gogorev[2], A. V. Nazarenko[1]

[1]Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia
[2]Komarov Botanical Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia
Corresponding author: G. V. Kovaleva, kovaleva_galina@mail.ru

Abstract. New data on the morphology of *Thalassiosira incerta*, one of the most abundant species of the genus *Thalassiosira* in the Holocene deposits of the Sea of Azov, are presented. New varieties, *T. incerta* var. *strelnikovae* Kovaleva et Gogorev, var. nov. and *T. incerta* var. *fluvialis* Gogorev et Kovaleva, var. nov., are described. They are morphologically similar to the type and differ mainly by the presence of a rosette of large areolae around the central fultoportulae and the areolae density on a valve.
Keywords: *Thalassiosira*, algae, diatoms, Holocene, morphology, taxonomy, Russia.

Внутривидовой комплекс *Thalassiosira incerta* (Bacillariophyta) из голоценовых отложений Таганрогского залива (Азовское море): *Thalassiosira incerta* var. *strelnikovae* var. nov. и *Thalassiosira incerta* var. *fluvialis* var. nov.

Г. В. Ковалева[1], Р. М. Гогорев[2], А. В. Назаренко[1]

[1]Южный научный центра РАН, Ростов-на-Дону, Россия
[2]Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН, Россия
Автор для переписки: Г. В. Ковалева, kovaleva_galina@mail.ru

Резюме. Представлены новые данные о морфологии *Thalassiosira incerta*, одного из наиболее массовых видов рода *Thalassiosira* в голоценовых осадках Азовского моря. Описаны новые для науки разновидности *T. incerta* var. *strelnikovae* Kovaleva et Gogorev и *T. incerta* var. *fluvialis* Gogorev et Kovaleva, морфологически сходные с типовой и отличающиеся, главным образом, присутствием на створке розетки крупных ареол вокруг центральных выростов и частотой ареол.
Ключевые слова: *Thalassiosira*, диатомовые водоросли, голоцен, морфология, таксономия, Россия.

The geological history of the Sea of Azov as an independent marine basin began in the first half of the Holocene (approximately 6.5–7.0 thousand years ago). During its entire existence, significant fluctuations of climate and hydrological-hydrochemical conditions (transgressive-regressive phases) occurred repeatedly in the Sea of Azov. The changes affected the diatom taxonomic composition. During the last decade, researchers have accumulated new data on biostratigraphy (diatoms and pollen) and

[1] **Оригинальный текст:** *Kovaleva G.V., Gogorev R.M., Nazarenko A.V. Infraspecies complex of Thalassiosira incerta* (Bacillariophyta) from Holocene deposits of Taganrog Bay (Sea of Azov): *Thalassiosira incerta* var. *strelnikovae* var. nov. and *Thalassiosira incerta* var. *fluvialis* var. nov. // Новости систематики низших растений. 2021. Т. 55. № 1. С. 35–54.

the absolute age of the Sea of Azov sediments (Kovaleva, 2007; Matishov *et al.*, 2007, 2016; Kovaleva, Zolotareva, 2013; Kovaleva *et al.*, 2015, 2017).

Previously published data focus only on the open sea; however, recently, new data on diatoms of the Taganrog Bay bottom sediments have been obtained (Kovaleva, Nazarenko, 2019). The study of these deposits (with ages from the present to 5.5 thousand years ago) has resulted in the identification of 55 species and 5 varieties from 29 diatom genera. Additionally, dinoflagellate cysts, chrysophycean stomatocysts and the ebriid *Ebria tripartita* (Schum.) Lemmerm. were observed in several layers of the core.

Overall, the diatom species composition in the axial part of the Taganrog Bay and registered in Tz–VII core is similar to the previously studied flora from the cores sampled from the open sea (Kovaleva, Nazarenko, 2019). We determined significant differences between the open sea and the bay in the distribution of the dominant diatom species. While the layers with different varieties of *Actinocyclus octonarius* Ehrenb. dominate in the New Azov sediments of the open sea, there are only single valves of the mentioned species in the bay (mainly, the valve fragments). Unlike in the cores from the open sea, we registered varieties of *A. octonarius* in the bay only in the Ancient Azov layers.

Two species of the genus *Thalassiosira*, *T. incerta* I. V. Makarova and *T. decipiens* (Grunow) E. G. Jørg., were the most abundant in core Tz–VII. We relate the abundance maxima of these two species to transgressive stages (Kovaleva, Nazarenko, 2019).

The ecology of *Thalassiosira incerta* in the recent reservoirs has been rather well studied (Okhapkin *et al.*, 2016). It is a brackish-water species that inhabits both marine and estuarine waters, although the ecosystem optimum of *T. incerta* is related to the purely fluvial conditions of large non-regulated rivers with mineralization of >500 mg/l. According to published data (Okhapkin *et al.*, 2016), the intensive decrease in water exchange and current velocity (in the case of similar hydrochemical parameters) leads to a decrease in biomass and the replacement of *T. incerta* with other planktonic species. This allows us to suggest that the layers with high abundances of *T. incerta* were accumulated during the period when the reservoir, located on the territory of the current Taganrog Bay, was a full-water running water body with high current velocity (Kovaleva, Nazarenko, 2019).

The second important indicator group in core Tz–VII is the *Chaetoceros* Ehrenb. resting spores. We reliably identified only two species: *C. lorenzianus* Grunow and *C. rigidus* Ostenf., the spores of which have specific diagnostic features. We identified other *Chaetoceros* spores only to the genus level, and we consider them as a single indicator group (Kovaleva, Nazarenko, 2019).

Apart from the taxa described above, core Tz–VII often contains the pennate diatom species of *Navicula* Bory, *Nitzschia* Hassall, *Tryblionella* W. Sm., *etc.*, typical of benthos and periphytic biotopes. We relate this fact to the shallowness of the bay and the proximity of the coast with substrates suitable for the development of these ecological groups. As the occurrence of pennate diatoms in the bottom sediments is low and they reached noticeable abundance only in the upper layers, we do not consider them a significant indicator group (Kovaleva, Nazarenko, 2019).

We traced several stages of the sea level rise and fall during the last 6000 years in the Sea of Azov region that influenced changes in microalgal species composition (Kovaleva *et al.*, 2015, 2017). Diatom distribution along core Tz–VII indicated rather frequent alterations of both the dominant species and four layers (26–45 cm; 110–126 cm; 170–190 cm; 200–220 cm), in which the occurrence of valves was either extremely low or they were absent altogether. In our opinion, these layers correlate to the regression periods and probably indicate the sub-aerial conditions of sedimentation. We correlate the deposits with registered high abundances (more than 60% of the total amount of valves) of *Thalassiosira incerta* to the transgression periods (Kovaleva, Nazarenko, 2019).

The present study contains data on the morphology, descriptions and illustrations of *Thalassiosira incerta* and its two varieties, *T. incerta* var. *strelnikovae* Kovaleva et Gogorev and *T. incerta* var. *fluvialis* Gogorev et Kovaleva, from the New and Ancient Azov layers of the Taganrog Bay deposits, obtained using a scanning electronic microscope (SEM).

Material and Methods

The present study reviews the data on diatom analysis from the bottom sediment core Tz–VII (47°04′24.8″N, 38°28′30.1″E), sampled in the axial part of the Taganrog Bay (Fig. 1) in July 2013, applying a gravity corer from RV *The Deneb*. The thickness of the studied core was 2.2 m. Diatoms were sampled every 2–5 cm.

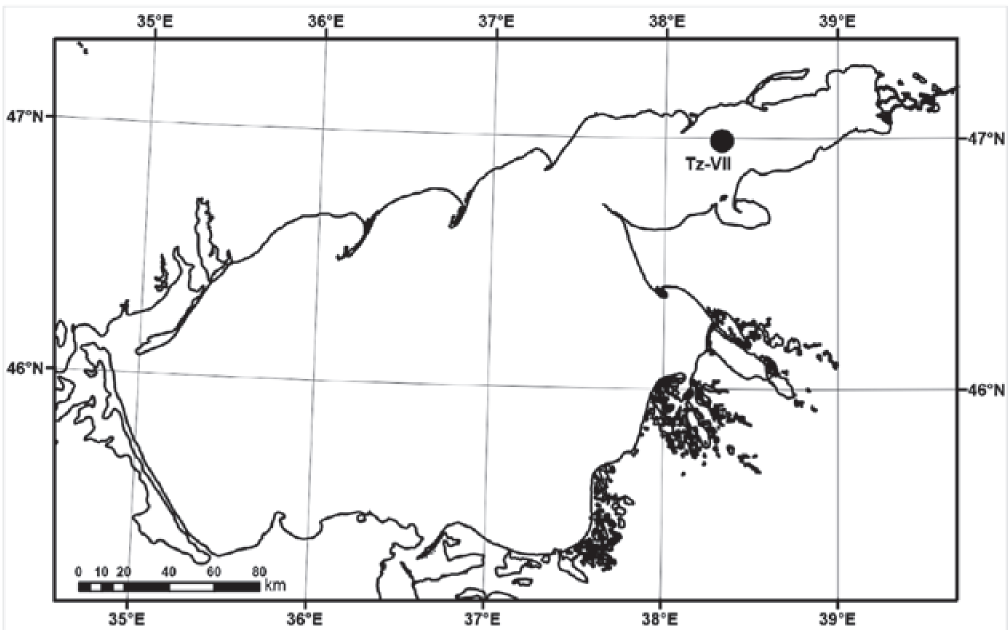


Fig. 1. Location of the bottom sediment core Tz–VII in Taganrog Bay.

We applied traditional methods of diatom analysis to extract the valves from the ground (Joúse, 1953; Diatomovye..., 1974). To identify the diatom species using a light microscope Leica DME (Leica Microsystems, Germany) (×1000), we made the permanent slides with *Naphrax* medium (refractive index of 1.73). In addition, a Carl Zeiss EVO 40 XVP SEM was used (covered Au/Pd; accelerating voltage 15–25 kV; working distance 7.5–10.5 mm).

Overall, we studied 45 specimens. The results of the analysis, lithology and data of radiocarbon dating of core Tz–VII have been published earlier (Kovaleva, Nazarenko, 2019). The New Azov layer deposits in core Tz–VII are partially washed, which is typical of the Taganrog Bay, as they are usually not thick there (20 to 45 cm) (Fig. 2). Deposits from the Ancient Azov layers, on the contrary, are thick (approximately 1.5 m). The comparison of results of the diatom analysis with the data on radiocarbon dating allowed separating specific Ancient Azov layers and distinguishing several eco-stratigraphic subzones, which had not been determined before in cores from the open sea. In particular, we separated specific Aa2, Aa3, and Aa4 zones for the first time, which we relate to the stages of the Khadzhibeian Regression and the New Black Sea Transgression (Fig. 2).

The age of the studied material is from 5510 ± 180 to 2950 ± 80 years BP (Table 1); it allows us to relate these deposits to the New and Ancient Azov layers (Stratigrafiya..., 1984).

The names of taxa of higher rank are according to Round *et al.* (1990) and Cox (2015).

Table 1

Results of radiocarbon dating of core Tz–VII from the Taganrog Bay

Laboratory code	Depth	Radiocarbon years, BP*	Calendar years, BP	Stratigraphy
LU-7389	25–45 cm	2830±60	2950±80	The New Azov layers
LU-7391	70–90 cm	3810±70	4210±110	
LU-7392	95–105 cm	3880±80	4300±120	The Ancient Azov layers
LU-7393	105–125 cm	4040±60	4550±110	
LU-7394	125–155 cm	4070±110	4590±160	
LU-7395	210–220 cm	4870±130	5510±180	

Note: * — BP — before present.

Results and Discussion

Beginning in the mid-1950s, the frustule morphology of *Thalassiosira incerta* has been studied in detail (Table 2). The main taxonomic features, such as the presence and the number of central fultoportulae, density of marginal fultoportulae and the number of satellite pores they possess, are constant. The other characteristics, such as

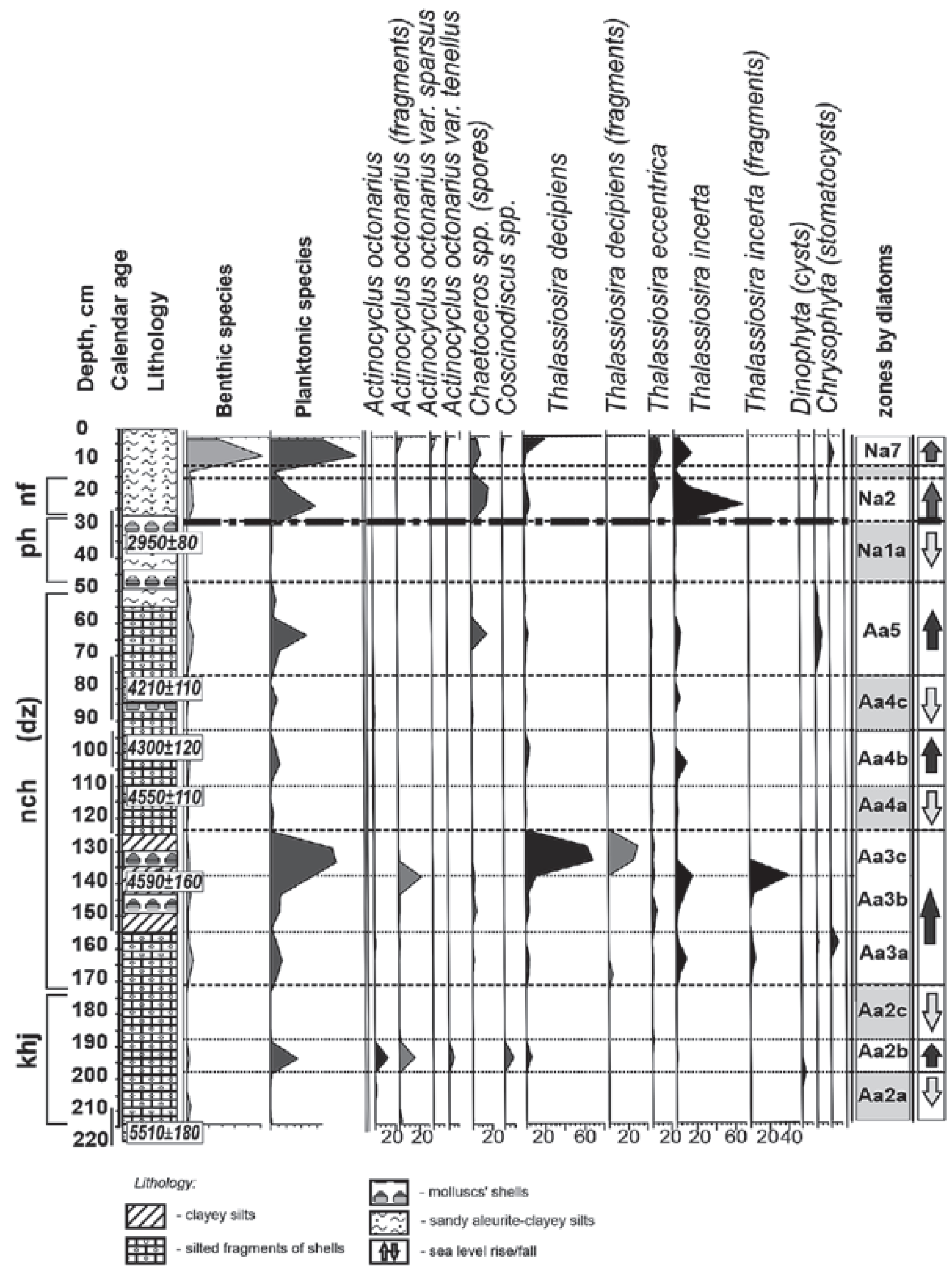


Fig. 2. Diatoms' diagram (indicative species) of core Tz–VII from Taganrog Bay.
Legend: *khj* — the Khadzhibeian Regression; *nch (dz)* — the New Black Sea (the Dzhemetinian) Transgression; *ph* — the Phanagorian Regression; *nf* — the Nymphaean Transgression; *Aa* — the Ancient Azov layers; *Na* — the New Azov layers.

Table 2

Morphological features of *Thalassiosira* species with multi-central fultoportulae

	Valve diameter, μm	Number of areolae in 10 μm			Areolae pattern	Number of CF	Number of MF in 10 μm	Number of satellite pores CF/MF	References
		center	margin	mantle					
T. incerta var. *incerta*	25–39	(7)8–9	8–10	25–30		4–6	4–5		Original data
T. incerta var. *fluvialis* var. nov.	19–36	12–14	14–16	30–35		4–6	4–5		Original data
T. incerta var. *strelnikovae* var. nov.	14–30(31)	11–16	14–19	22–30		3–5	4–6		Original data
T. incerta	17–33	9–10	12–14		tangential-radial, rarely fasciculated		4–6		Makarova, 1961
	13–22(38)	12–16	16–20	35–40		4–6	4		Makarova *et al.*, 1976
		8–16		10–20	radial, fasciculated	3–5	3–4	4 / 4	Hasle, 1978
	11–33	10–16	16–20	16–20	tangential-radial, rarely fasciculated	(3)4–5	3–4	/ 4	Makarova, 1988
	15–23	10–12*			radial-tangential*	3–5	4–5		Genkal, Golokolenova, 2008
	20–22	10*				4	4–5		Genkal *et al.*, 2009a
	9–31	10–12*			tangential*	3–6	3–4*		Genkal *et al.*, 2009b

	13–25	10–19 (12–14*)	15–28		tangential*	3–6	3–6	3 / usually 5	Kiss *et al.*, 2012
	18–32	8–10*			tangential*	3–5	4		Genkal, Okhapkin, 2013
	17	16*			tangential*	5	6		Genkal, Terenko, 2014
	14–33 [9–34]**	10–12 [10–19]**	10–14 [10–20]**	16–28 [15–28]**		4–5* [3–6]**	4–5 [3–6]**	(2)3–4 / 4	Okhapkin *et al.*, 2016
	26–29(30)	10–15			linear-tangential, radial	4–6	4–5	3–4 / 4	Gogorev, Kovaleva, 2017
T. parva	15–30	(12)14–16	18–20		tangential, rarely radial and fasciculated	5–6	5–6		Proschkina-Lavrenko, 1955
	13–15	12	16		tangential, rarely radial and fasciculated		5–6		Proschkina-Lavrenko, Makarova, 1968
	12–37	12–16	18–20	30–32	tangential, rarely radial and fasciculated	5–6	5–6		Makarova, 1988

Note: CF —central fultoportulae; MF —marginal fultoportulae; * —from illustration; ** —emended description.

the pattern and density of areolae, are rather changeable. The protologue of the species (Makarova, 1961) gives the approximate areolation when compared to subsequent publications, including articles by the author of the taxon. As for the areolae pattern on the valves, we suppose that there are both subjective perceptions of areolation patterns by different authors as well as the variability of the specific feature, which we can easily trace studying the type material. The presence and density of occluded processes of fossil *T. incerta* also remain open for further studies. Based on our material, these processes are rarely reported, and they are usually located irregularly and are rarer than reported in the literature (1.5–3.0 in 10 µm instead of 4–8).

The emended diagnosis proposed by Okhapkin *et al.* (2016) does not appear to solve the problem of species volume, as the range of areolae is so wide that such a description may include several taxa. For example, the Black Sea species *Thalassiosira parva* Proshk.-Lavr. is similar to *T. incerta* in morphology and main diagnostic features, as well as in ecology and occurrence in the southern Russian seas. Although studied using a SEM (Makarova, 1988: Plate 29: 9, 12, 13), the quality of illustrations is insufficient to solve the issues of conspecificity or separation of the species, and in recent publications the species name is listed without any description and illustrations. In case of species separation, we suggest that some records of *T. incerta* in the Black Sea (*e.g.*, Genkal, Terenko, 2014) may be referred to as *T. parva*.

The data by Kiss *et al.* (2012) on the range of areolae of *T. incerta* (Table 2) undoubtedly surpass all published data, and our calculations of areolae density in illustrations in the above-mentioned article indicate a similar density of 12–14 areolae in 10 µm. Moreover, the authors provide data on the presence of "usually" 5 satellite pores of marginal fultoportulae, which may indicate inaccuracies in calculations or misidentifications.

The analysis of both original and published data on *Thalassiosira incerta* indicating rather distinct differences in the areolae density on a valve and its mantle, as well as the presence of a distinct central rosette of areolae, allow us to separate new varieties. Their description is given below. We note that we ascribe the type habitat and some our findings to the type variety, the majority of freshwater records and the major part of our findings to var. *fluvialis* and our findings from the Ancient Azov layers of the Taganrog Bay deposits (the Sea of Azov) to var. *strelnikovae*.

Phylum **BACILLARIOPHYTA**
Class **MEDIOPHYCEAE** Medlin et Kaczmarska
Order **THALASSIOSIRALES** Glezer et I. V. Makarova
Family **Thalassiosiraceae** M. Lebour

Thalassiosira incerta I. V. Makarova, 1961, Bot. Mater. Otd. Sporov. Rast. Bot. Inst. Komarova Akad. Nauk S.S.S.R., 14: 50.

Frustules disc-like, lens-like, 8–14 µm high. Valves flat or slightly concave, with moderately low mantle. Foramens of areolae large, rarely small, rounded, elliptical, or irregularly shaped, cribrum large, irregular-rounded; areolae on valve mantle smaller, often vertically elongated, in vertical rows. Central fultoportulae with 3–4 satellite pores usually in the middle part of radius of small annulus, around the central areola, which usually smaller than areolae on valve face; externally, the processes as circular aperture. Marginal fultoportulae with 4 satellite pores, with short external tubes and small short internal tubes. Single rimoportula, located a little off the ring of marginal processes, with long external tube, 0.7–1.5 μm long, and internal short thickened or flattened tube located on small tubercle, slit of process oriented radially, rarely tangentially. Occluded processes rare, unevenly distributed, sometimes broadened at end, 1.5–3 in 10 μm. Girdle of 2–6 open copulas, 0.7–4.7 μm wide, single row of pores near valvocopula margin, 50–70 pores in 10 μm.

Var. **incerta** Plate I

Valves 25–39 μm in diam. Areolae pattern tangential-radial, (7)8–9 areolae in 10 μm in centre, 8–10 areolae in 10 μm near margin, 25–30 areolae in 10 μm on mantle and 16–17 cribrum pores in 1 μm. Central areola occluded; 4–6 central fultoportulae, 4–5 marginal fultoportulae in 10 μm.

Locality: Black Sea (?), Sea of Azov, Caspian Sea, Aral Sea, New and Ancient Azov layers of the Sea of Azov deposits, rarely.

Var. **fluvialis** Gogorev et Kovaleva, var. nov. Plate II

Valves 19–36 μm in diam. Areolae pattern tangential-radial and indistinctly fasciculated, 12–14 areolae in 10 μm in center, 14–16 areolae in 10 μm near margin, 30–35 areolae in 10 μm on mantle and 14–18 cribrum pores in 1 μm. Central areola usually open and through; 4–6 central fultoportulae, 4–5 marginal fultoportulae in 10 μm.

Diagnosis. *Thalassiosira incerta* var. *fluvialis* is similar to *T. incerta* var. *incerta* and *T. incerta* var. *strelnikovae* in the size of valves and the number of central and marginal fultoportulae, and it differs from them by the areolae density, especially on a mantle. The variety is similar to *T. parva* in valve size, the areolae density in the center and on a mantle and the number of central fultoportulae; it differs from it by the density of areolae near the margin (Table 2).

Holotype: The specimen on brass stub TZ-VII_155-160_2013 stored at the Southern Scientific Centre RAS, Rostov-on-Don, illustrated in Plate II: 2. Isotypes: slide No. 8 stored at the Southern Scientific Centre RAS, Rostov-on-Don, slide LE A0000297 (No. 717).

Type locality: Russia, Sea of Azov, 47°04′24.8″N, 38°28′30.1″E, the Holocene deposits, the Ancient Azov layers, 4590±160 calendar years BP, core Tz–VII (155–160 cm), VII 2013, coll. *G. V. Kovaleva*.

Distribution. Recent surface sediments of the Sea of Azov, recorded in the Holocene deposits from the sediment cores of the Ancient and New Azov layers (the Taganrog Bay of the Sea of Azov), reported from rare (Ancient Azov) to frequent (New Azov).

Locality: rivers, lakes, water storage reservoirs, estuarine freshened areas, surface deposits in the Taganrog Bay (Sea of Azov), the New and Ancient Azov layers in the Sea of Azov deposits, rare to frequent in abundance.

Etymology: An infraspecific epithet refers to the freshwater location, especially in rivers.

Var. **strelnikovae** Gogorev et Kovaleva, var. nov. Plates III–VI

Valves 14–30(31) µm in diam. Areolae pattern radial-tangential, rarely fasciculated, 11–16 areolae in 10 µm in center, 14–19 areolae in 10 µm near margin and 22–30 areolae in 10 µm on mantle. Central areola usually open and through, rarely absent; 3–5 central fultoportulae, with rosette of large, usually elongated areolae around them; 4–6 marginal fultoportulae in 10 µm..

Diagnosis. *Thalassiosira incerta* var. *strelnikovae* is similar to *T. incerta* var. *incerta* and *T. incerta* var. *fluvialis* in valve size and the number of central and marginal fultoportulae, to *T. incerta* var. *fluvialis* in the density of areolae on the valve face and to *T. incerta* var. *incerta* — in the density of areolae on a mantle. The variety differs from *T. incerta* var. *incerta* by the areolae density on the valve face, from *T. incerta* var. *fluvialis* by the areolae density on the mantle. The variety is morphologically similar to *T. parva* in valve size, the areolae density in the center and the number of marginal fultoportulae and differs from it by the areolae density near the margin and on the mantle and by the number of central fultoportulae (Table 2).

Holotype: The specimen on brass stub TZ-VII_190-195_2013 stored at the Southern Scientific Centre RAS, Rostov-on-Don, illustrated in Plate III: 3. Isotypes: slide No. 9 stored at the Southern Scientific Centre RAS, Rostov-on-Don, slide LE A0000298 (No. 718).

Type locality: Russia, Sea of Azov, 47°04′24.8″N, 38°28′30.1″E, the Holocene deposits, the Ancient Azov layer deposits (from 5510±180 to 4590±180 calendar years BP), core Tz–VII (190–195 cm), VII 2013, coll. *G. V. Kovaleva*.

Distribution. Fossil variety, recorded only in the Holocene deposits from the sediment cores of the Ancient and New Azov layers (the Taganrog Bay of the Sea of Azov), reported from frequent to very frequent.

Etymology: An infraspecific epithet is in honour of the famous Russian diatomologist, Nina Ivanovna Strelnikova (28 May 1933 — 7 December 2020), who studied fossil diatoms for many years.

Acknowledgments

We express our gratitude to Roman G. Mikhalyuk (Rostov-on-Don, Russia), Yuri B. Okolodkov (Veracruz, Ver., Mexico) and Marcia M. Gowing (Seattle, WA, USA) for the English language assistance and improving the style. We are grateful to Alexey D. Potemkin (St. Petersburg, Russia) and Maria A. Gololobova (Moscow, Russia) for their useful comments on and improvements to the text of the manuscript. Data collection and sampling, laboratory analysis, microphotograph preparation, primary

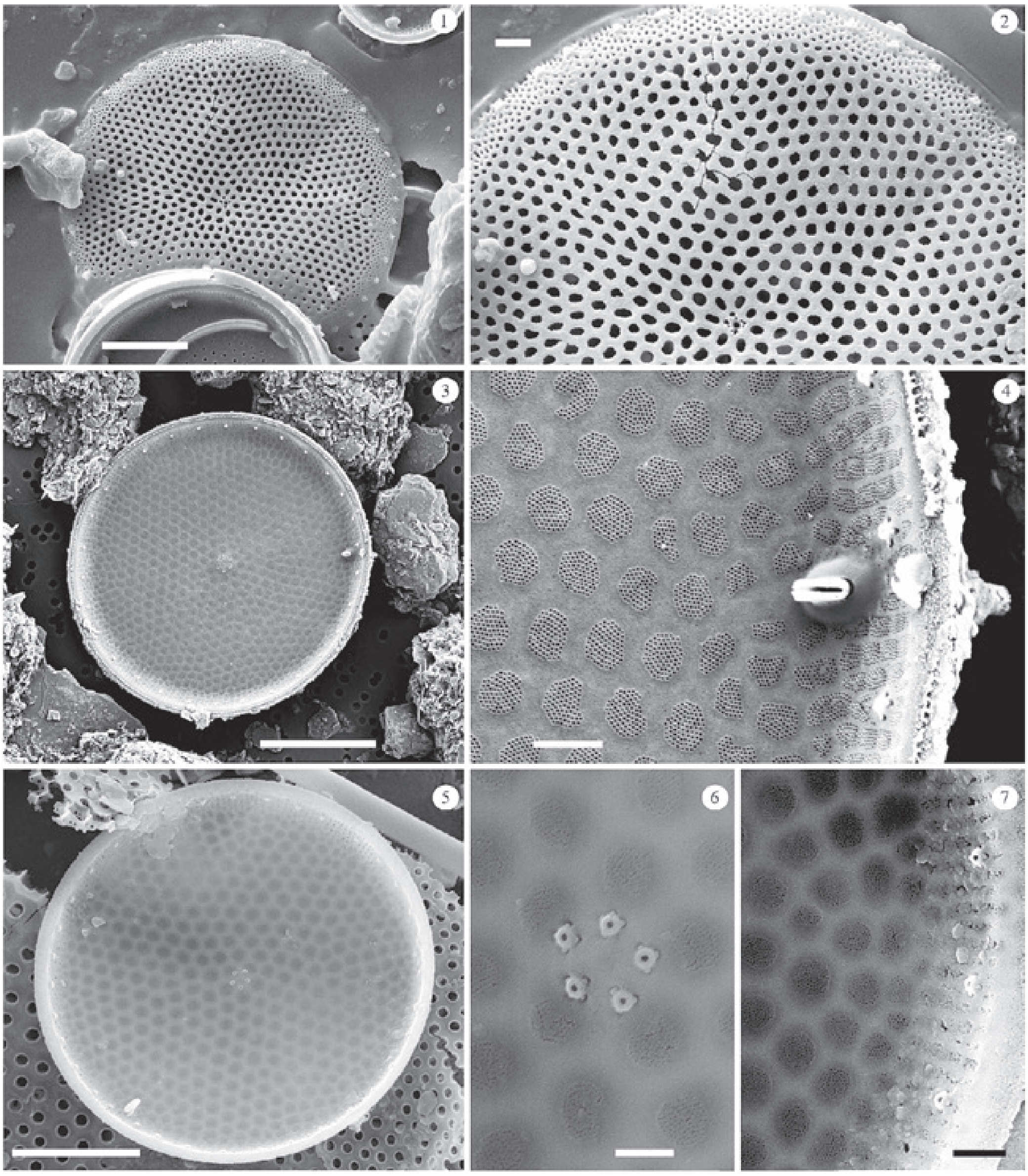


Plate I. *Thalassiosira incerta* var. *incerta*, SEM.
1, 2 — external valve surface; 3–7 — internal valve surface: 4 — valve margin, cribrum of areolae, rimoportula, 6 — valve center, central fultoportulae (1, 2 — the Ancient Azov layer deposits, Taganrog Bay; 3, 4 — surface sediments of the Sea of Azov; 5–7 — surface sediments, Taganrog Bay, Sea of Azov).
Scale bars: 1, 3, 5 — 10 μm; 2 — 2 μm; 4, 6, 7 — 1 μm.

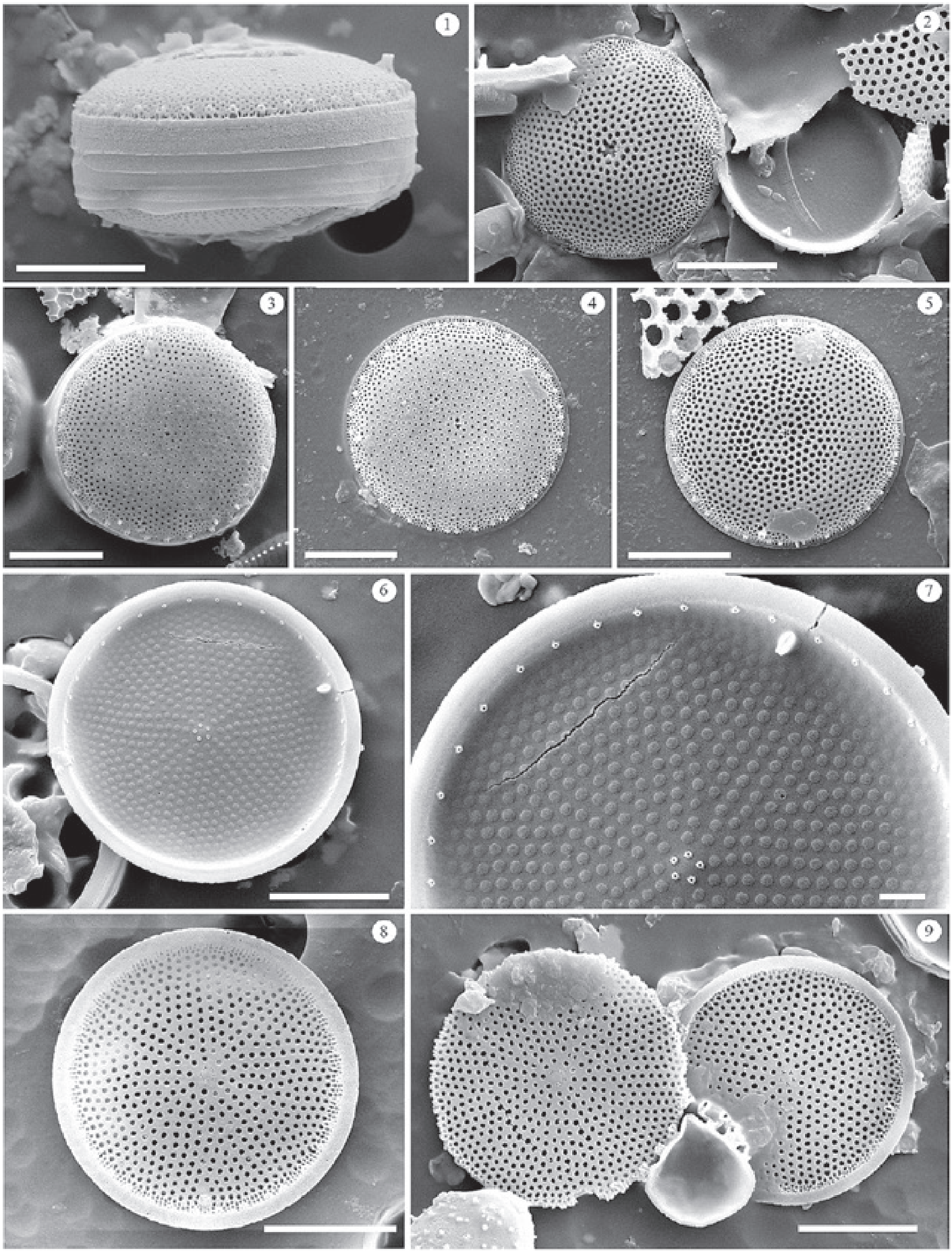


Plate II. *Thalassiosira incerta* var. *fluvialis*, SEM.
1 — frustule; 2, 9 — external (*left*) and internal (*right*) valve surfaces: 2 — holotype of *T. incerta* var. *fluvialis*, brass stub TZ-VII_155-160_2013, (left valve); 3–5 — external valve surface; 6–8 — internal valve surface: 7 — valve part, marginal fultoportulae, central fultoportulae and rimoportula (1 — recent surface sediments, Taganrog Bay; 2–4 — the Ancient Azov layer deposit Taganrog Bay; 5–9 — the New Azov layer deposits, Taganrog Bay).
Scale bars: 1–6, 8, 9 — 10 µm; 7 — 2 µm.

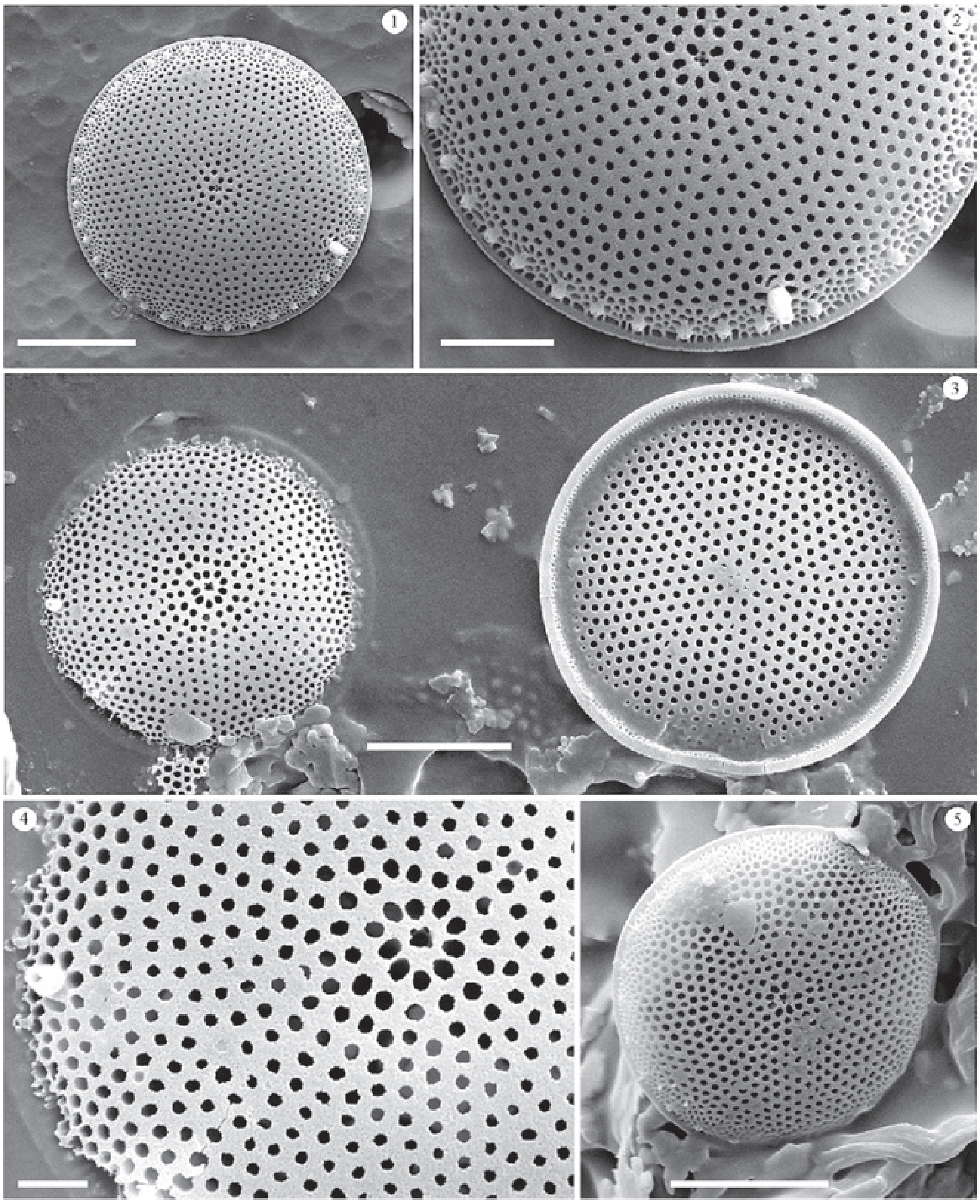


Plate III. *Thalassiosira incerta* var. *strelnikovae*, SEM.
1, 2, 4, 5 — external valve surface; 3 — holotype of *T. incerta* var. *strelnikovae*,
brass stub TZ-VII_190-195_2013, (left valve) (the Ancient Azov layer deposits, Taganrog Bay).
Scale bars: 1, 3, 4 — 10 μm; 2, 5 — 2 μm.

47

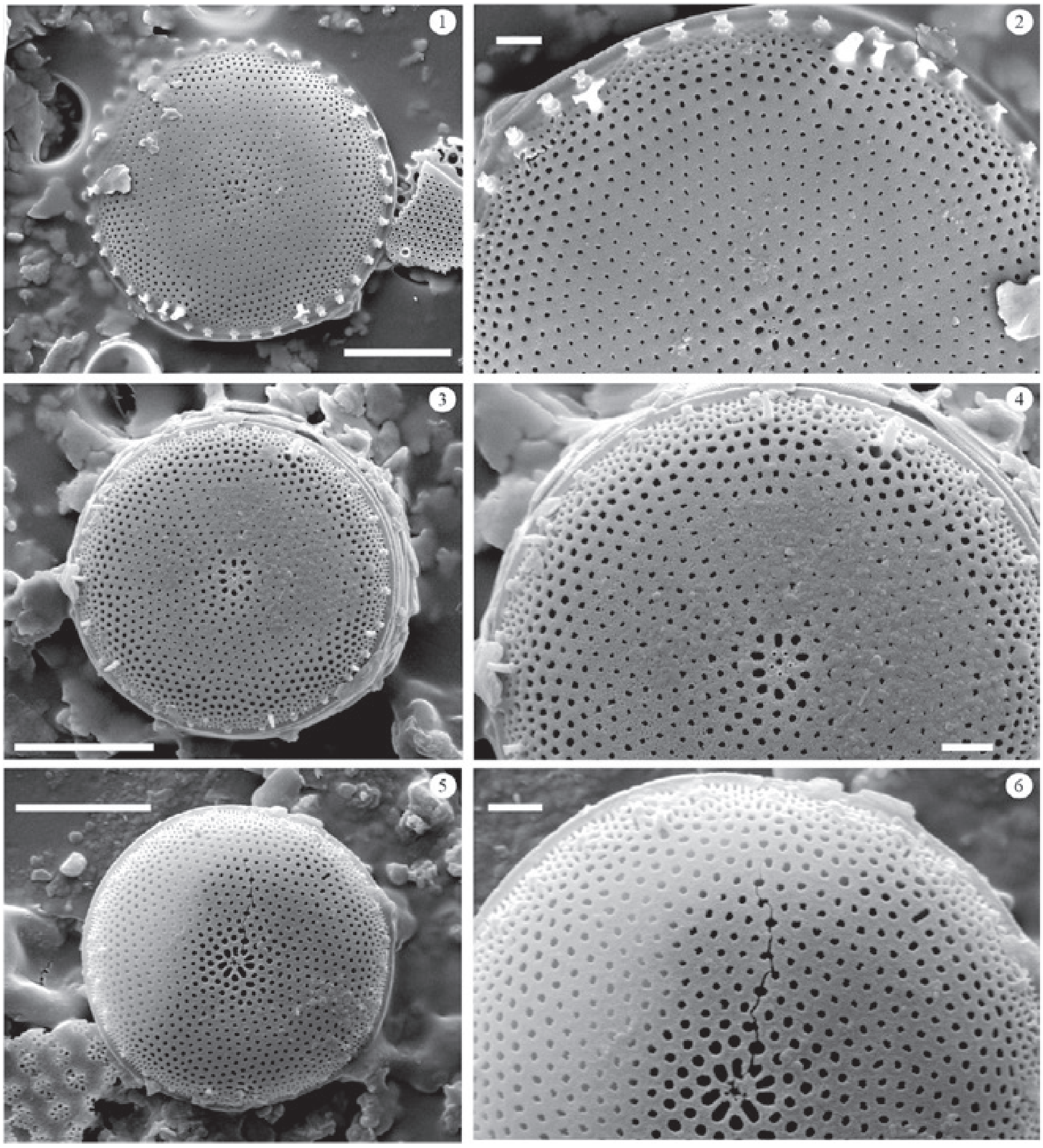


Plate IV. *Thalassiosira incerta* var. *strelnikovae*, SEM.
1–6 — external valve surface, rosette of central elongated areolae, occluded processes:
2, 4, 6 — center and margin of valve, central fultoportulae
(the Ancient Azov layer deposits, Taganrog Bay).
Scale bars: 1, 3, 5 — 10 μm; 2, 4, 6 — 2 μm.

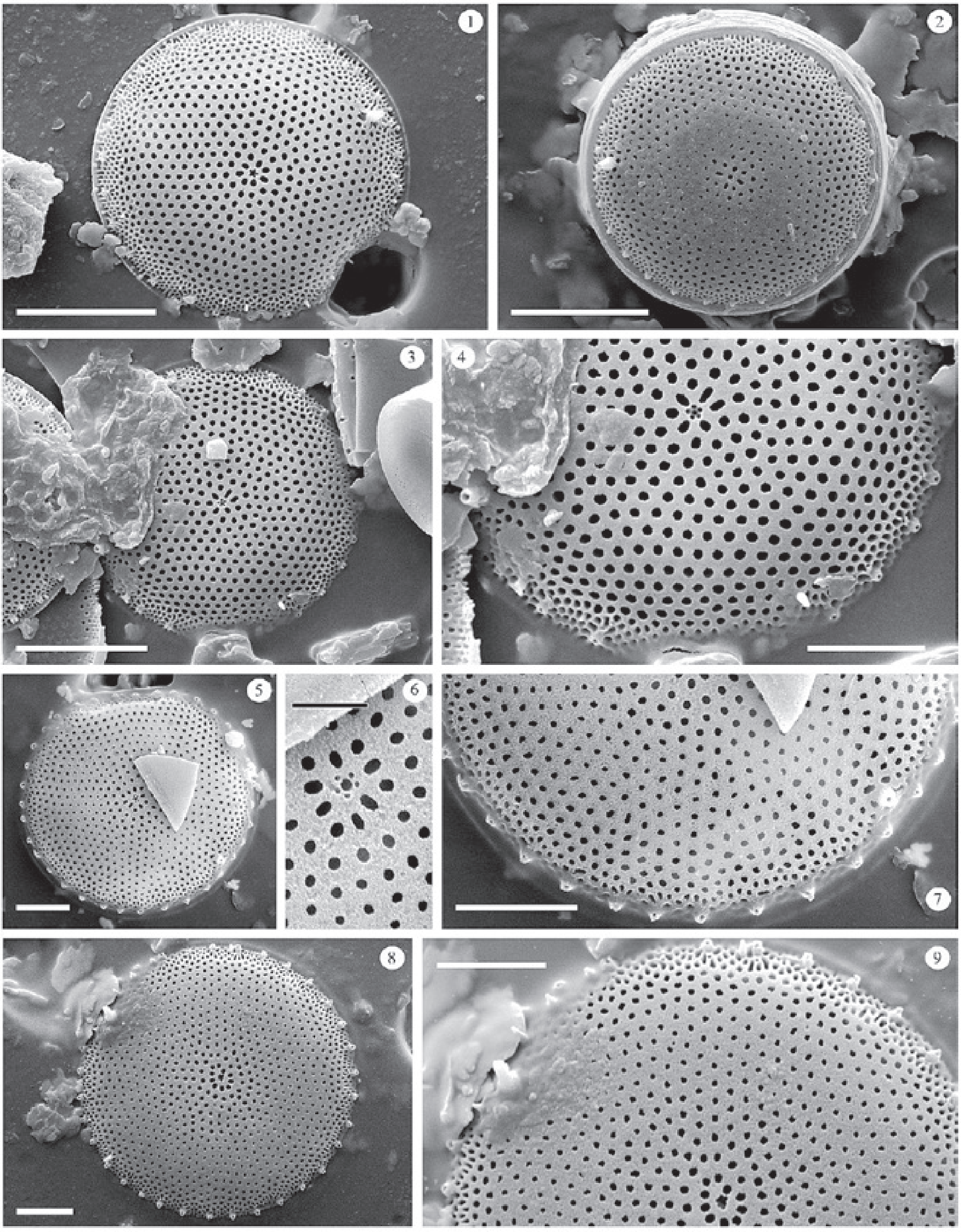


Plate V. *Thalassiosira incerta* var. *strelnikovae*, SEM.
1–9 — external valve surface: 4, 7, 9 — part of valve, magrinal fultoportulae,
6 — center of valve (the Ancient Azov layer deposits, Taganrog Bay).
Scale bars: 1–3 — 10 µm; 4, 5, 7–9 — 5 µm; 6 — 2 µm.

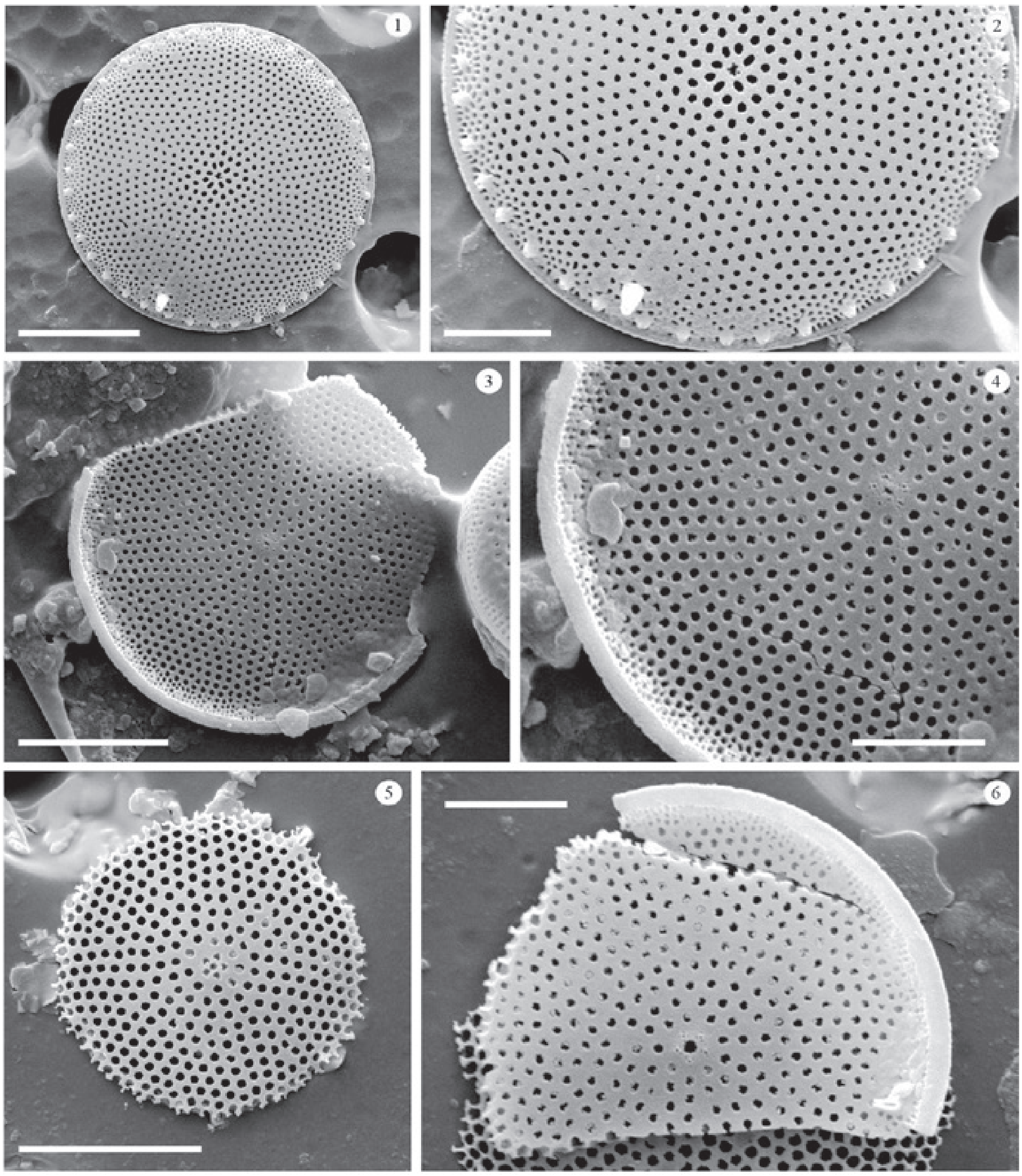


Plate VI. *Thalassiosira incerta* var. *strelnikovae*, SEM.
1, 2 — external valve surface, marginal fultoportulae, rimoportula; 3–6 — internal valve surface, central fultoportulae (the Ancient Azov layer deposits, Taganrog Bay).
Scale bars: 1, 3, 5 — 10 μm; 2, 4, 6 — 5 μm.

analysis of diatom morphology are by G. V. Kovaleva and A. V. Nazarenko (at the Southern Scientific Centre RAS with the financial support from the Russian Science Foundation (Grant No. 16-17-10170-P). During the study, we used the logistic support of the Centre of Collective Usage of Facilities of the Southern Scientific Centre RAS, No. 501994 (SEM, etc.). The analysis of morphology and taxa description were carried out by R. M. Gogorev within the framework of the institutional research project "Flora and taxonomy of algae, lichens and bryophytes in Russia and phytogeographically important regions of the world" (No. 121021600184-6) of the Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences.

References

Cox E. J. 2015. Coscinodiscophyceae, Mediophyceae, Fragilariophyceae, Bacillariophyceae (Diatoms). *Syllabus of plant families. Adolf Engler's Syllabus der Pflanzenfamilien. Part 2/1. Photoautotrophic eukaryotic algae: Glaucocystophyta, Cryptophyta, Dinophyta/Dinozoa, Haptophyta, Heterokontophyta/Ochrophyta, Chlorarachniophyta/Cercozoa, Euglenophyta/Euglenozoa, Chlorophyta, Streptophyta p. p.* Berlin: 64–103.

Diatomovye vodorosli SSSR: iskopaemye i sovremennye. T. 1 [The diatoms of the USSR. Fossil and recent. Vol. 1]. 1974. Leningrad: 403 p. (In Russ.).

Genkal S. I., Babanazarova O. V., Haffner G. D. 2009a. New data on the flora of diatoms (Centrophyceae) in Lake Erie (Canada, USA). *International Journal on Algae* 11(4): 337–350. https://doi.org/10.1615/InterJAlgae.v11.i4.30

Genkal S. I., Golokolenova T. B. 2008. Centric diatom algae of the Tsimlyansk Reservoir. *Povolzhskii ekologicheskii zhurnal* 3: 178–189. (In Russ. with Engl. abstract).

Genkal S. I., Okhapkin A. G. 2013. Centric diatoms (Centrophyceae) of the lower reaches of the Oka River (Russian Federation). *Hydrobiological Journal* 49(3): 41–57. https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v49.i3.40

Genkal S. I., Terenko L. M. 2014. New data on the flora of Centrophyceae (Bacillariophyta) of the Black Sea. *Hydrobiological Journal* 50(4): 37–48. https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v50.i4.40

Genkal S. I., Terenko L. M., Nesterova D. A. 2009b. New data on the centric diatoms (Centrophyceae, Bacillariophyta) of the Danube Region of the Black Sea. *Hydrobiological Journal* 45(6): 51–69. https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v45.i6.40

Gogorev R. M., Kovaleva G. V. 2017. *Thalassiosira azovica* sp. nov. and other species of the genus *Thalassiosira* (Bacillariophyta) from the Holocene deposits of the Sea of Azov. *Novosti sistematiki nizshikh rastenii* 51: 37–56. (In Russ. with Engl. abstract). https://doi.org/10.31111/nsnr/2017.51.37

Hasle G. R. 1978. Some freshwater and brackish water species of the diatom genus *Thalassiosira* Cleve. *Phycologia* 17(3): 263–292. https://doi.org/10.2216/i0031-8884-17-3-263.1

Joúse A. P. 1953. About the methods of the technical processing of the rocks in case of the diatom analysis. *Diatomovyi sbornik*. Leningrad: 206–220. (In Russ.).

Kiss K. T., Klee R., Ector L., Acs E. 2012. Centric diatoms of large rivers and tributaries in Hungary: morphology and biogeographic distribution. *Acta Botanica Croatica* 71(2): 311–363. https://doi.org/10.2478/v10184-011-0067-0

Kovaleva G. V. 2007. Detection of layers with *Actinocyclus octonarius* Ehr. and *Actinoptychus senarius* (Ehr.) Ehr. in the Late Quaternary sediments of the Gulf of Temryuk (the Sea of Azov). *Paleontologiya, paleobiogeografiya i paleoekologiya: Materialy LII sessii Paleontologicheskogo obshchestva Rossiiskoi akademii nauk* [Paleontology, paleobiogeography and paleoecology: Proceedings of the LII session of the Paleontological Society of the Russian Academy of Sciences]. St. Petersburg: 68–70. (In Russ.).

Kovaleva G. V., Dyuzhova K. V., Zolotareva A. E. 2017. Diatom algae of the Sea of Azov late Holocene sediments as an indicator of the sea-level fluctuations. *Nauka yuga Rossii* 13(4): 83–92. (In Russ. with Engl. abstract). https://doi.org/10.23885/2500-0640-2017-3-4-83-92

Kovaleva G. V., Izmailov Ya. A., Zolotareva A. E. 2015. Diatom algae of the Sea of Azov Late Holocene sediments as an indicator of the sea level fluctuations. *Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra* 11(1): 53–62. (In Russ. with Engl. abstract).

Kovaleva G. V., Nazarenko A. V. 2019. The diatoms analysis of Holocene deposits of Taganrog Bay. *Nauka yuga Rossii* 15(2): 53–66. (In Russ. with Engl. abstract). https://doi.org/10.7868/S25000640190206

Kovaleva G. V., Zolotareva A. E. 2013. Transgressive-regressive stages of the Sea of Azov development (based on the results of diatoms analysis of the New Azov layer deposits). *Fundamental'nye problemy kvartera, itogi izucheniya i osnovnye napravleniya dal'neishikh issledovanii* [Fundamental problems of the Quarter, results of the study and the main directions of further research]. Rostov-on-Don: 280–283. (In Russ.).

Makarova I. V. 1961. New species of diatoms of the Coscinodiscaceae family from the Northern Caspian Sea. *Botanicheskie materialy otdela sporovykh rastenii Botanicheskogo Instituta imeni V. L. Komarova Akademii Nauk SSSR* 14: 49–52. (In Russ.).

Makarova I. V. 1988. *Diatomovye vodorosli morei SSSR: rod Thalassiosira Cl.* [The diatoms of seas of the USSR: the genus *Thalassiosira* Cl.]. Leningrad: 117 p. (In Russ.).

Makarova I. V., Kuzmin G. V., Ryabkova L. P. 1976. New data on the thin structure of frustule of the *Th. incerta* Makar. and *Stephanodiscus tenuis* Hust. (Bacillariophyta). *Novosti sistematiki nizshikh rastenii* 13: 28–31. (In Russ.).

Matishov G. G., Dyuzhova K. V., Kovaleva G. V., Pol'shin V. V. 2016. New data on sedimentation and biostratigraphy of ancient and New Azov deposits (Sea of Azov). *Doklady Earth Sciences* 467(2): 371–375. https://doi.org/10.1134/S1028334X16040048

Matishov G. G., Kovaleva G. V., Novenko E. Yu. 2007. Results of spore-and-pollen and diatom analyses of columns on the shelf of the Sea of Azov. *Doklady Earth Sciences* 416(7): 1079–1084. https://doi.org/10.1134/S1028334X07070227

Okhapkin A. G., Genkal S. I., Vodeneeva E. L., Sharagina E. M., Bondarev O. O. 2016. To ecology and morphology of *Thalassiosira incerta* Makarova (Bacillariophyta). *Inland Water Biology* 9(2): 126–134. https://doi.org/10.1134/S1995082916020139

Proschkina-Lavrenko A. I. 1955. Relict diatoms in the plankton of the Black Sea. *Botanicheskie materialy otdela sporovykh rastenii Botanicheskogo Instituta imeni V. L. Komarova Akademii Nauk SSSR* 10: 45–54. (In Russ.).

Proschkina-Lavrenko A. I., Makarova I. V. 1968. *Vodorosli planktona Kaspiiskogo morya* [Plankton algae of the Caspian Sea]. Moscow; Leningrad: 293 p. (In Russ.).

Round F. E., Crawford R. M., Mann D. G. 1990. *The diatoms. Biology and morphology of the genera.* Cambridge: 747 p.

Stratigrafiya SSSR. Chetvertichnaya sistema. T. 2 [Stratigraphy of the USSR. Quaternary system. Vol. 2]. 1984. Moscow: 556 p. (In Russ.).

Литература

Cox E. J. 2015. Coscinodiscophyceae, Mediophyceae, Fragilariophyceae, Bacillariophyceae (Diatoms). *Syllabus of Plant Families. Adolf Engler's Syllabus der Pflanzenfamilien. Part 2/1. Photoautotrophic eukaryotic Algae: Glaucocystophyta, Cryptophyta, Dinophyta/Dinozoa, Haptophyta, Heterokontophyta/Ochrophyta, Chlorarachniophyta/Cercozoa, Euglenophyta/Euglenozoa, Chlorophyta, Streptophyta p. p.* Berlin: 64–103.

[Diatomovye ...] *Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т. 1.* 1974. Л.: 403 с.

Genkal S. I., Babanazarova O. V., Haffner G. D. 2009a. New data on the flora of diatoms (Centrophyceae) in Lake Erie (Canada, USA). *International Journal on Algae* 11(4): 337–350.

https://doi.org/10.1615/InterJAlgae.v11.i4.30

[Genkal, Golokolenova] Генкал С. И., Голоколенова Т. Б. 2008. Центрические диатомовые водоросли Цимлянского водохранилища. *Поволжский экологический журнал* 3: 178–189.

Genkal S. I., Okhapkin A. G. 2013. Centric diatoms (Centrophyceae) of the lower reaches of the Oka River (Russian Federation). *Hydrobiological Journal* 49(3): 41–57. https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v49.i3.40

Genkal S. I., Terenko L. M. 2014. New data on the flora of Centrophyceae (Bacillariophyta) of the Black Sea. *Hydrobiological Journal* 50(4): 37–48. https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v50.i4.40

Genkal S. I., Terenko L. M., Nesterova D. A. 2009b. New data on the centric diatoms (Centrophyceae, Bacillariophyta) of the Danube Region of the Black Sea. *Hydrobiological Journal* 45(6): 51–69. https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v45.i6.40

[Gogorev, Kovaleva] Гогорев Р. М., Ковалева Г. В. 2017. *Thalassiosira azovica* sp. nov. и другие виды рода *Thalassiosira* (Bacillariophyta) из голоценовых отложений Азовского моря. *Новости систематики низших растений* 51: 37–56. https://doi.org/10.31111/nsnr/2017.51.37

Hasle G. R. 1978. Some freshwater and brackish water species of the diatom genus *Thalassiosira* Cleve. *Phycologia* 17(3): 263–292. https://doi.org/10.2216/i0031-8884-17-3-263.1

[Joúse] Жузе А. П. 1953. К методике технической обработки горных пород в целях диатомового анализа. *Диатомовый сборник*. Л.: 206–220.

Kiss K. T., Klee R., Ector L., Acs E. 2012. Centric diatoms of large rivers and tributaries in Hungary: morphology and biogeographic distribution. *Acta Botanica Croatica* 71(2): 311–363. https://doi.org/10.2478/v10184-011-0067-0

[Kovaleva] Ковалева Г. В. 2007. Обнаружение слоев с *Actinocyclus octonarius* Ehr. и *Actinoptychus senarius* (Ehr.) Ehr. в позднечетвертичных осадках Темрюкского залива (Азовское море). *Палеонтология, палеобиогеография и палеоэкология: Материалы LII сессии Палеонтологического общества РАН*. СПб.: 68–70.

[Kovaleva *et al.*] Ковалева Г. В., Дюжова К. В., Золотарева А. Е. 2017. Диатомовые водоросли из средне- и позднеголоценовых отложений Азовского моря как индикаторы колебаний уровня водоема. *Наука юга России* 13(4): 83–92. https://doi.org/10.23885/2500-0640-2017-3-4-83-92

[Kovaleva *et al.*] Ковалева Г. В., Измайлов Я. А., Золотарева А. Е. 2015. Диатомовые водоросли из позднеголоценовых отложений Азовского моря как индикаторы колебаний уровня водоема. *Вестник Южного научного центра* 11(1): 53–62.

[Kovaleva, Nazarenko] Ковалева Г. В., Назаренко А. В. 2019. Диатомовый анализ голоценовых отложений Таганрогского залива. *Наука юга России* 15(2): 53–66. https://doi.org/10.7868/S25000640190206

[Kovaleva, Zolotareva] Ковалева Г. В., Золотарева А. Е. 2013. Трансгрессивно-регрессивные этапы развития Азовского моря (по результатам диатомового анализа новоазовских отложений). *Фундаментальные проблемы квартера, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований*. Ростов-на-Дону: 280–283.

[Makarova] Макарова И. В. 1961. Новые виды диатомовых водорослей сем. Coscinodiscaceae из Северного Каспия. *Ботанические материалы отдела споровых растений Ботанического института имени В. Л. Комарова Академии наук СССР* 14: 49–52.

[Makarova] Макарова И. В. 1988. *Диатомовые водоросли морей СССР: Род Thalassiosira Cl.* Л.: 117 с.

[Makarova *et al.*] Макарова И. В., Кузьмин Г. В., Рябкова Л. П. 1976. Новые данные о тонкой структуре панциря *Th. incerta* Makar. и *Stephanodiscus tenuis* Hust. (Bacillariophyta). *Новости систематики низших растений* 13: 28–31.

Matishov G. G., Dyuzhova K. V., Kovaleva G. V., Pol'shin V. V. 2016. New data on sedimentation and biostratigraphy of ancient and New Azov deposits (Sea of Azov). *Doklady Earth Sciences* 467(2): 371–375. https://doi.org/10.1134/S1028334X16040048

Matishov G. G., Kovaleva G. V., Novenko E. Yu. 2007. Results of spore-and-pollen and diatom analyses of columns on the shelf of the Sea of Azov. *Doklady Earth Sciences* 416(7): 1079–1084. https://doi.org/10.1134/S1028334X07070227

Okhapkin A. G., Genkal S. I., Vodeneeva E. L., Sharagina E. M., Bondarev O. O. 2016. To ecology and morphology of *Thalassiosira incerta* Makarova (Bacillariophyta). *Inland Water Biology* 9(2): 126–134. https://doi.org/10.1134/S1995082916020139

[Proschkina-Lavrenko] Прошкина-Лавренко А. И. 1955. Реликтовые диатомовые в планктоне Черного моря. *Ботанические материалы отдела споровых растений Ботанического института имени В. Л. Комарова Академии наук СССР* 10: 45–54.

[Proschkina-Lavrenko, Makarova] Прошкина-Лавренко А. И., Макарова И. В. 1968. *Водоросли планктона Каспийского моря*. М.; Л.: 293 с.

Round F. E., Crawford R. M., Mann D. G. 1990. *The diatoms. Biology and morphology of the genera*. Cambridge: 747 p.

[Stratigrafiya...] *Стратиграфия СССР. Четвертичная система (полутом 2)*. 1984. М.: 556 с.

ГИДРОЛОГИЯ, ГИДРОХИМИЯ

УДК 551.465.5; 551.506

ДИНАМИКА И ТЕРМОХАЛИННАЯ СТРУКТУРА ВОД КОНТАКТНЫХ ЗОН АЗОВСКОГО МОРЯ[1]

© 2022 г. Академик РАН Г. Г. Матишов[1,2], К. С. Григоренко[1,*]

Поступило 20.10.2021 г.
После доработки 27.10.2021 г.
Принято к публикации 28.10.2021 г.

Представлены результаты инструментальных измерений термохалинной структуры и течений в районах смешения пресных речных вод (Таганрогский и Темрюкский заливы) и черноморских вод (Керченский пролив) с водами Азовского моря за период 2018–2021 гг. На основе данных о водообмене построена предварительная классификация течений Таганрогского залива и Керченского пролива. Наибольшие скорости течений в Керченском проливе отмечены при северном и южном ветрах. При западном и восточном ветрах формируется мозаичная гидродинамическая картина. В Таганрогском заливе существует сложная система собственных колебаний водного бассейна, которая раскачивается восточными и западными ветрами и подпитывается донским стоком. Течения Азовского моря имеют более сложную структуру нежели считалось ранее. Повсеместно, помимо дрейфовой, существует и градиентная (сейшевая) составляющая, за счет которой наблюдаемые течения часто оказываются направлены против ветра, циклически меняют направление и скорость на противоположные.

Ключевые слова: Азовское море, маловодье Дона, сгонно-нагонные явления, сейши, морские течения

DOI: 10.31857/S2686739722020116

Проблема классификации течений в Азовском море актуальна, несмотря на десятилетия исследований. Контактных данных немного, и они достаточно фрагментарны [1–3]. Множество оценок получено по результатам математического моделирования [4–7], однако расчеты часто противоречат наблюдениям [8, 9]. Соленость Азовского моря изменяется под влиянием пресного речного стока и вод, поступающих из Черного моря. Испарение, атмосферные осадки и приток подземных вод не оказывают решающего воздействия на соленость, в то время как речной сток испытывает межгодовые и сезонные климатообусловленные колебания водности [10]. Проблема периодических изменений солености неоднократно рассматривалась ранее [11, 12]. В 2020 г. падение стока Дона привело к осолонению Азовского моря несравнимо больших масштабов, нежели в 70-е годы XX в. Ослабевшее стоковое течение Дона оказалось компенсировано за счет усиления черноморской адвекции. Изменения термохалинной структуры наиболее заметны в устьевой области Дона, а также в Керченском проливе. Влияние Кубани заметно в широком Темрюкском заливе только в узкой вдольбереговой полосе. Изучение механизма осолонения на основе новых данных является общей целью работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования использованы материалы экспедиций НИС “Денеб” 15.11–02.12.2018, 30.11–25.12.2020 и 15–29.04.2021. Вертикальные разрезы солености построены по данным CTD-измерений океанографическими зондами SBE-19 и CTD-90m. Параметры течений Таганрогского залива и Керченского пролива измерены доплеровским измерителем течений Aanderaa RCM 9LW, который последовательно подвешивался на нескольких горизонтах измерений каждой станции. Метеорологические характеристики в морских условиях получены с помощью судовой метеостанции нис “Денеб” Vaisala.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Частые сгоны в устьевой области Дона позволяют предположить, что в наиболее глубоких частях залива должно существовать компенсацион-

[1] *Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия*
[2] *Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра Российской академии наук, Мурманск, Россия*
**E-mail: Klim_grig@mail.ru*

[1] **Оригинальный текст:** *Матишов Г.Г., Григоренко К.С.* Динамика и термохалинная структура вод контактных зон Азовского моря // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 502. № 2. С. 107–114.

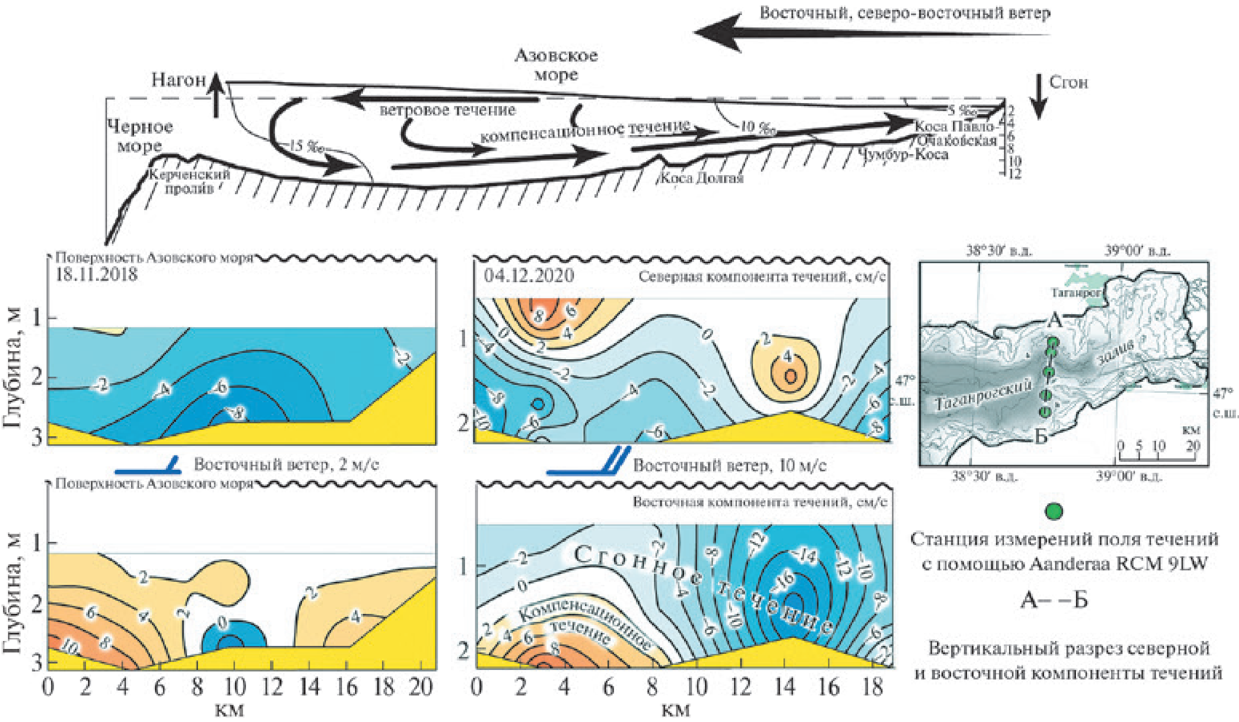


Рис. 1. Разрез течений в восточной части Таганрогского залива 18–19.11.2018 и 04.12.2020.

ное течение, стремящееся выровнять водную поверхность. В восточной части Таганрогского залива, в 10 км к западу от Таганрога и Чумбур-косы в ноябре 2018 г., декабре 2020 г. и апреле 2021 г. проведены съемки параметров переноса вод на запад и на восток (рис. 1). Условия измерений осенне-зимних съемок в 2018 и 2020 г. достаточно сильно отличались, при этом оба раза зафиксирован значительный зональный перенос вод. В 2018 г., 18–19 ноября, наблюдался слабый (2 м/с) восточный ветер и “откат” масс воды в Таганрогском заливе после “сильной верховки” из моря к реке. 4 декабря 2020 г. измерения проводились в активную фазу интенсивного ветрового сгона при восточном ветре 10 м/с. Это привело к падению уровня воды на метр и сокращению площади сечения разреза. Крайние северная и южная станции выполнялись немного ближе к соседним относительно сетки 2018 г.

В 2020 г. инструментально измерено компенсационное (восточное) течение Таганрогского залива в условиях сильного сгона (верховки), заполняющее наиболее глубокую часть залива – затопленное русло Палеодона, с максимальной скоростью 13.3 см/с.

Ядро сгонного (западного) течения располагалось ближе к южному берегу, было направлено на северо-запад, вдоль подводной оконечности Чумбурской косы. Максимальная скорость его восточной компоненты составила 19.2 см/с. Общее направление течений соответствует батиметрии залива. В придонном слое течение направлено вдоль изгибов долины. В приповерхностном – сгонное течение “растекается” по более широким и приглубым берегам Таганрогского залива, вдоль подводных кос (Чумбурская банка на южном берегу, Петрушино – на северном).

Во время весенней съемки в апреле 2021 г. расходы воды в Дону в ст. Раздорской достигали 350–400 м^3/с. Измерения проводились в условиях слабого (до 5 м/с) западного (нагонного) ветра (рис. 2) и при практически полном отсутствии половодья. Уровень воды в дельте за период измерений поднялся на 0.5 м. В наиболее глубокой части разреза обнаружена струя, направленная на северо-восток с максимальной скоростью 21 см/с. Поток заполнил весь объем от поверхности до дна. С севера и юга от центральной струи обнаружены противотечения.

В районе Чумбурской банки, у южной границы разреза зафиксирована стратификация восточной компоненты течений, приповерхностный слой движется на восток, придонный – на запад, в сторону моря. Оба потока при этом имели южную составляющую.

Вклад Кубанского половодья в распреснение и динамику вод Азовского моря весной 2021 г. оказался особенно заметным. Приток в Красно-

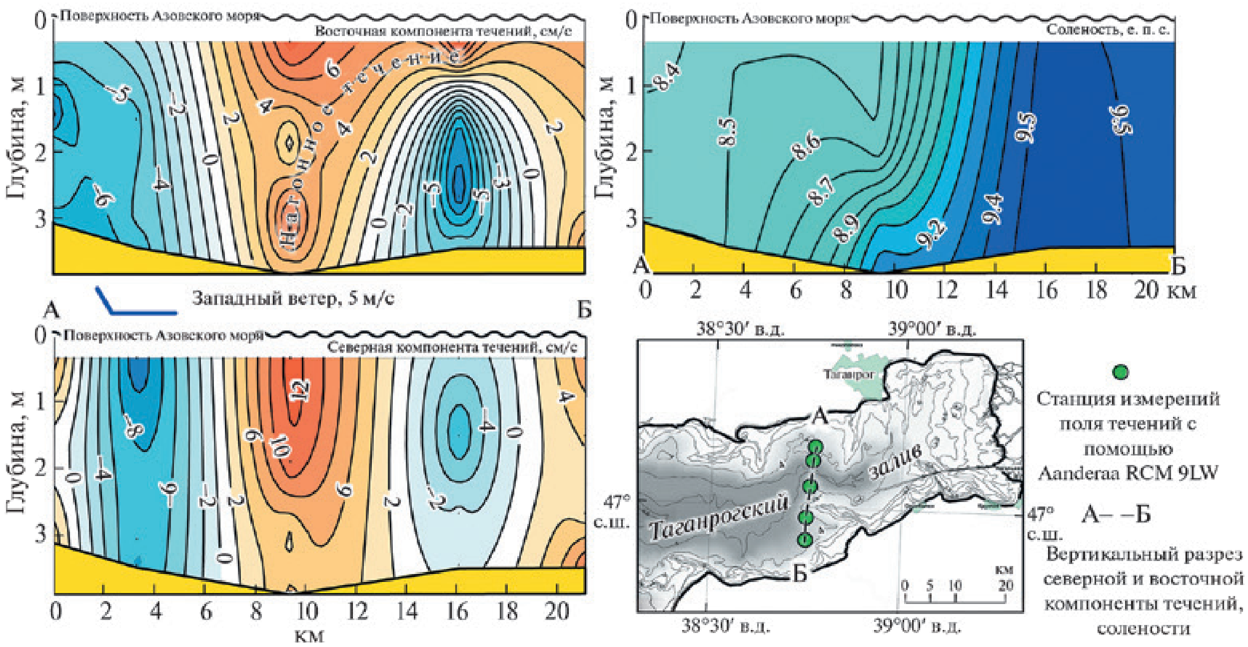


Рис. 2. Разрез течений и солености в восточной части Таганрогского залива 17.04.2021.

дарское водохранилище 19 апреля 2021 г. составил 837 м^3/с, а сброс – 750 м^3/с [13]. Визуально воды Кубани оказались различимы на расстоянии 10–15 км от берега. Они отличались по цвету, прозрачности и большому количеству вынесенного мусора. Распреснение поверхностного слоя Темрюкского залива заметно на расстоянии 25 км от берега, где зафиксированы воды с соленостью менее 15 е.п.с. На поверхности наиболее близких к берегу станций соленость понизилась до 8 е.п.с. Слой скачка солености располагался на глубине около 2 м. Придонный слой имел соленость 15–15.5 е.п.с.

Течения имели беспорядочную структуру. Кубанские воды распространяются в циклоническом направлении со скоростью до 25 см/с в верхнем двухметровом слое на крайней береговой станции. На пятикилометровом удалении от берега обнаружена струя антициклонического направления с максимумом до 5 см/с. Еще через 5 км расположены потоки, движущиеся против и по часовой стрелке вдоль берега, с переносом в обоих до 8 см/с. На мористых станциях, расстоянии 15 км и далее от берега, наблюдалось движение воды преимущественно циклонического направления со средними скоростями 4–6 см/с и максимумом у поверхности – 14 см/с (рис. 3).

В северной части Керченского пролива (рис. 4) при восточном ветре формируется интенсивное вдольбереговое западное течение. Инструментально зарегистрирован перенос непосредственно черноморских вод (с соленостью более 17 е.п.с.) с максимальными скоростями более 10 см/с, и отклонением на запад. У Крымского берега западное ветровое течение складывается с придонным. Результирующий перенос, от поверхности до дна, направлен на северо-запад. Ядро течения (до 27 см/с) расположено на глубине 7–8 м. Центр переноса на юг находится в придонном горизонте, в пяти километрах от западной границы разреза. Наиболее интенсивное течение на запад (более 36 см/с) расположено на глубине 4 м, в 3 км от восточной границы разреза.

Съемка северной части Керченского пролива в апреле 2021 г. проходила в условиях усиления юго-юго-западного ветра. Схема течений и солености (рис. 5) с восточной стороны соответствует практически штилевой погоде (менее 2 м/с). Окончание работ на западной стороне сопровождалось семибалльным ветром (14 м/с). Зафиксированная схема течений, таким образом, имеет слабо показательную пространственную структуру, но ярко выраженную временную.

В начальный период отмечены слабые движения (2–4 см/с) и перемена направлений во всей толще – с севера на юг, с востока на запад. Хорошо заметна стратификация солености – распреснение водами кубанского половодья на поверхности (12.4 е.п.с.) и заполнение понижений дна водами с соленостью 15.6 е.п.с. В центральной части разреза ветер усилился до 7–9 м/с, водная толща устремилась в северо-западном направлении со скоростью до 19 см/с. Течение заметно ослабевало с глубиной. Глубже 5 м скорости до-

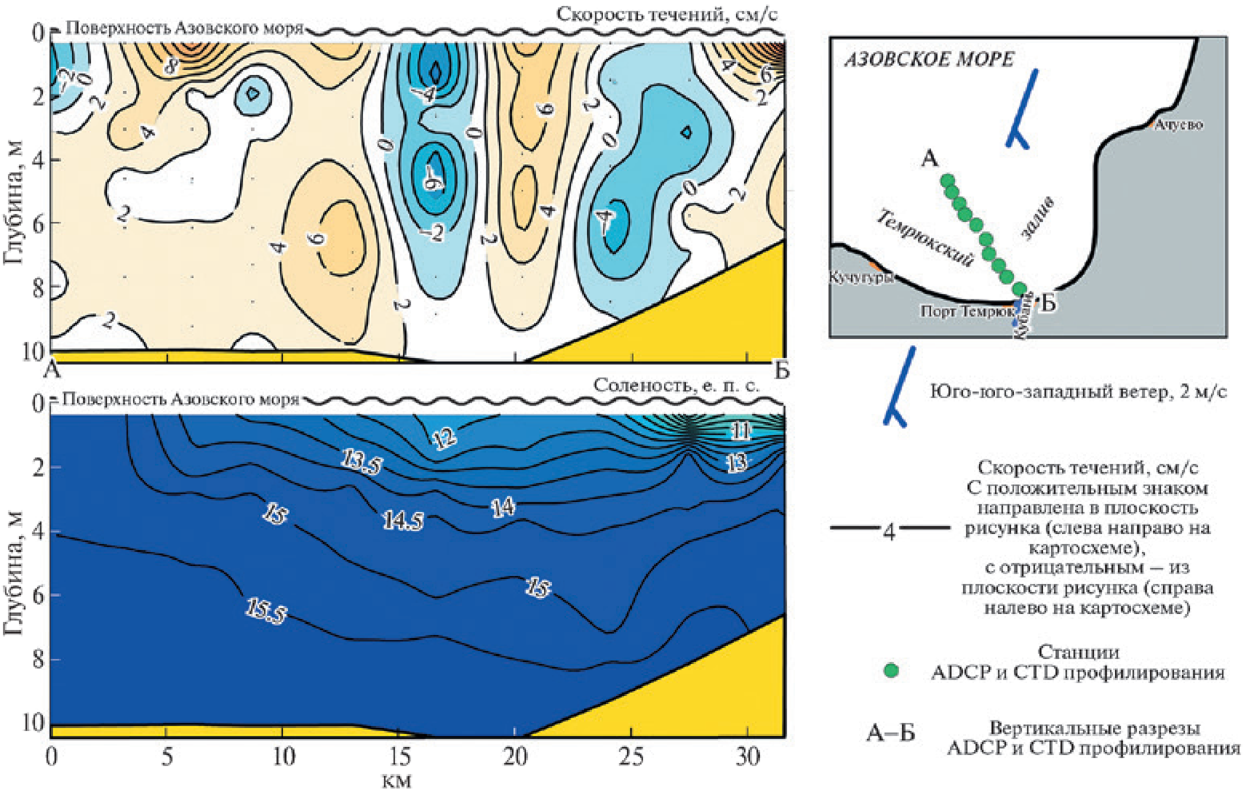


Рис. 3. Разрез течений и солености в Темрюкском заливе Азовского моря 19.04.2021. Скорости течений нормализованы относительно плоскости разреза А–Б.

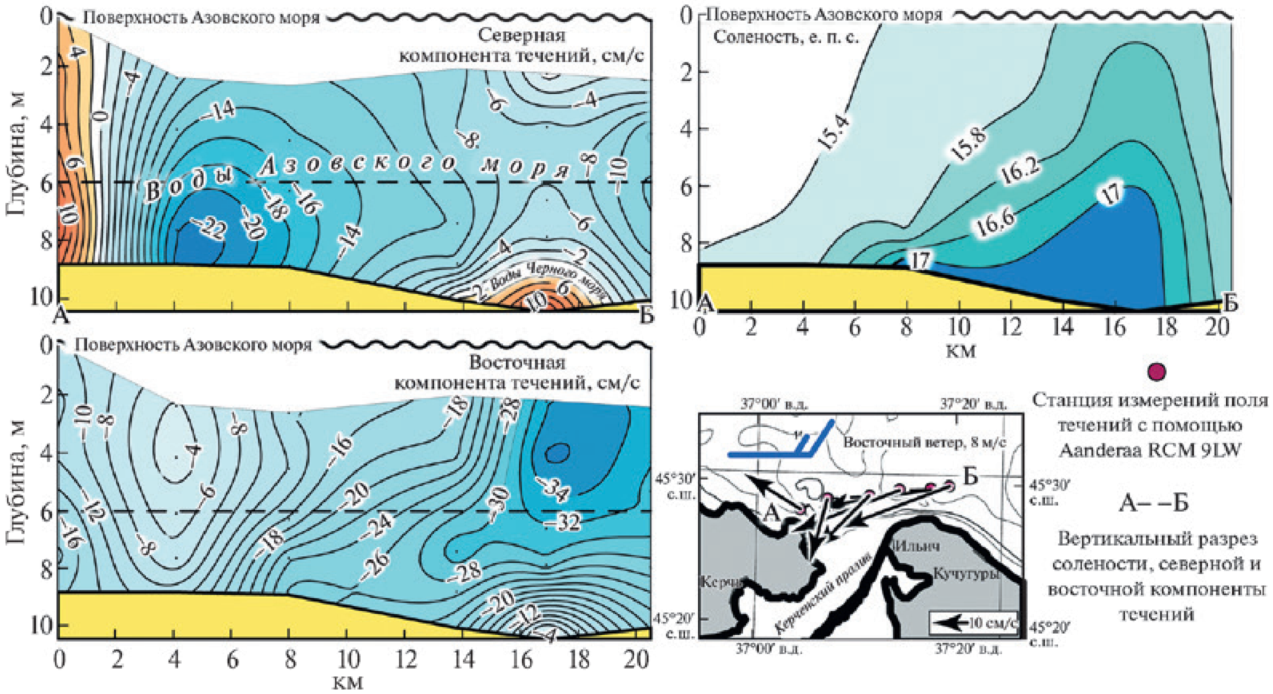


Рис. 4. Течения в северной части Керченского пролива 12.12.2020.

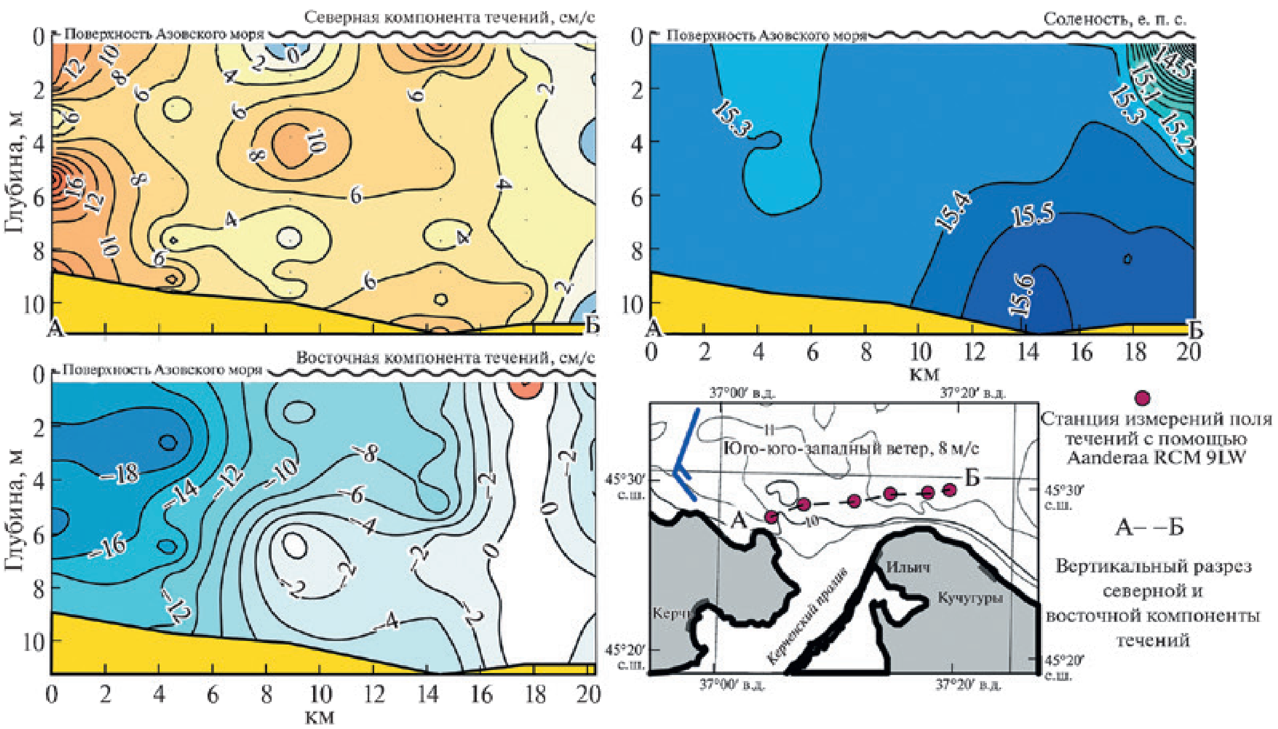


Рис. 5. Течения в северной части Керченского пролива 20.04.2021.

стигали 2–4 см/с на север и 0–2 см/с на запад. Сильный юго-юго-западный ветер (12–14 м/с) у берегов Крыма усилил течение до 42 см/с на запад-северо-запад.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 собраны все оценки переноса вод в Керченском проливе и Таганрогском заливе, полученные при измерениях НИС "Денеб" в 2018–2021 гг. Северный ветер средней силы приводит к пятикратному превышению переноса из Азовского моря (3988 м^3/с) над переносом из Черного моря (729 м^3/с). Расходы северного течения вдвое больше, чем среднегодовые расходы Волги [14] во время сильного южного ветра. Расход воды в южном направлении при этом минимальный – 70 м^3/с, в 240 раз меньше, чем с юга на север. При восточном ветре поток с севера на юг более чем вдвое превышает поток с юга на север (4874 и 1874 м^3/с соответственно, 519 м^3/с для непосредственно черноморских вод).

В целом проведенные измерения позволяют сказать, что при современном низком пресном речном стоке в Азовское море, практически при любых направлениях ветра, происходит адвекция (накачка) черноморских вод.

Кубань распресняет поверхностный слой Темрюкского залива Азовского моря. С изменением стока меняется масштаб зоны распреснения, при этом систематических отличий по сравнению с предыдущими измерениями не обнаружено [9].

В зависимости от межгодовой цикличности речного стока и преобладающего ветрового режима, в зонах контакта Азовского моря с Доном и Черным морем, выделяются несколько типов стратификации течений.

В период осенне-зимней межени в Таганрогском заливе, в условиях ветрового сгона, установлено наличие сгонного и компенсационного течений. Весной, при отсутствии половодья, во время ветрового нагона, выделены нагонное и стоковое течения.

Во время выраженного половодья сгонное течение совпадает по направлению и усиливается стоковым. Наложение нагонного и стокового течений, в период половодья или больших попусков Цимлянского гидроузла, может приводить к опасному повышению уровня воды и затоплению всей устьевой области Дона [15].

Встречные течения Таганрогского залива имеют большую изменчивость. Два измерения проведены в позднеосенний-зимний период, при минимальных расходах Дона (300–400 м^3/с) в условиях восточного ветра. В момент ослабевания сгонного ветра возвратное течение более чем в 30 раз превысило стоковое. В момент максимального развития "сильной верховки" на поверхно-

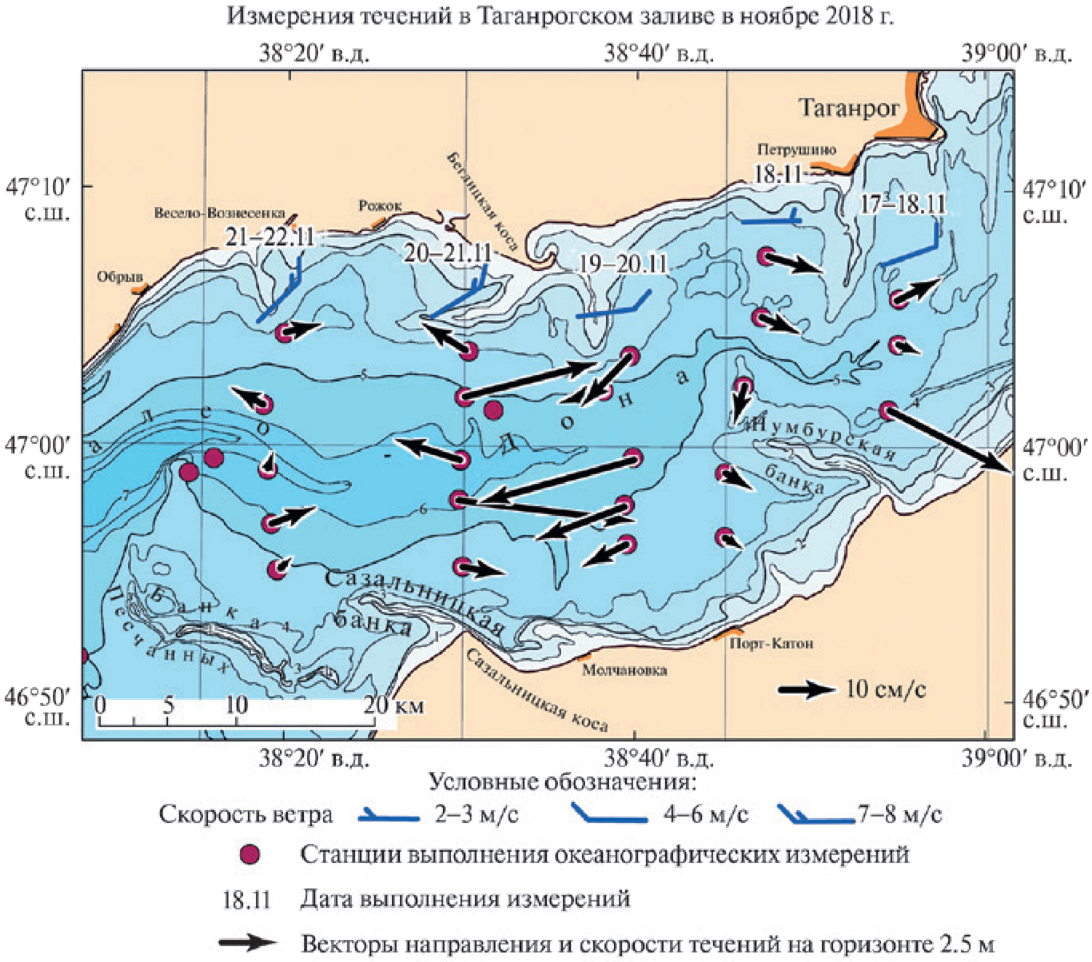


Рис. 6. Суточный характер изменений направления течений в Таганрогском заливе Азовского моря.

сти Таганрогского залива преобладало сгонное западное течение. Понижение дна, даже в условиях общей глубины разреза 2–3 м, наполняло компенсационное восточное течение. Расходы в нем оказались в четыре раза меньше, чем в сгонном. Сток Дона в это время (240–300 м^3/с) был ниже, чем расходы компенсационного восточного течения Таганрогского залива. Весной 2021 г. перенос нагонного течения на 20% превысил расходы стоковой составляющей. Ни в одном случае измерений течение с более высокой соленостью (более 9 е.п.с.) не было направлено из моря к реке.

Объяснение этому явлению предлагается в работах [4, 16, 17], где рассматриваются свободные (сейшевые) колебания уровня Азовского моря после прекращения ветрового воздействия. В частности, по результатам моделирования показано, что спустя 9–12 ч после ослабевания сильного восточного ветра энергия одноузловой сейши рассеивается, и в Таганрогском заливе формируется собственная амфидромическая система. Пролив между отмелыми (менее 2 м) оконечностями кос Долгая и Белосарайская достигает ширины всего 20–25 км, тогда как западная часть Таганрогского залива имеет ширину около 60 км. Такая узость способствует дополнительной изоляции циклонической сейшевой системы, ухудшению водообмена, циркуляции речных и морских вод в пределах залива при непрерывных сгонно-нагонных явлениях.

Прямые измерения течений в ноябре 2018 г. подтверждают важную роль сейш в схеме течений Азовского моря (рис. 6). Первые два дня измерений течение было направлено против восточного ветра, 19 ноября поток развернулся по ветру. 20–22 ноября зарегистрированы разнонаправленные течения амфидромической системы западной части Таганрогского залива. Источником перепада уровня стал сильный восточный ветер 14–16 ноября, а спустя 4–5 сут после его ослабевания сформировалась система волновых течений, ме-

Таблица 1. Перенос вод через Керченский пролив и Таганрогский залив при разных метеоусловиях

Дата измерений	Перенос вод, м^3/с		Направление и скорость ветра
	На север (в Азовское море)	На юг (в Черное море)	
Северная часть Керченского пролива			
25–26.11.2018 [8]	1920	150	Юго-юго-западный, 3 м/с
15.04.2019 [8]	17 100	70	Юго-юго-западный, 12 м/с
24.07.2019 [9]	729	3988	Северный, 7 м/с
12.12.2020	1874 (519 для вод с соленостью более 17 е.п.с.)	4874	Восточный, 8 м/с
20.04.2021	11853	48	Юго-юго-западный 0–14 м/с
Восточная часть Таганрогского залива			
	На восток (к Дону)	На запад (в Азовское море)	
18–19.11.2018	1250	37	Восточный, 2 м/с
04.12.2020	380	1590	Восточный, 10 м/с
17.04.2021	2218	1742	Западный, 5 м/с

няющих направление уже независимо от преобладающего ветра.

В Азовском море существует сложная суперпозиция собственных колебаний водного бассейна, которая раскачивается восточными и западными ветрами и подпитывается донским стоком. Полноводный Дон существенно усиливает стоковое течение и может приводить к дополнительному наклону уровенной поверхности моря [18]. В современных маловодных условиях перепады уровня имеют преимущественно ветровую природу. После прекращения ветровой подпитки баланс энергии одноузловой структуры понижается по каскаду масштабов, колебания уровня многоузловых сейш становятся менее значительными, но волновые течения часто остаются направлены против наблюдающегося ветра.

ВЫВОДЫ

Наблюдения позволяют представить систему течений Азовского моря не как дрейфовую, а как дрейфово-градиентную (сейшевую). Именно сейшевые движения строго направлены против часовой стрелки, способствуют переносу донных отложений и формированию кос, независимо от направления вынуждающего ветра.

Наибольшие скорости течений в Керченском проливе отмечены при северном и южном ветрах. При западном и восточном ветрах формируется мозаичная гидродинамическая картина. В частности, 12 декабря 2020 г. преобладал перенос на юго-запад, на север двигались воды у Крымского берега, а соленые затоки из Черного моря проникали по понижениям дна Прикерченского взморья (рис. 5).

БЛАГОДАРНОСТИ

В сборе материала и аналитических работах участвовали Е.П. Олейников, А.Ю. Московец, Г.В. Валов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках выполнения гранта Российского научного фонда (проект № 20-17-00196). Работа выполнена выполнена на научно-экспедиционных судах и оборудовании ЦКП ЮНЦ РАН № 501994

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Книпович Н.М.* Гидрологические исследования в Азовском море. Москва: “Шестой Октябрь”. 1932. 496 с.
2. *Лемешко Е.М., Морозов А.Н., Федоров С.В.* Исследования течений в Керченском проливе по данным акустического доплеровского профилометра течений (ADCP) / Экология. Экономика. Информатика. Азовское море, Керченский пролив и предпроливные зоны в Черном море: проблемы управления прибрежными территориями для обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования. Сб. мат. III Всерос. конф. Ростов-на-Дону. Изд-во Южного федерального университета. 2016. С. 213–228.
3. *Завьялов И.Б., Осадчиев А.А., Завьялов П.О., Кременецкий В.В., Гончаренко И.В.* Исследование водообмена в Керченском проливе по историческим данным и данным контактных измерений 2019 г. // Океанология. 2021. Т. 61. № 3. С. 377–386.

4. Волны, течения, сгонно-нагонные процессы и трансформация загрязнений в Азовском море. Л.В. Черкесов, Т.Я. Шульга (ред.). Севастополь: ФГБУН МГИ. 2017. 228 с.

5. *Дианский Н.А., Фомин В.В.* Моделирование циркуляции Азовского моря и особенности воспроизведения экстремальнх нагонов в Таганрогском заливе // Труды ГОИН. 2017. № 218. С. 74–104.

6. *Инжебейкин Ю.И.* Особенности формирования кратковременных наводнений и экстремальных течений в Азовском море // Тр. ГОИН. 2011. № 213. С. 15–102.

7. *Мизюк А.И., Коротаев Г.К., Григорьев А.В., Пузина О.С., Лишаев П.Н.* Долгопериодная изменчивость термохалинных характеристик Азовского моря на основе численной вихреразрешающей модели // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35. № 5 (209). С. 496–510.

8. *Григоренко К.С., Олейников Е.П., Григоренко Е.Г.* Влияние половодья Дона 2018 г. на термохалинную структуру Азовского моря // Наука юга России. 2019. Т. 15. № 3. С. 63–69.

9. *Матишов Г.Г., Григоренко К.С.* Течения Азовского моря в период маловодья Дона // Океанология. 2021. Т. 61. № 2. С. 198–208.

10. Ресурсы поверхностных вод СССР, том 7. Донской район. Кожина З.М., Потапова О.Н. (ред). 1973. Ленинград, Гидрометеоиздат. 459 с.

11. *Дашкевич Л.В., Бердников С.В., Кулыгин В.В.* Многолетнее изменение средней солености Азовского моря // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 5. С. 563–572.

12. *Гаргопа Ю.М., Сарвилина С.В.* Климатические изменения зообентоса Азовского моря в условиях антропогенных воздействий // Водные ресурсы. 2011. Т. 38. № 6. С. 698–706.

13. Водохозяйственная обстановка в зоне деятельности Кубанского бассейнового водного управления. Кубанское бассейновое водное управление. 2021. http://www.kbvu-fgu.ru/?path=bvu_vho&page_vho=25

14. Ресурсы поверхностных вод СССР, том 12. Нижнее Поволжье и Западный Казахстан. Выпуск 1. Бассейн Волги ниже г. Чебоксары. Доброумова Г.Г., Потапова О.Н., Шмидт Т.С. (ред). 1971. Ленинград, Гидрометеоиздат. 459 с.

15. *Матишов Г.Г., Чикин А.Л., Бердников С.В., Шевердяев И.В.* Экстремальное наводнение в дельте Дона (23–24 марта 2013 г.) и факторы, его определяющие // ДАН. 2014. Т. 455. № 3. С. 342–345.

16. *Иванов В.А., Коновалов А.В., Черкесов Л.В.* Влияние циклонов на изменения уровенной поверхности Азовского и Черного морей // Метеорология и гидрология. 2003. № 4. С. 73–80.

17. *Матишов Г.Г., Инжебейкин Ю.И.* Численные исследования сейшеобразных колебаний уровня Азовского моря // Океанология. 2009. Т. 49. № 4. С. 485–493.

18. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том V. Азовское море. Гершанович Д.Е., Гоптарев Н.П., Затучная Б.М., Симонов А.И. (ред.). 1991. Санкт-Петербург, Гидрометеозидат. 236 с.

DYNAMICS AND HYDROLOGY IN CONTACT ZONES OF THE AZOV SEA

Academician of the RAS **G. G. Matishov**[a,b] **and K. S. Grigorenko**[a,#]

[a] *Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation*

[b] *Murmansky Sea Biological Institute, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation*

[#] *E-mail: Klim_grig@mail.ru*

The paper presents the results of instrumental measurements of the thermohaline structure and currents in areas of mixing of fresh river waters (the Taganrog and the Temryuk bays) and Black Sea waters (the Kerch Strait) with the waters of the Azov Sea for the period 2018–2021. Based on the data of water exchange, a preliminary classification of the currents of the Taganrog Bay and the Kerch Strait has been constructed. The highest velocities of currents in the Kerch Strait were noted with northern and southern winds. During the western and eastern winds, a mosaic hydrodynamic picture forms. In the Taganrog Bay, there is a multiplex superposition of eigen oscillations of the water basin, which is built up by the eastern and western winds and is fed by the Don runoff. The currents of the Azov Sea have a more complicated structure than was previously thought. Everywhere, in addition to the drift, there is also a gradient (seiche) component, due to which the observed currents are often directed against the wind, cyclically change direction and velocityto the opposite.

Keywords: The Azov Sea, Don lack of water, tide-surge phenomena, seiche, sea currents

УДК 551.465, 551.506,574.52

ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОДЫ НА ВЗМОРЬЕ И АВАНДЕЛЬТЕ ДОНА В УСЛОВИЯХ МАЛОВОДЬЯ (XX–XXI вв.)[1]

© 2021 г. Академик Г. Г. Матишов[1,2], К. С. Григоренко[1,*]

Поступило 06.04.2021 г.
После доработки 13.05.2021 г.
Принято к публикации 13.05.2021 г.

В основу работы положены целенаправленные исследования по отбору проб воды при разных погодных режимах и уровнях в дельте и взморье. Основной эксперимент охватывал период с 20 ноября 2020 г. по 18 марта 2021 г. Вода для гидрохимических анализов отбиралась при максимальных сгонах и нагонах воды, в отдельных случаях – послойно. Одновременно отбиралась вода из магистрального водопровода в г. Азов для выяснения ее природы (грунтовые, речные или морские), их зависимость от сгонно-нагонных режимов. Фиксация материала производилась при обычных условиях, экстремальных колебаниях уровня моря, при резком возрастании в водном балансе доли подземных вод подо льдом, на обмелевшем взморье, в протоках при сгонах. В 2020 г. на посту в Донском начались измерения солености непосредственно в русле р. Дон, которое в меньшей степени зависит от подземного стока. Полученные данные дали основание подразделить трансформированные воды в эстуарной зоне Азово-Донского бассейна.

Ключевые слова: дельта Дона, маловодье Дона, изменения климата, ионный состав вод, сгонно-нагонные явления, подземный сток

DOI: 10.31857/S2686739721080077

ВВЕДЕНИЕ

В Азово-Донском бассейне, начиная с середины 50-х годов прошлого века, на фоне природной изменчивости стали нарастать разрушительные силы индустриальной природы. Маловодье и зарегулирование речного стока привели к необратимым деформациям естественных процессов, в частности иссушению почвы, уменьшению густоты мелких водоемов и водотоков. В Приазовье переломным в развитии водоема стало перекрытие в 1954 г. долины Дона Цимлянской плотиной, зарегулирование водотоков на всем протяжении водосборного бассейна от верховья до Азовского моря. До критической отметки обмелели Цимлянское и Краснодарское водохранилища. С момента их запуска 70 и 60 лет назад подобных условий не возникало. Сформировались условия, снижающие водность и почти полное прекращение стока – Миуса, Еи, Кагальника, Чумбурки и других малых рек (рис. 1).

[1] *Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия*
[2] *Мурманский морской биологический институт, Кольский научный центр Российской академии наук, Мурманск, Россия*
**E-mail: Klim_grig@mail.ru*

В результате безвозвратно нарушена естественная ритмика речного стока, произошло сокращение запасов пресной воды в бассейне р. Дон и осолонение Азовского моря [1], возник дисбаланс между речными и черноморскими водами, усилилась адвекция в водную систему реки среднеминерализованной (5.39 г/л) подземной воды [2]. Неучет свойств аридной зоны, природной внутривековой цикличности климата и возможностей саморегуляции степной реки в яркой форме проявился в первой четверти XXI века.

На Нижнем Дону и Приазовье возник дефицит пресной воды, в том числе питьевой, в крупных городах (Таганрог, Азов и др.). Многие малые реки Приазовья в теплый период полностью прекращают сток. В условиях очевидной засухи всем отраслям сельхозпроизводства приходится соизмерять потребность в воде с имеющимися водными ресурсами. За 50 лет маловодья и снижения речного стока произошло явное заиление Таганрогского залива и дельты Дона. Несмотря на дноуглубление возникшая лавинная седиментация в Азово-Донском судоходном канале необратима. При восточных ветрах (более 6–8 м/сек) малые глубины на фарватере препятствуют регулярному движению морских судов в течение 2–3 нед.

Ярким примером природно-техногенной аномалии на фоне продолжительного маловодья на

[1] **Оригинальный текст:** *Матишов Г.Г., Григоренко К.С.* Гидрохимический состав воды на взморье и авандельте Дона в условиях маловодья (XX–XXI вв.) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 499. № 2. С. 193–202.

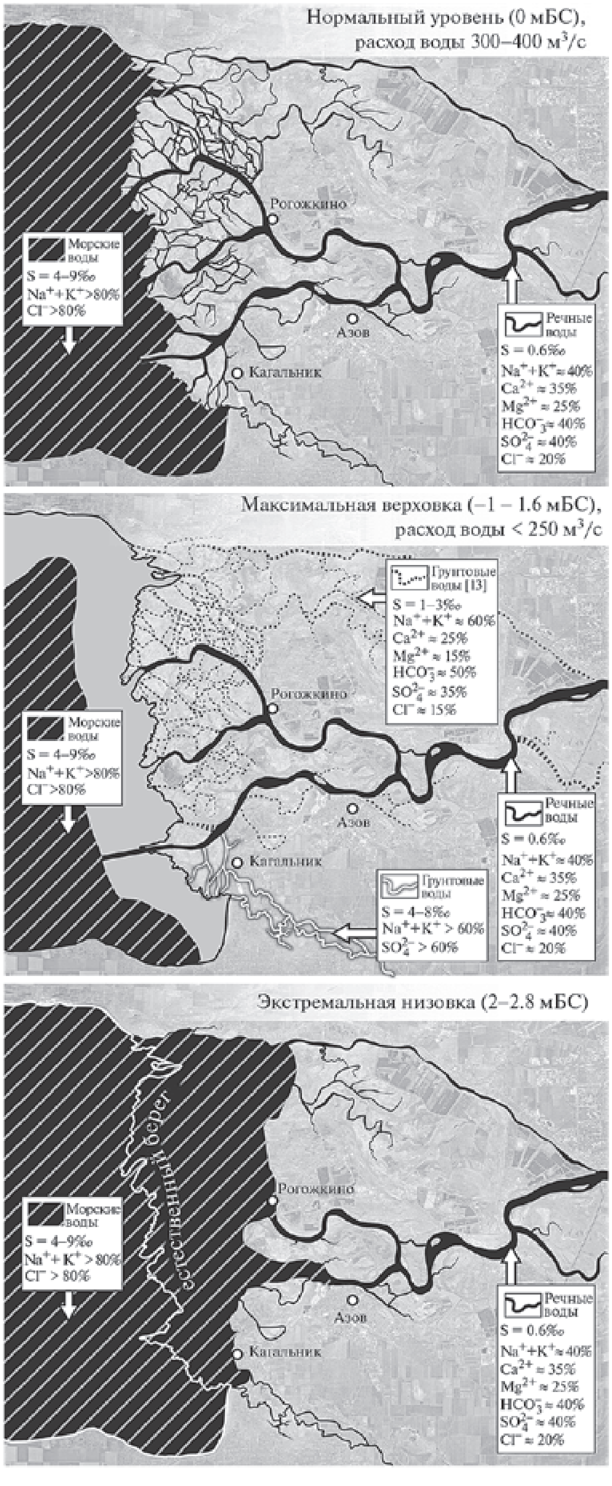


Рис. 1. Изменение питания и ионного состава дельты Дона при разном уровне воды.

Дону стала ситуация, когда избыток воды от весеннего паводка привел к аварийным попускам воды из Цимлянского водохранилища. Среднесуточный объем сброса в р. Дон 6 мая достигал 1701 м^3/с. В результате в начале мая 2018 г. произошло экстремальное затопление дельты.

До последних лет объем гидрохимической аналитики был ограничен. Данные наблюдения производились с учетом записей солености на автоматических гидрометеопостах. Зачастую пробы воды были отобраны не по сезонам и не привязывались к экстремальным стадиям сгонов и нагонов. Во время сгонно-нагонных процессов речные и морские воды при сходной величине солености имеют принципиально отличный химический состав [2]. Целью работы было выполнение предварительной типизации вод по химическому составу, определение переходных режимов минерализации водных масс в протоках дельты. В числе задач ставилась фиксация воды разной природы, при максимальных верховках и низовках (ветер более 10 м/сек). В некоторых протоках, изолированных от судоходного канала, производился поиск подземных вод. В условиях трансформации термохалинной структуры вод в авандельте и Таганрогском взморье изучались погодные условия, при которых в одних случаях доминируют местные подземные воды, в других – черноморские воды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

В основу работы положены целенаправленные исследования по отбору проб воды при разных погодных режимах и уровнях в дельте и взморье (табл. 1). Основной эксперимент охватывал период с 20 ноября 2020 г. по 18 марта 2021 г. Вода для гидрохимических анализов отбиралась при максимальных сгонах и нагонах воды, в отдельных случаях – послойно. Одновременно отбиралась вода из магистрального водопровода в г. Азов для выяснения ее природы (грунтовые, речные или морские), их зависимость от сгонно-нагонных режимов.

Набор регистраторов среды включает измеритель течений AANDERAA RCM 9 LW, океанографические зонды (SBE-19, SBE-19 + V2, CTD-90) и датчики электропроводности СОЛИС СЛ15-10Т. Дискретность измерений датчиков составляет 10 минут. В итоге за восемь лет в базе данных накоплено более 280 тысяч измерений. Соленость рассчитывалась с помощью шкалы практической солености PSS-78. Во время двух-трехнедельных восточных ветров, когда взморье ("куты") осушается на многие километры от берега, а обмелевшая авандельта сливается с плавнями вдоль островов, с квадрокоптеров DJI Phantom 3 Pro производились фотосъемка и фиксация состояния среды.

Фиксация материала производилась при обычных условиях, экстремальных колебаниях уровня моря, при резком возрастании в водном

Таблица 1. Ионный состав воды в протоках дельты Дона

Место отбора	Cl^-, мг/л	HCO_3^-, мг/л	SO_4^{2-}, мг/л	Ca^{2+}, мг/л	Mg^{2+}, мг/л	$Na^+ + K^+$, мг/л	Общая минерализация, г/л	Уровень воды, мБС
Речная вода								
р. Кагальник 27.02.1951	64.5	117	**123.6**	**47.9**	30.3	34.1	0.5	
р. Кагальник 18.03.1954	67.6	31.7	**99.5**	**32.5**	19.6	31.8	0.3	
Дон, пов-ть 19.03.2018	177	271	**365**	96	58	**186**	1.2	–0.8
Дон, дно 19.03.2018	177	271	**365**	104	58	**176**	1.2	–0.8
Родник о. Свиной 19.03.2018	177	283	**432**	112	78	**166**	1.2	–0.8
Свиное гирло, пов-ть 22.11.2020 10:25	248.6	249	**345.8**	76.15	48.64	**262**	1.23	–0.1
Свиное гирло, пов-ть 22.11.2020 10:30	226.9	246.5	**326.6**	76.15	41.34	**251**	1.17	–0.1
Свиное гирло, пов-ть 22.11.2020 10:40	226.9	246.5	**307.4**	68.14	48.64	**236**	1.13	–0.1
Свиное гирло, пов-ть 23.11.2020 10:20	241.1	239.2	**345.8**	80.16	48.64	**248**	1.2	–0.1
Свиное гирло, пов-ть 23.11.2020, 10:30	248.2	251.4	**345.8**	80.16	48.64	**258**	1.23	–0.1
р. Дон, порт Азов, 15.02.2021, 14:40	425.4	300.2	**614.8**	120.2	60.80	**468**	1.99	2.1
Колузаево, 13.02.2021	212.7	288	**403.5**	112.2	51.07	**233**	1.30	2
Ростов-Арена, 13.02.2021	191.4	292.9	**345.8**	112.2	46.21	**200**	1.19	2
Ростов-Арена, 14.02.2021	205.6	305.1	**365**	108.2	51.07	**220**	1.26	1.6
29-я линия, понтон, 13.02.2021	191.4	295.34	**326.6**	108.2	51.07	**186**	1.16	2
Грунтовые воды								
р. Кагальник 25.10.1954	629.1	350.6	**1161.6**	166.9	153.8	**640.2**	3.1	
р. Кагальник 1.10.1958	220.7	380.6	**1350.7**	194.4	155.3	**435.1**	2.8	
Сухой Кагальник, дно 19.03.2018	709	378	**1729**	240	231	**780**	4.1	–0.8
Мокрый Кагальник, пов-ть 19.03.2018	620	378	**1681**	248	178	**793**	3.9	–0.8
Мокрый Кагальник, дно, 19.03.2018	603	369	**1681**	240	195	**751**	3.8	–0.8
Свиное гирло, пов-ть 19.03.2018	496	339	**1249**	200	134	**614**	3.0	–0.8
Свиное гирло, дно 19.03.2018	620	373	**1681**	257	173	**791**	3.9	–0.8
ер. Черепаший, пов-ть 19.03.2018	496	344	**961**	168	105	**566**	2.6	–0.8

Таблица 1. Продолжение

Место отбора	Cl^-, мг/л	HCO_3^-, мг/л	SO_4^{2-}, мг/л	Ca^{2+}, мг/л	Mg^{2+}, мг/л	$Na^+ + K^+$, мг/л	Общая минерализация, г/л	Уровень воды, мБС
ер. Черепаший, дно 19.03.2018	532	354	**1297**	200	170	**595**	3.1	–0.8
Скважина, пос. Кагальник, 6.03.2018	744	488	**1105**	521	180	**3267**	3.3	–0.03
Скважина, пос. Займо-Обрыв, 16.08.2011	319	393	**1249**	216	127	**506**	2.8	
Скважина, 40 м. пос. Кагальник “Плоды Приазовья” 12.2020	**1390**	180	20	1290		**2500**	5.39	
Свиное гирло, пов-ть 20.11.2020 13:00	709	368.6	**1585**	224.5	175.1	**836**	3.9	–1.2
Свиное гирло, пов-ть 20.11.2020 15:00	726.7	366.1	**1585**	256.5	204.3	**747.5**	3.89	–1.2
Свиное гирло, пов-ть 1.12.2020	815.4	366.1	**2305.4**	304.6	240.8	**1050**	5	–1.2
Свиное гирло, дно 1.12.2020	833.1	366.1	**2353.5**	320.6	243.2	**1062.5**	5.1	–1.2
Свиное гирло, дно 2.12.2020	815.4	380.8	**2353.5**	344.7	277.3	**956**	5.1	–0.9
Свиное гирло, дно 2.12.2020	815.4	375.9	**2353.5**	352.7	235.9	**1029**	5.1	–0.9
Свиное гирло, пов-ть 6.12.2020	957.2	485.7	**2737.7**	384.8	301.6	**1199**	6	
Морские воды								
Донской, пов-ть, 05.02.2021 11:14	**1861.1**	251.4	720.6	116.2	163	**1310.5**	4.4	0.7
Донской, дно, 05.02.2021, 11:12	**1949.8**	253.8	672.4	120.2	175.1	**1319**	4.5	0.7
Свиное гирло, пов-ть, 05.02.2021, 11:43	**1683.9**	273.4	816.5	120.2	150.8	**1264.5**	4.3	0.7
Свиное гирло, дно, 05.02.2021, 11:40	**1683.9**	278.3	768.5	120.2	170.2	**1201.5**	4.2	0.7
Свиное гирло, пов-ть, 13.02.2021,	**2020.6**	275.8	912.6	152.3	187.3	**1438**	5	2.3
Свиное гирло, 14.02.2021, 06:00,	**3332.3**	253.8	1056.7	152.3	284.5	**2229**	7.3	2.3
Свиное гирло, 15.02.2021	**2658.8**	273.4	960.6	156.3	270	**1737**	6.06	0.4
Свиное гирло, 08.03.2021, пов-ть	**1347.1**	263.6	653.2	136.3	121.6	**978**	3.5	2.4
Свиное гирло, 08.03.2021, дно	**1382.6**	263.6	634	128.3	136.2	**973**	3.5	2.4
г. Азов, Западный микрорайон, водопроводная вода, 14.02.2021, 11:00	**2517**	244.1	960.6	132.3	235.9	**1725**	5.81	1.6

Таблица 1. Окончание

Место отбора	Cl^-, мг/л	HCO_3^-, мг/л	SO_4^{2-}, мг/л	Ca^{2+}, мг/л	Mg^{2+}, мг/л	$Na^+ + K^+$, мг/л	Общая минерализация, г/л	Уровень воды, мБС
г. Азов, Западный микрорайон, водопроводная вода, 14.02.2021, 15:00	**2056.1**	239.2	1008.6	136.3	270	**1348**	5.06	1.7
г. Азов, Западный микрорайон, водопроводная вода, 14.02.2021, 20:00	**3474.1**	246.5	1056.7	144.3	313.7	**2276**	7.51	0.9
г. Азов, Западный микрорайон, водопроводная вода 14.02.2021, 21:50	**3757.7**	258.7	1105	160.3	291.8	**2531**	8.1	0.8
г. Азов, Западный микрорайон, водопроводная вода, 15.02.2021, 20:00	**3474.1**	239.2	1008.6	148.3	299.1	**2273**	7.44	0.3
г. Азов, Западный микрорайон, водопроводная вода, 16.02.2021, 20:00	**974.9**	256.3	499.5	112.2	104.6	**697.5**	2.64	–0.15
р. Дон, порт Азов, 13.02.2021, 14:00	**1347.1**	270.9	557.2	116.2	133.8	**931**	3.36	2.3
р. Дон, порт Азов, 14.02.2021, 13:20	**2871.5**	256.3	912.6	140.3	255.4	**1905**	6.34	2.2
Рогожкино, 13.02.2021	**2002.9**	258.7	730.1	128.3	177.5	**1373.5**	4.67	2
Дугино, 13.02.2021	**1577.5**	268.5	691.6	116.2	153.2	**1122.5**	3.93	2

Примечание. Жирным выделены преобладающие катионы и анионы.

балансе доли подземных вод подо льдом, на обмелевшем взморье, в протоках при сгонах. В 2020 г. на посту в Донском начались измерения солености непосредственно в русле р. Дон, которое в меньшей степени зависит от подземного стока. Таким образом, на гидрометеопостах в Кагальнике, Донском и др. получены термохалинные характеристики вод в режиме реального времени (рис. 1).

Полученные данные дали основание подразделить трансформированные воды в эстуарной зоне Азово-Донского бассейна.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Водосборный бассейн Дона и малых рек Приазовья формируется в условиях континентального климата на территории сухих степей и, отчасти, умеренной зоны. Кроме различий в количестве солей (грамм/литр или промилле) воды аридной зоны отличаются разнообразием типов по химическому составу. Водные массы Азово-Донского бассейна по уровню солености (минерализации) делятся следующим образом: вблизи донского взморья – слабосолоноватые (2–4‰), в центральной части – солоноватые (4–8‰) и далее до кос Долгая и Белосарайская – высокосолоноватые (8–13‰). В химическом составе преобладают хлоридные соединения (до 89%) [3–6]. Указанная схема солевой структуры вод (минерализации) на акватории характерна для безветренной погоды в Азовском море. По происхождению перечисленные воды включают морские, речные и грунтовые (подземные).

Морская вода Таганрогского залива относится к хлоридно-натриевой группе [7]. На практике соленость морской воды рассчитывается по иону хлора. В XX веке, т.е. в прошлую климатическую эпоху, в течение большей части года дельта и залив до Очаковской косы заполнялись естественной пресной (0.5–0.9‰) водой [8, 9]. В XXI веке в обстановке сильных и умеренных (10–20 м/с) юго-западных ветров характерно наличие слабосолоноватых (2–4‰) азовоморских вод. По мере развития нагонного течения (0.5–3 сут) в сторону дельты клином направлена адвекция соленых черноморских вод [10]. Такие ситуации в резкой форме возникали, например, в октябре 2016 г., когда сбросы воды через гидроузел составляли всего 180 м^3/с при нормальных расходах 350–400 м^3/с. В результате речной сток Дона стал неспособен постоянно создавать естественный гидрофронт пресных вод в Таганрогском заливе.

Морская черноморская вода в условиях экстремальных низовок на взморье имеет общую минерализацию от 3 до 6–8‰ и более (табл. 1). Основные ионы содержат Cl на уровне от 1–1.6 до 3–4 г/л и $Na^+ + K^+$ от 0.7–1 до 2.5 г/л. В общих чертах по количественному содержанию ионы морской воды находятся в следующем порядке $Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^- + CO_3^{2-}$; $Na^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$, а в речной карбонатной воде порядок противоположный.

С начала XXI века в условиях маловодья все чаще стали возникать ранее не отмечавшиеся явления стремительных адвекций черноморских водных масс. В течение каждого из последних лет многократно происходило заполнение дельты Дона типично черноморскими водами с соленостью до 10‰ (рис. 1). Одновременно из внешней части Таганрогского залива гидрохимический барьер с градиентом солености порядка 5–6‰ смещался на 20–40 км вверх по дельте Дона. Такого рода галоклин разделяет ореолы обитания пресноводной и морской фауны [11].

В период самых влажных лет прошлого столетия, в частности 1941–1942 гг., максимальные расходы воды в районе станицы Раздорской достигали 7–9 тыс. м^3/с [12]. Естественный сток Дона достигал 52 км^3. При этом в период пуска Цимлянской ГЭС в 1952 г. средние минимальные расходы воды были 335 м^3/с, а максимальные – 1200 м^3/с. Минимально гарантированный судоходный попуск – 340 м^3/с.

После зарегулирования Дона Цимлянской плотиной годовой сток воды объемом в 30 км^3 являлся оптимальным для азовоморской экосистемы. Однако при наступившем после 2007 г. маловодье, речной сток сократился примерно в 3 раза (до 11–16 км^3). Минимальные расходы воды (280 м^3/с в створе гидропоста “Раздорская”, 18 ноября 2020 г.) стали нормой в течение года. Такое сокращение стока привело к затоку в Таганрогский залив из Черного моря вод соленостью 17‰ и объемами порядка 20 км^3 (рис. 1).

Речная вода, исходя из новейших исследований [1, 2], подразделяется на питьевую (0.4–1‰) и пресную (речную) воду (0.4–2‰). Ранее (до зарегулирования) донская вода в районе между Азовом и Багаевской соответствовала кальциево-гидрокарбонатной группе [13, 14]. Сейчас среднегодовая минерализация воды в створе г. Ростова-на-Дону составляет 0.7–1 г/л и имеет натриево-сульфатный состав [3, 4] (табл. 1). В результате маловодья рукава, протоки и взморье длительное время заполняются водой с соленостью 1.0–4.0‰ и до 5.0‰ и более. Нередко наблюдается двухслойная стратификация с более соленой (3.0–5.0‰) придонной водой. В результате воды гирл в течение года, в основном, относятся к сульфатному классу натриевой группы.

Согласно новым данным (табл. 1) в протоках дельты Дона гидрохимические показатели, в частности ионного состава воды, представляются следующим образом: речная вода при общей минерализации от 0.5–1.0 до 2.0 г/л содержит SO_4^{2-} от 100–300 до 615 мг/л, а $Na^+ + K^+$ – от 180 до 260–470 мг/л. Подземная (грунтовая) вода при общей минерализации от 2.8 до 6 г/л включает SO_4^{2-} порядка 1–2 г/л и $Na^+ + K^+$ на уровне 0.5–3.3 г/л (табл. 1).

Экспедиционные наблюдения нис “Профессор Панов” в октябре 2020 г. показали, что общая минерализация вод Северского Донца составила 1.25–1.35 г/л, в устье реки Маныч – 1.96 г/л, в устье р. Сал – 2.27 г/л, в реке Аксай 1.19 г/л. Содержание ионов Cl^-, в пробах, достигло 0.17–0.37 г/л и $Na^+ + K^+$ от 0.24–0.45 г/л. На долю подобного рода приток приходится 30–35% суммарного стока реки Дон. Минерализация Дона, согласно измерениям, увеличивается с 0.61 г/л, выше впадения реки Северский Донец, до 0.85–0.92 г/л, ниже по течению реки Маныч, т.е. в 1.3–1.5 раза. Содержание ионов Cl^- увеличивается в 1.6 раза, ионов $Na^+ + K^+$ в 1.8 раза.

При восточных ветрах (экстремальных верховках) эволюция вод имеет следующий порядок: пресная → грунтовая (подземная) → черноморская (рис. 2). Существует в отдельных случаях стратификация: питьевая (0.4–1.0‰) на поверхности и пресная (речная) (1.0–2.0‰) у дна. Солоноватая вода (4.0–2.0‰) как тип ранее на взморье и авандельте не отмечалась. Своим происхождением вода с таким составом прежде всего обязана черноморской адвекции при крайне ограниченном донском стоке [1].

В условиях западных ветров, в т.ч. экстремальных низовок преобразование водных масс происходит по цепи последовательных гидрологических стадий. Пресная (речная) вода замещается перемешанной черноморской и речной водой, и затем – морской (до 10‰). У морского края дельты штормовые (до 20–30 м/с) юго-западные ветры приводят к подъему уровня воды на 3–4 м. В ситуации обратной низовки (“черноморки”) после длительного сгона воды возникают самые

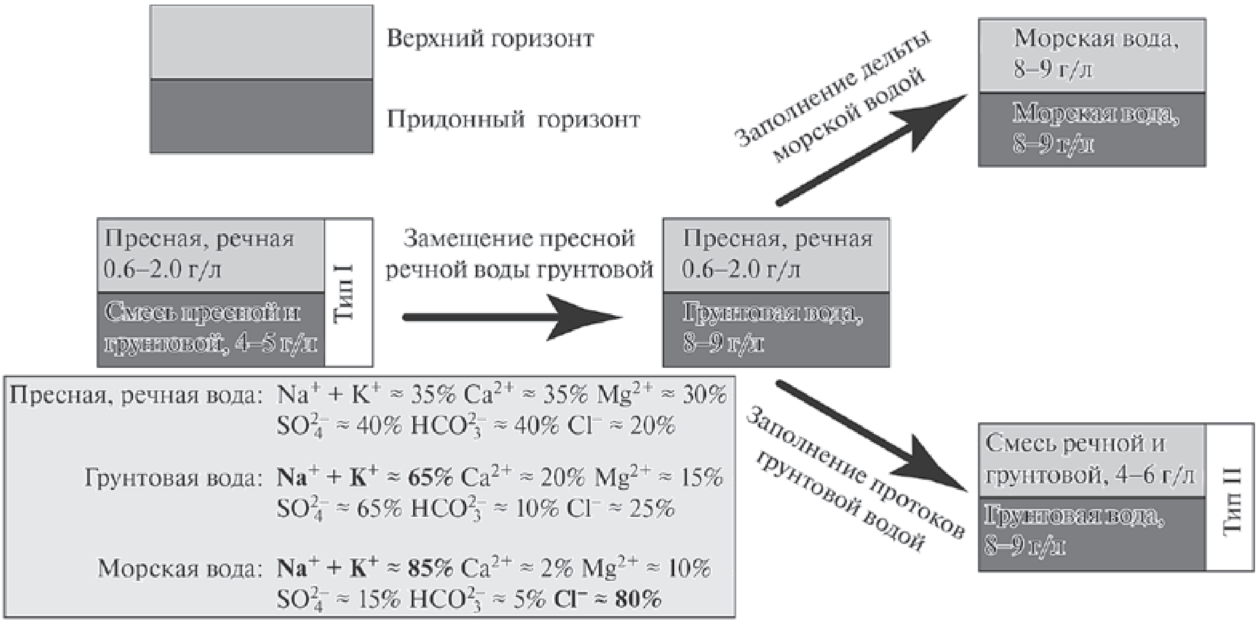


Рис. 2. Новые типы стратификации солености в дельте Дона.

опасные разрушительные нагоны (март 2013 г., сентябрь 2014 г.) [10]. Только ураганный юго-юго-западный ветер вдоль края взморья создает подпор донскому стоку, и в считанные (2–3) часы приморская зона донской дельты заливается.

На исследуемой территории наблюдаются *грунтовые воды* двух видов: одни просачиваются из осадочных пластов коренного берега (рис. 1), а другие текут от возвышающихся при верховках островов собственно дельты. Таким образом, во время сгонов аномально повышается доля минерализованного подземного стока. Результаты анализа воды из скважины на правом невысоком (10 м) берегу протоки Сухой Кагальник показали содержание анионов (г/л): гидрокарбонатов HCO_3^- – 0.18, хлоридов Cl^- – 1.39, сульфатов SO_4^{2-} – 0.02, содержание катионов: Ca^{2+} + Mg^{2+}– 1.29, $Na^+ + K^+$ – 2.5, сухой остаток (сумма солей) – 5.39 (табл. 1).

Для подземных вод характерны высокое содержание хлоридов и доминирование сульфатов среди анионов, высокие концентрации кальция среди катионов (рис. 3). Ионный состав грунтовых вод существенно зависит от водоносного горизонта и состава дренируемых пород. Так, в водах из скважины в пос. Займо-Обрыв, расположенного в 7 км от пос. Кагальник, доминируют сульфаты, катионы натрия и калия [2] (табл. 1).

На участке водосбора Нижнего Дона, находящегося в пределах Раздорских склонов, источником поступления хлоридно-натриевых соединений является разгрузка подземных вод. Так, отобранная в экспедиции ЮНЦ проба воды из термального источника в районе х. Мелиховский имеет общую минерализацию 56.2 г/л, с содержанием ионов Cl^- – 30.1 г/л, ионов $Na^+ + K^+$ – 19.1 г/л. Дебит данного источника подземных вод составляет 20 л/с.

Во время сильных сгонов и снижения уровня воды на 2 м гирло Свиное отделяется от Дона мелководным порогом. Этот порог намывается при дноуглублении в судоходном канале. При экстремальных сгонах порог мелеет и водообмен между Доном и Свиным гирлом практически прекращается. В результате важный водоток, длина которого 1.2 км, превращается в изолированную мелкую (глубина дна 30–50 см) лагуну (рис. 1).

Географические особенности гирла Свиное, на котором с ноября 2020 г. по середину марта 2021 г. были сфокусированы наблюдения, имеют следующие геоморфологические черты: протоки р. Кагальник – Сухой Кагальник и Мокрый Кагальник и Азово-Донской морской канал, по которому проходит основной сток р. Дон, соединены между собой Свиным гирлом. Левый берег (по ходу течения Дона) является коренным обрывом (суглинки) высотой 14–17 м. Во время верховки Свиное, как и большинство других рукавов авандельты, фактически изолированы от Азовского моря и судоходного канала. Взморье на 5–12 км осушается.

В целом, будучи отрезанными от основного русла Дона, южные протоки (Сунжа, Свиное) дельты Дона заполняются подземным стоком р. Кагальник. Наблюдения в 2020 г. показали, что

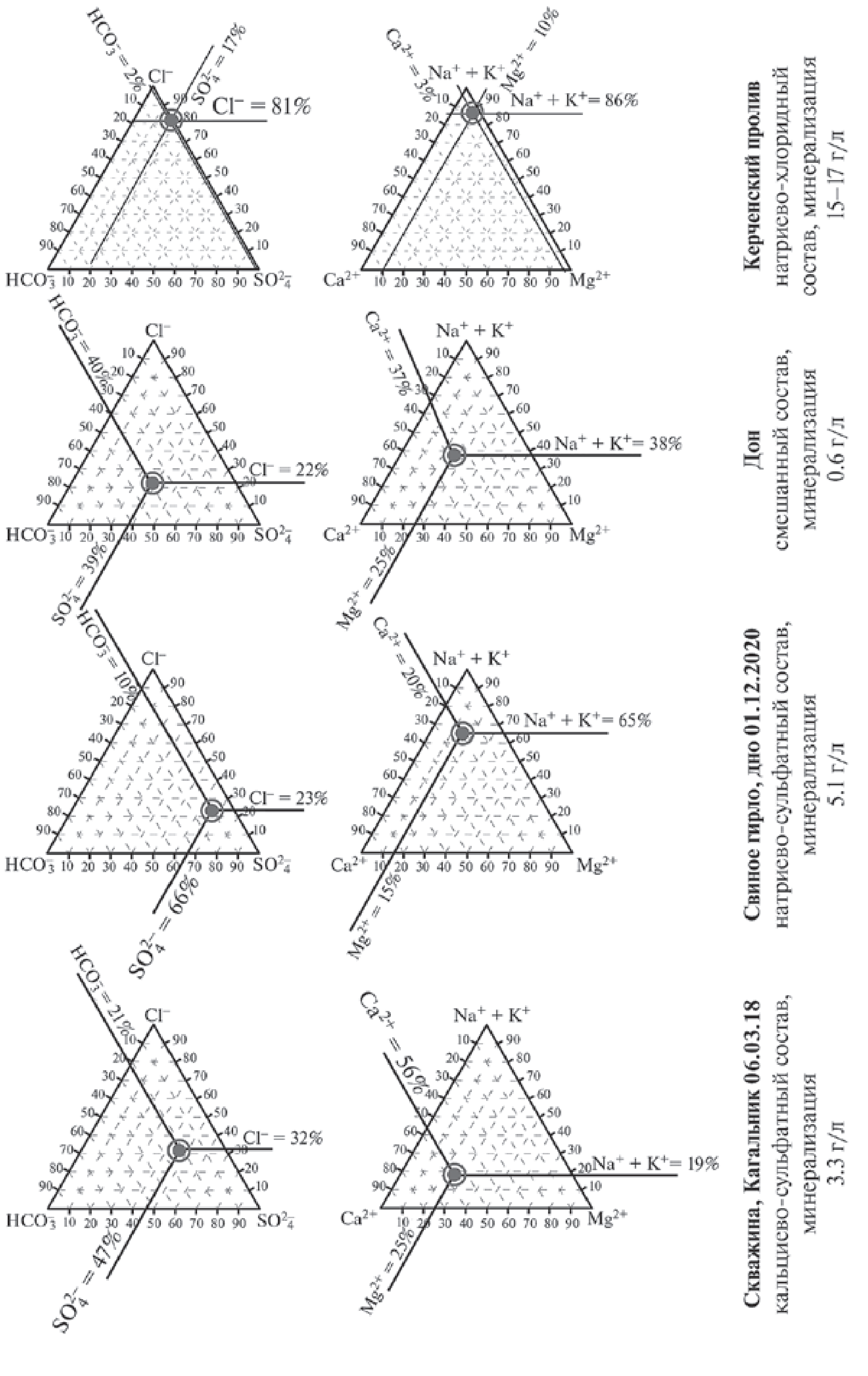


Рис. 3. Треугольники ионного состава в Азовском море, протоках и скважинах дельты Дона.

общее ухудшение водобмена между Доном и Свиным гирлом, дальнейшее заиление перешейка между ними ведут к практически постоянному присутствию в Свином гирле минерализованных вод. В условиях маловодья такая гидрохимия вод стала возникать и в летний сезон, что раньше не наблюдалось. Пробы воды, отобранные 20 ноября 2020 г. (минерализация 4 г/л) и 6 декабря 2020 г.

(минерализация 6 г/л), имеют одинаковый ионный состав: 12–14% HCO_3^{2-}, 23–27% Cl^- и 60–65% SO_4^{2-}, 18–20% Ca^{2+}, 14–16% Mg^{2+} и 64–68% Na^+ + + K^+, т.е. являются натриево-сульфатными. Описанный состав полностью совпадает с составом вод, отобранных в 2018 г. в протоках Сухой и Мокрый Кагальник (табл. 1).

Три основных катиона и три основных аниона расставлены в виде треугольной диаграммы (рис. 3). Треугольник ионного состава показывает процентное соотношение ионов, но не свидетельствует об общей минерализации. Диаграмма показывает разницу между морской, речной, подземной водой, которая периодически заполняла Свиное гирло в начале декабря 2020 г.

Анализ термохалинных закономерностей при экстремальных по продолжительности и величине сгона воды верховок позволяет представить процесс осолонения следующим образом. В осенне-зимний период в условиях восточных ветров, продолжительностью до 2–4 нед и со скоростью более 6–10 м/сек, прекращается водообмен с Азовским морем и судоходным каналом р. Дон. Река Кагальник превращается в узкий ручей.

Процесс минерализации и преобразования речных пресных водных масс в солоноватые воды происходит в 2 этапа. В первые дни сгона наблюдается двухслойная структура: тип I – пресная (0.6–1.5‰) вода в верхней части, внизу слабосоленая (2–4‰). Тонкий верхний слой воды 10–15 см имеет соленость 0.6–1.3‰ в течение 1–2 дней. Соленость нижнего слоя воды (30–40 см) нарастает до 6–9‰ (осолоненная). Такой характер стратификации держится до 1–2 сут; II тип – соленость воды в г. Свином сверху донизу становится однородной. В условиях самых сильных сгонов до глубин и обмеления в гирлах 0.4–0.6 м вся толща воды становится солоноватой (до 6–8.5‰). Свиное гирло практически целиком заполняется минерализованными водами подземного стока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ новых данных по гидрохимии водных масс Таганрогского залива и дельты Дона с учетом известной природной климатической изменчивости обнаруживает современные физико-географические тенденции в эстуарном водоеме в условиях маловодья. Для Приазовья и Нижнего Дона типичными являются кратковременные (2–3 года и 7 лет) и внутривековые (1933–1944, 2008–2020 гг.) периоды маловодья, засух, пыльных бурь [15]. Исключением в ряду маловодных лет стала весна 2018 г.

Не исключено, что при возможном экстраординарном уменьшении стока Дона соленые морские воды могут распространяться намного выше г. Азова и даже г. Ростова-на-Дону. Сложившаяся в настоящий период обстановка приводит к периодическому (во время сильных "низовок") заполнению водопровода в г. Азове, Таганроге, Ростове-на-Дону и других населенных пунктах солоноватой (4–8‰) водой. В отдельных случаях, как например 14 февраля 2021 г., зафиксирована высокосолоноватая (8–10‰) вода (рис. 1).

В период длительного действия сгонного явления повышается роль стока небольших речек, у которых водосборный участок находится в пределах коренного берега. Источниками питания таких речек в основном являются разгрузки высокоминерализованных подземных (грунтовых) вод. Для подтверждения данной гипотезы требуется проведение дополнительных отборов вод в таких речках на протяжении действия сгонного ветра. Для северного коренного берега к таким речкам относятся Донской Чулек, Мокрый Чалтырь. С южного берега – это реки Кагальник (Сухой и Мокрый), протока Сунжа и Узяк с многочисленными ручьями, стекающими с коренного берега. Такого рода гидрохимические эпизоды, имевшие место на взморье в 2017–2020 гг. на протяжении 10–17 дней, требуют специального изучения.

БЛАГОДАРНОСТИ

В сборе материала и аналитических работах участвовали И.А. Мельников и Е.Г. Алешина, к.ф-м.н. Г.В. Валов, к.г.н. А.В. Клещенков.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Публикация осуществлена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 18-29-05078 мк "Изучение воздействия организмов-деструкторов на металлы в зоне смешения речных и морских вод в широком диапазоне гидроклиматических условий", № 18-05-80010 Опасные явления "Исследование и прогноз опасных гидрометеорологических и геолого-геоморфологических процессов в районах функционирования стратегических объектов на Азово-Черноморском побережье (исторические и современные аспекты)" и реализации Государственного задания № гр. АААА-А18-118122790121-5 "Морские биогеосистемы юга России и их водосборы в условиях аридного климата, хозяйственного освоения и современных геополитических вызовов".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Матишов Г.Г., Григоренко К.С.* Причины осолонения Таганрогского залива // ДАН. 2017. Т. 477. № 1. С. 92–96.
2. *Матишов Г.Г., Григоренко К.С.* Маловодье и роль грунтовых вод в осолонении авандельты Дона // ДАН. 2018. Т. 483. № 4. С. 442–446.

3. *Никаноров А.М.* Региональная гидрохимия: Учебное пособие. Ростов/Д: Изд-во "НОК", 2011. 388 с.
4. *Никаноров А.М.* Гидрохимия и методы исследования качества вод суши. Ростов-на-Дону. Изд-во ЮФУ. 2017. 572 с.
5. *Бронфман А.М., Дубинина В.Г., Макарова Г.Д.* Гидрологические и гидрохимические основы продуктивности Азовского моря. М.: Пищевая промышленность. 1979. 288 с.
6. *Бронфман А.М., Хлебников Е.П.* Азовское море Основы реконструкции. Ленинград. Гидрометеоиздат. 1985. 272 с.
7. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том V. Азовское море. / Гершанович Д.Е., Гоптарев Н.П., Затучная Б.М., Симонов А.И. (ред.). 1991. Санкт-Петербург, Гидрометеозидат. 236 с.
8. *Гаргопа Ю.М.* Сопряженность крупномасштабных изменений биопродуктивности Азовского моря и гидрометеорологических условий ее формирования // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. 2003. Т. 2. С. 78–82.
9. *Кукса В.И., Гаргопа Ю.М.* Современная оценка гидрологических условий формирования биопродуктивности Азовского моря // Водные ресурсы. 2004. Т. 31. № 4. С. 489.
10. *Матишов Г.Г.* Случаи экстремальной адвекции соленых вод в дельту Дона и льда в Керченский пролив // ДАН. 2015. Т. 465. №1. С. 99–103.
11. *Бергер В.Я.* Адаптации морских моллюсков к изменениям солености среды. АН СССР, Зоол. ин-т. Л.: Наука: Ленингр. отд-ние. 1986. 216 с.
12. *Симов В.Г.* Гидрология устьев рек Азовского моря. Москва. Гидрометеоиздат. 1989. 328 с.
13. Ресурсы поверхностных вод СССР, том 7. Донской район. / Кожина З.М., Потапова О.Н. (ред). 1973. Ленинград, Гидрометеоиздат. 459 с.
14. Гидрометеорологический справочник Азовского моря / Под ред. А.А. Аксенова. Л.: Гидрометеоиздат, 1962. 856 с.
15. *Матишов Г.Г., Дашкевич Л.В., Титов В.В., Кириллова Е.Э.* Анализ внутривековой природной изменчивости в Приазовье и на Нижнем Дону: причина маловодья // Наука юга России. 2021. Т. 17. № 1. С. 13–23.

HYDROCHEMICAL COMPOSITION OF WATER AT THE SEASHORE AND AVANDELTA OF THE DON IN THE CONDITIONS OF LACK OF WATER (XX–XXI CENTURIES)

Academician of the RAS G. G. Matishov[a, b] and K. S. Grigorenko[a, #]

[a] *Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation*
[b] *Murmansk Sea Biological Institute, Kola Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation*
[#]*E-mail: Klim_grig@mail.ru*

The work is based on targeted investigations of water sampling under different weather conditions and water levels in the delta and the seashore. The main experiment covered the period from November 20, 2020 to March 18, 2021. Water for hydrochemical analyzes was sampled at maximum water positive and negative surges, in some cases – layer by layer. At the same time, water was taken from the main water pipeline in the city of Azov to clarify its nature (ground, river or sea), their dependence on the surge regimes. The fixation of the material was carried out under normal conditions, extreme fluctuations in sea level, with a sharp increase in the water balance of the proportion of groundwater under ice, on a shallow seashore, in delta arms during negative surges. In 2020, at the station in Donskoy, measurements of salinity began directly in the waterway of the Don River, which depends on the underground runoff weaker. The obtained data gave grounds to subdivide the transformed waters in the estuarine zone of the Azov-Don basin.

Keywords: Don delta, Don lack of water, climate change, ion composition, tide-surge phenomena, underflow

УДК 551.465,551.506,574.52

ТЕЧЕНИЯ АЗОВСКОГО МОРЯ В ПЕРИОД МАЛОВОДЬЯ ДОНА[1]

© 2021 г. Г. Г. Матишов[1, 2], К. С. Григоренко[1, *]

[1]*Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия*

[2]*Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН, Мурманск, Россия*

**e-mail: klim_grig@mail.ru*

Поступила в редакцию 02.06.2020 г.
После доработки 15.06.2020 г.
Принята к публикации 15.08.2020 г.

На основе судовых наблюдений НИС "Денеб" в 2018 и 2019 гг. исследуется водообмен между Черным и Азовским морями. Съемки проводились при разных метеоусловиях, что привело к большому разбросу результатов. Северный ветер способствует формированию переноса вод на юг, в 5–6 раз превышающего перенос вод на север, южный приводит к заполнению всего измерительного створа шириной 17 км водами, движущимися на север, и объемом, до 30 раз превышающим средний для современного периода маловодья расход Дона. В работе построены схемы циркуляции вод Азовского моря на поверхности и в придонном горизонтах, подтверждающие дрейфовую схему движения вод. Подробно описаны затоки черноморских вод в Темрюкский залив. На основе базы данных ЮНЦ РАН построена классификация типов стратификации вод Таганрогского залива, выделены четыре типа, также отмечено перестроение типов стратификации в связи с осолонением моря.

Ключевые слова: Азовское море, аридизация климата, динамика солености, маловодье Дона, морские течения

DOI: 10.31857/S0030157421020131

ВВЕДЕНИЕ

Соленость Азовского моря очень быстро меняется при колебаниях пресного стока впадающих в него рек, прежде всего Дона. В предыдущих работах проанализирован рост средней солености [2] до 2017 г. Экспедиционные исследования показывают, что значения солености, превышающие 15 е.п.с. в акватории собственно моря (к западу от косы Долгой Таганрогского залива) с 2015 г. встречаются постоянно. В работе [1] приведены результаты съемок термохалинной структуры моря во время и после обильного половодья Дона в 2018 г. Приведенные результаты показывают, что половодье с максимальными расходами более 1700 м^3/с в ст. Раздорской способствовало вытеснению азовоморских вод только из восточной и центральной частей Таганрогского залива, а также усилению процессов фронтогенеза в его центральной и западной частях, при этом в собственно Азовском море по-прежнему наблюдалась соленость 14–15 е.п.с. В работе [4] приводятся результаты измерений течений в Керченском проливе, но не на поперечных, а на продольных разрезах, из-за чего невозможно провести оценку водообмена между Азовским и Черным морями и сравнить с результатами работы [1].

Азовское море имеет длину 300 км (без Таганрогского залива), ширину – 200 км, в водном бассейне такого масштаба наиболее часто повторяющаяся циркуляция должна иметь в направление против часовой стрелки, соответственно, черноморские воды должны проникать от Керченского пролива в Темрюкский залив и далее распространяться на север, формируя фронты солености, при перемешивании с водами Дона в Таганрогском заливе, однако максимальная глубина 14 м приводит к тому, что дрейфовый перенос доминирует над геострофическим, при этом форма и направление береговых кос, а также наиболее частые случаи наблюдения черноморских вод (более 15 е.п.с.) в юго-восточной части моря позволяют предположить наличие хотя бы эпизодической циклонической циркуляции.

Таганрогский, Темрюкский заливы и Керченский пролив являются зонами смешения вод с разной соленостью, обладают большой протяженностью, изменчивостью масштабов и градиентов фронтальных зон температуры и солености. За период наблюдений с 2001 г. отмечается общая деградация элементов термохалинной структуры вод Таганрогского залива, если раньше повсеместно встречались струи, вихри, затоки и линзы вод разного происхождения, то сейчас чаще всего наблюдаются две фронтальные зоны [8] –

[1] **Оригинальный текст:** *Матишов Г.Г., Григоренко К.С.* Течения Азовского моря в период маловодья Дона // Океанология. 2021. Т. 61. № 2. С. 198–208.

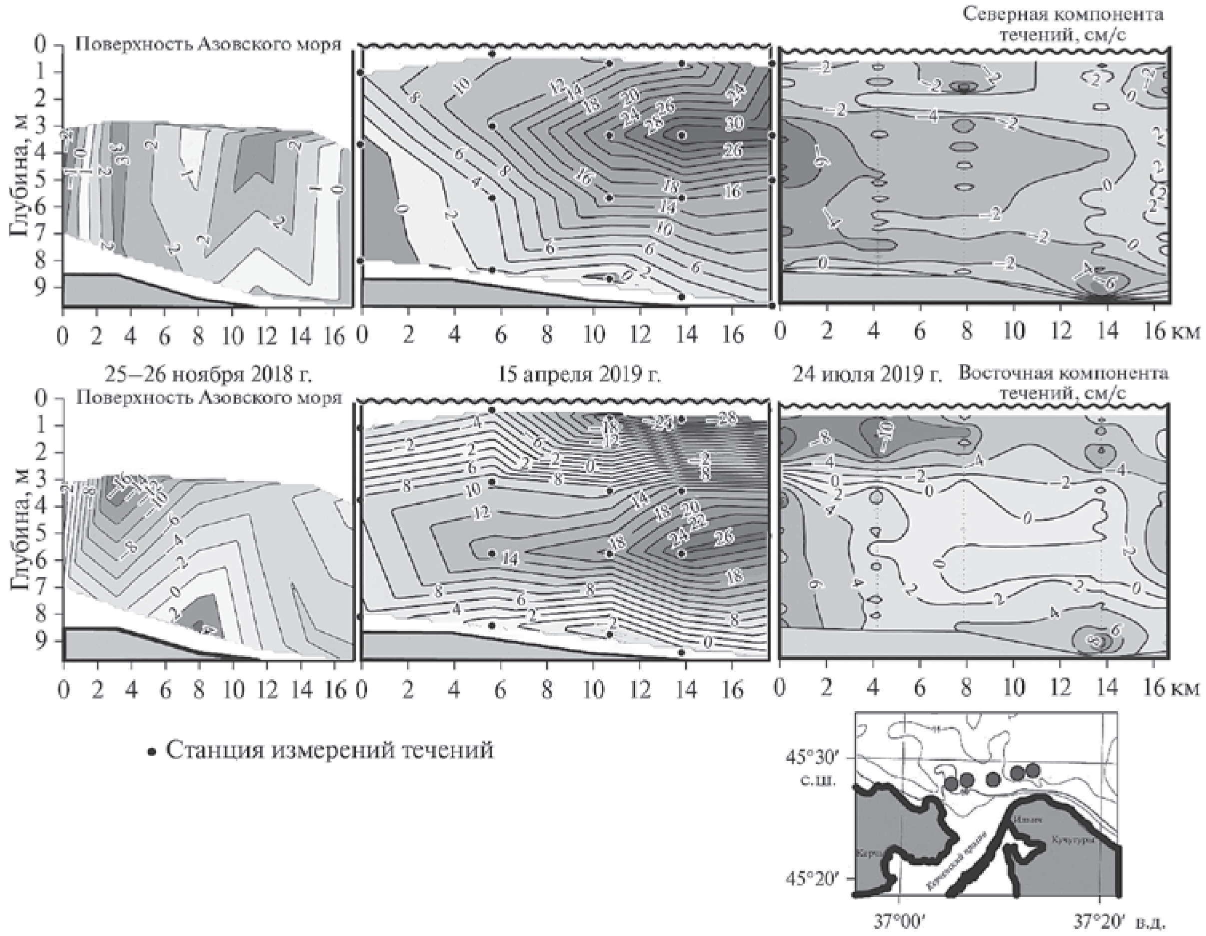


Рис. 1. Составляющие течений в северной части Керченского пролива 25–26 ноября 2018 г., 15 апреля и 24 июля 2019 г.

в восточной, приустьевой части залива, отделяющая перемешанные воды залива от пресного стока Дона, и в западной – между перемешанными водами и солеными водами Азовского моря.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наблюдения Южного научного центра РАН за термохалинной структурой Таганрогского залива начаты в 2001 г., после чего стали проводиться ежесезонные съемки. Полученные материалы характеризуют характер стратификации вод в относительно полноводный период с 2000 по 2010 гг., а также их изменения в период аридизации климата юга России в последующие годы.

Исследования циркуляции Азовского моря проводятся на борту НИС "Денеб" с 2018 г. С этого момента впервые для современного маловодного периода бассейна Азовского моря проведены три инструментальных измерения объемов вод и скоростей течений, проходящих через Керченский пролив (рис. 1). Съемки структуры течений северной части Керченского пролива 25–26 ноября 2018 г. и 15 апреля 2019 г. проведены с помощью буйковой станции Aanderaa RCM 9LW, которая подвешивалась последовательно на нескольких горизонтах на каждой станции измерений. Для построения схемы поверхностной и придонной циркуляции вод Азовского моря использованы данные экспедиции НИС "Денеб" 16–30 июля 2019 г. С помощью доплеровского измерителя течений Workhorse Sentinel WHS 600 выполнено 69 промеров вертикальной структуры течений (рис. 2, 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ноябре 2018 г., во время измерений течений в северной части Керченского пролива, преобладал слабый ветер западной составляющей и перенос вод через рассмотренный створ на север составил 1920 м^3/с. В апреле 2019 г. получена более подробная схема циркуляции вод, измерения проводились при сильном (до 14 м/с) юго-юго-

Рис. 2. Фактическое поле течений на поверхности Азовского моря в векторной форме 16—30 июля 2019 г, направление и скорость ветра представлены схематично.

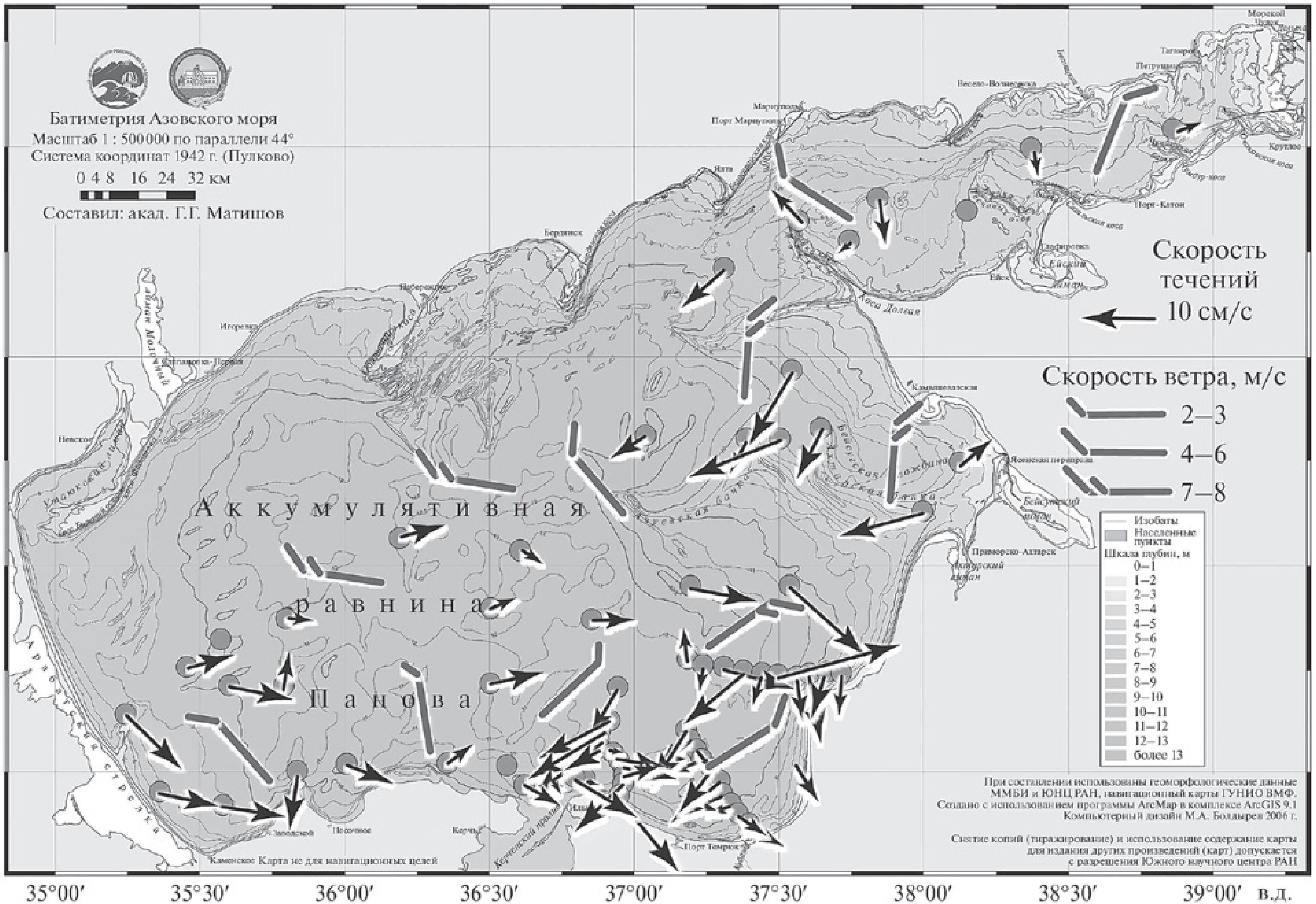


Рис. 3. Фактическое поле течений в придонном слое Азовского моря в векторной форме 16–30 июля 2019 г, направление и скорость ветра представлены схематично.

западном ветре, и перенос вод на север достиг 17100 м^3/с [1].

24 июля 2019 г. исследования структуры разнонаправленных течений проводились с помощью Workhorse Sentinel WHS 600 с дискретностью измерений 0.2 м, полученные результаты являются более точными, по сравнению с результатами измерений Aanderaa RCM 9LW. Во время работы над восточной и южной частями акватории Азовского моря господствовал устойчивый малоподвижный антициклон и наблюдался северный ветер с максимальной скоростью 7.3 м/с.

Практически на всем разрезе течения имели южную составляющую, не отличаясь при этом, по сравнению с апрельской съемкой, высокими скоростями. В западной части разреза, в придонном горизонте обнаружено ядро течения на юг со скоростью до 6 см/с. Только на двух крайних станциях в восточной части отмечено движение вод на север со скоростью 0–2 см/с. Раздел между северной и южной компонентами течений аналогичен разделу между восточной и западной компонентами, он заглубляется от горизонта 1–2 м на западе и до 8 м на востоке разреза. Для приповерхностного горизонта и до глубины три метра характерен перенос вод на запад, с максимальными скоростями более 10 см/с в западной части разреза, для придонного слоя – на восток, с максимальной скоростью 8 см/с на востоке разреза. Приблизительная оценка переноса вод на север равна 729 м^3/с, на юг – 3988 м^3/с.

Усиление черноморской адвекции приводит к усилению термохалинных градиентов в прикерченском районе и, как следствие, к изменению режима течений Азовского моря. Сравним натурные данные измерений с со схемой циркуляции Азовского моря, построенной авторами работы [6] в 2009 г., в период распреснения, т.е. в период ослабленного притока соленых вод из Черного моря. Течения на поверхности практически полностью совпадают с фактическим направлением ветра, полученным по данным судовой метеостанции в момент измерений, только в шести точках течение направлено в противоположную сторону. Во время действия ветров северной составляющей формируются ячейки циркуляции в западной части Таганрогского залива и в Ясенском заливе. Заметно усиление течений у южных берегов (рис. 2).

Поле течений в придонном слое (рис. 3) показывает, что на ряде удаленных от берегов станций наблюдается поворот вектора скорости течений от направления ветра вправо, характерный для экмановского дрейфового течения.

В придонных слоях Темрюкского залива заметны векторы течений противоположного направления относительно поверхности, эти течения направлены от Керченского пролива вдоль береговой линии, они представляют собой заток вод из Черного моря.

Исследование полей солености и структуры течений Темрюкского залива как наиболее подверженного влиянию затоков вод из Черного моря во время экспедиции выполнено подробно. По данным судовых наблюдений построено три разреза CTD- и ADCP-профилирований (рис. 4 и 5).

На станциях, выполненных к западу от устья Кубани, отмечена вертикальная стратификация солености с достаточно большими для Азовского моря перепадами: поверхностный слой распреснен до 12.5 е.п.с., тогда как придонный заполнен водами с соленостью 15–16 е.п.с. и инструментально зафиксированным максимумом 16.3 е.п.с. в Темрюкском заливе и 17.1 е.п.с. в районе северо-западной оконечности Таманского полуострова.

На разрезах солености Темрюкского залива, в общем, выделяется область распреснения кубанскими водами в верхней части и придонный горизонт, заполненный черноморскими водами (рис. 4). В период измерений на всех выполненных разрезах в верхней части прибрежных станций обнаружено понижение солености до 12.5 е.п.с., при этом на северном разрезе (А–А) наблюдались значения менее 12 е.п.с., на расстоянии 5.5 км от берега. Граница распространения вод со значениями менее 13 е.п.с., соответственно, расположена на расстоянии 10 км от берега на всех трех разрезах в северной части (А–А), центральной (Б–Б) и западной частях (В–В) Темрюкского залива. Интересно отметить, что струи вод с соленостью 12–12.5 е.п.с. на центральном и западном разрезах отрывались от береговой линии, и на крайних прибрежных станциях этих разрезов минимальная соленость на поверхности превышала 13 е.п.с.

Несмотря на воздействие северного ветра, выдавливающего азовоморские воды через Керченский пролив, весь придонный горизонт западного разреза заполнен водами, соленость которых выше 15.5 е.п.с. (максимум 17.1 е.п.с.), причем слой, который ограничивает изолиния 15 е.п.с., имеет толщину до 4 м при глубине моря 12 м.

При движении вдоль берега моря далее в Темрюкский залив область, занимаемая черноморскими водами, сокращается, и на центральном разрезе соленые воды (более 15 е.п.с.) занимают только наиболее глубокие понижения дна слоем толщиной менее 2 м.

Для всех разрезов в прибрежной части характерно расслоение с высокими вертикальными градиентами солености (12–12.5 е.п.с. на поверхности и до 14–15.5 е.п.с. в придонном горизонте).

Скорости течений в Темрюкском заливе нормализованы относительно плоскости разрезов, соответственно, течения, направленные против часовой стрелки, относительно берега моря, изображены с положительным знаком, по часо-

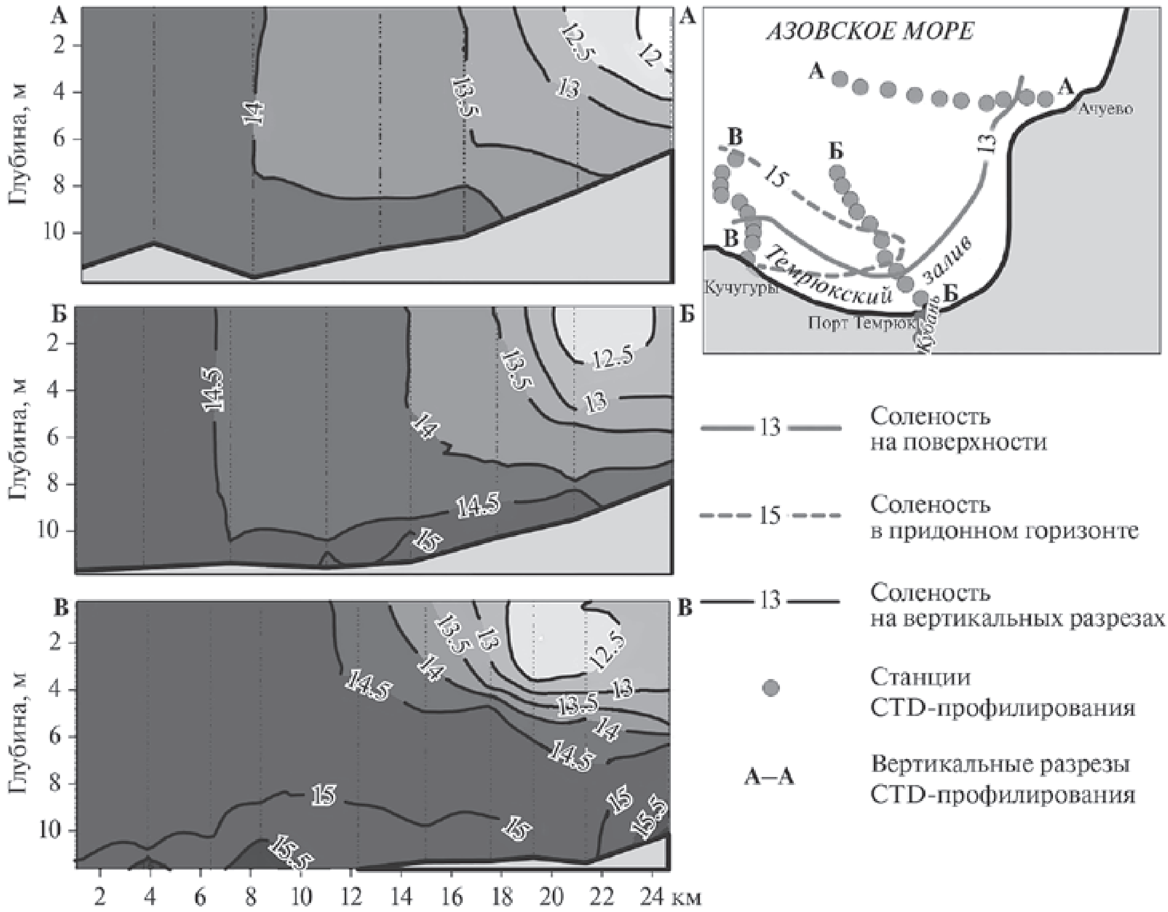


Рис. 4. Соленость Темрюкского залива Азовского моря по данным судовых наблюдений НИС “Денеб” 21 июля 2019 г.

вой стрелке – с отрицательным (рис. 5). Для всех разрезов характерно доминирование переноса вод в южном и западном направлении, что соответствует рис. 2 и 3, при этом на каждом обнаружены струи, направленные в противоположном направлении. В целом, для всех разрезов отсутствовала стратификация течений по вертикали.

На северном разрезе (А–А) выделен отдельный поток в северном направлении на расстоянии 23 км от берега, шириной 3 км с максимальной скоростью 6 см/с. С запада и востока от него преобладал обратный перенос с такими же скоростями. У крайней восточной стороны наблюдался слабый перенос вод на север со скоростью 0–3 см/с, которому соответствовала область со значениями солености 12–12.5 е.п.с. (рис. 4).

На центральном разрезе (Б–Б) отмечены два участка с движением вод в направлении циклонической циркуляции, более интенсивный расположен в прибрежной части, занял всю водную толщу с максимальными скоростями более 6 см/с, в мористой части разреза в придонном горизонте обнаружен заток со скоростью 3–6 см/с, соответствующий области с соленостью более 15 е.п.с. (рис. 4).

Западный разрез (В–В) представляет наибольший интерес, потому что он расположен ближе всего к Керченскому проливу, на нем зафиксированы наибольшие значения солености на дне и, соответственно, наибольшие вертикальные градиенты солености, кроме этого, инструментально измерен наибольший перепад скоростей течений в обе стороны относительно плоскости разреза. На большей его части наблюдался перенос вод на запад с максимальной скоростью более 18 см/с, данное значение зафиксировано в струе прибрежной части разреза, где получена соленость 12.5 е.п.с., поэтому можно утверждать, что в этой части доминирует пресный сток р. Кубань. В мористой части разреза, на расстоянии 20 км от берега, во всей водной толще доминирует перенос на запад со скоростью до 12 см/с, соленость составляет 14–15 е.п.с., что является типичным для азовоморского дрейфового переноса. В десяти км

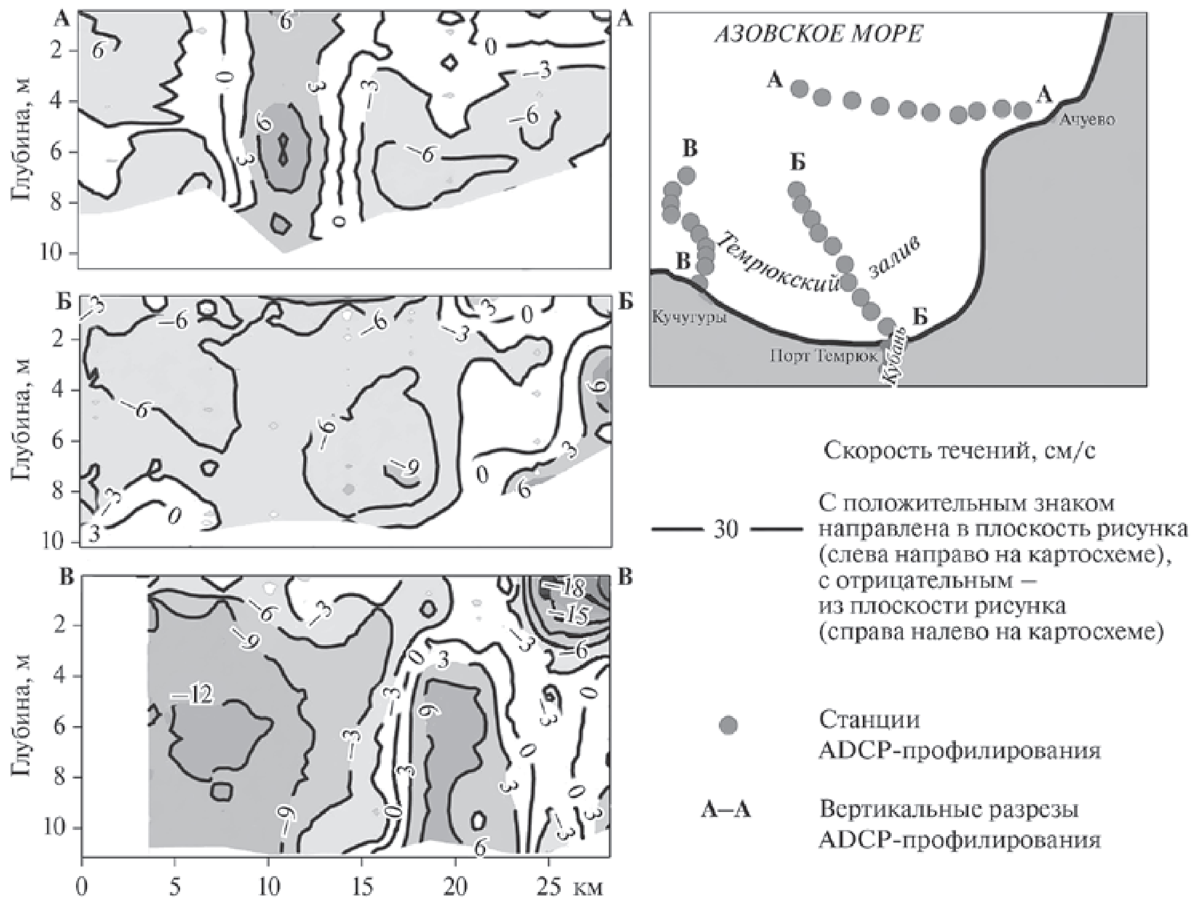


Рис. 5. Течения Темрюкского залива Азовского моря по данным судовых наблюдений НИС "Денеб" 21 июля 2019 г.

от берега обнаружена струя достаточно интенсивного течения на восток, максимумы скоростей в нем превышают 6 см/с, и его придонная часть соответствует областям с соленостью 15 е.п.с.

Чтобы выяснить, насколько затоки черноморских вод Темрюкского залива обеспечиваются за счет геострофического баланса течений, существующего за счет постоянного притока соленых вод через Керченский пролив, рассчитаны и построены разрезы динамических высот на основе данных CTD-профилирования соответствующих разрезов (рис. 6). Наклоны изолиний на всех разрезах практически отсутствуют, за исключением части западного разреза, в области которого наблюдается интенсивный заток соленых вод Черного моря со скоростями до 6 см/с. Для этой части разреза с помощью динамического метода [3] рассчитана скорость геострофического течения, максимум которого достиг 0.6 см/с, соответственно, в условиях преобладания северного ветра, вклад геострофического баланса в систему течений юго-восточной части Азовского моря, наиболее подверженной влиянию черноморских вод, составляет всего 10%.

ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальными наблюдениями установлено, что осолонение не способствовало усложнению чисто дрейфовой схемы циркуляции моря, за исключением юго-восточного района, где усилились струи соленых вод восточного и северо-восточного направления.

Зависимость дрейфовых течений от переменчивости направления ветра не позволяет сформироваться постоянной циклонической циркуляции вод, это приводит к тому, что в безветренную летнюю погоду перемешивание снижается настолько, что в придонных слоях происходят заморы, но при усилении ветра толща перемешивается вплоть до взмучивания донных осадков.

В 2018 г. в период высокого стока Дона (1700 м^3/с в ст. Раздорской) в Таганрогском заливе сформировался приустьевой фронт солености, расположенный в восточной части, центральная часть заполнилась перемешанными водами Дона и Азовского моря с вихреобразными участками пониженной и повышенной солености, в западной части залива наблюдался достаточно интенсив-

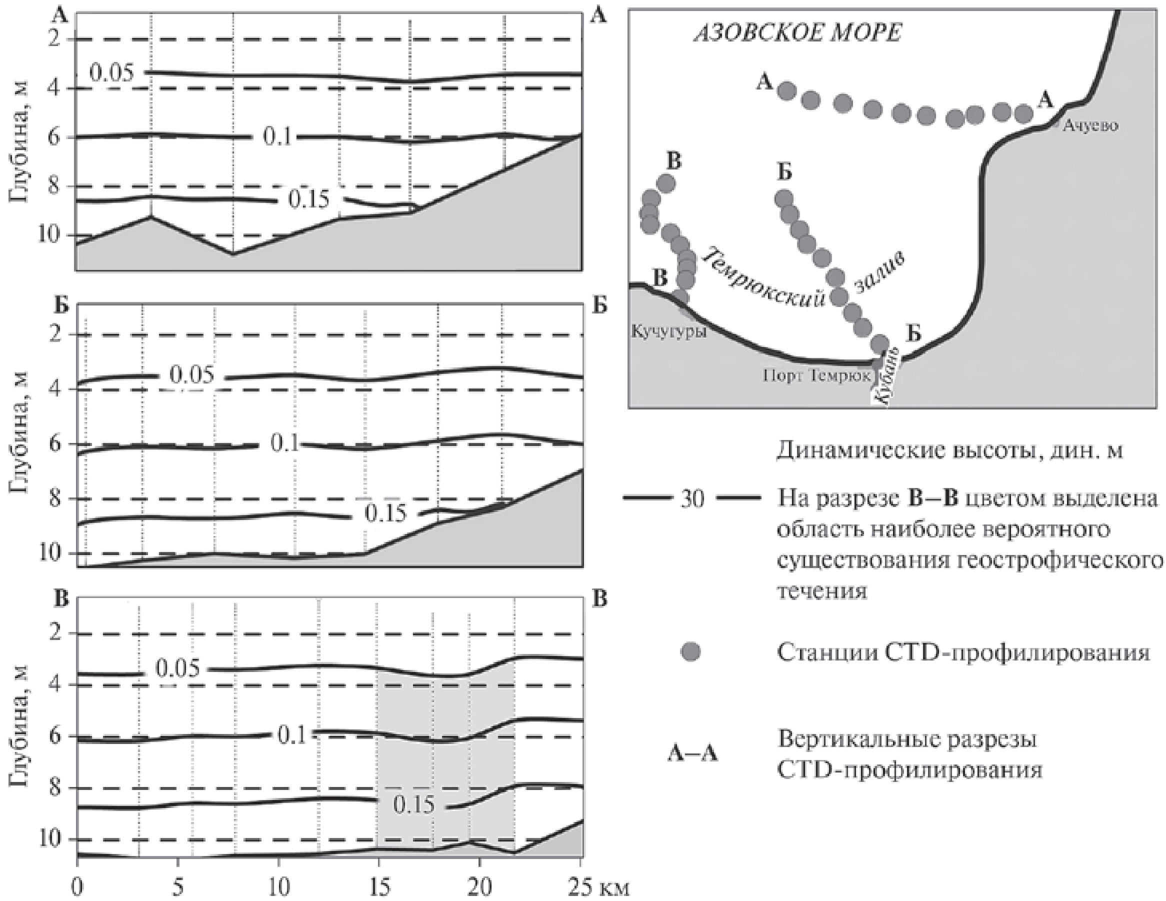


Рис. 6. Динамические высоты Темрюкского залива Азовского моря по данным судовых наблюдений НИС "Денеб" 21 июля 2019 г.

ный второй фронт солености, разделивший перемешанные воды залива и соленые воды Азовского моря. Ежегодные наблюдения показывают, что при понижении пресного стока (менее 500 м^3/с в ст. Раздорской) в первую очередь разрушается второй фронт солености, при этом соленость плавно понижается вплоть до приустьевого фронта, область, заполненная перемешанными водами, сокращается, пока не формируется одноступенчатая структура пресных речных вод и одного мощного, не обязательно с высокими градиентами, но большой протяженности, фронта солености и области распространения азовоморских вод, площадь которой, по состоянию на 2019 г., увеличивается.

На рис. 7 представлены наиболее характерные типы стратификации вод Таганрогского залива от устья Дона до косы Долгой (в качестве примеров взяты данные экспедиций 29.06–04.07.2001 г., 16–24.09.2005 г. и 20–28.08.2018 г.), либо до Сазальницкой косы (экспедиция 10–12.04.2012 г.). Построенные типы вертикального распределения солености можно охарактеризовать как "нормальный", соответствующий типу стратификации, при котором изолинии солености расположены последовательно, по возрастанию и имеют почти вертикальную форму; "двухслойный" – при этом типе стратификации в зонах непосредственного контакта пресных речных и соленых морских вод наблюдается слой скачка плотности, в этом случае фронтальная плоскость расположена под очень пологим углом к поверхности воды; "линзовидный" – соответствует условиям вихреобразного перемешивания, формирования линз пресных (речных), слабосолоноватых и солоноватых вод; "смешанный" – характеризует случаи, когда наблюдается как линзообразование, так и формирование слоев скачка солености.

Маловодье Дона приводит к кардинальному перестроению термохалинной структуры Таганрогского залива, с 2012 г. в центральной части залива (район Сазальницкой косы) постоянно присутствуют высокосолоноватые (морские) воды, при этом случаев наблюдения "линзовидного" и "смешанного" типов стратификации становится меньше.

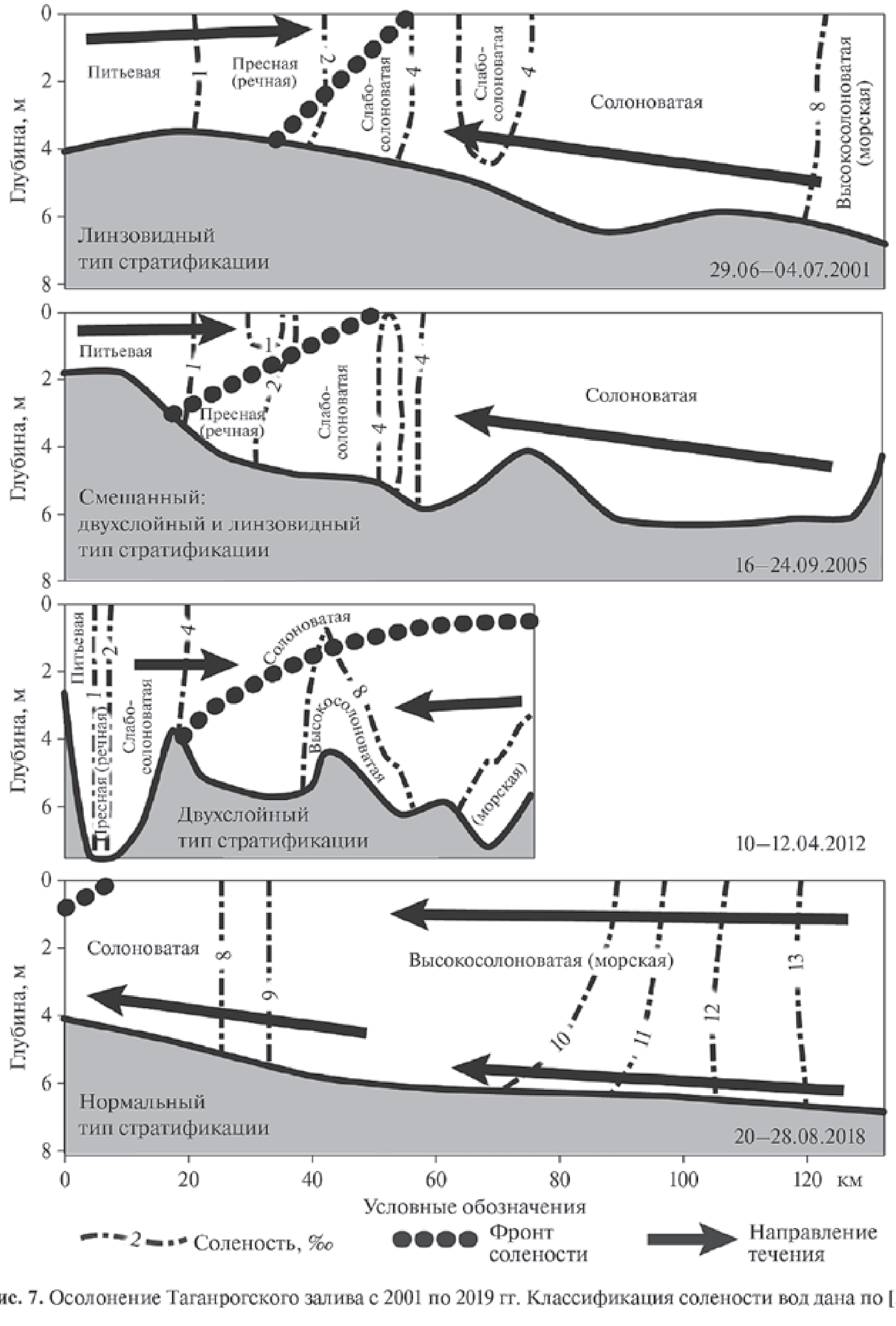


Рис. 7. Осолонение Таганрогского залива с 2001 по 2019 гг. Классификация солености вод дана по [5].

Проведенный в работе анализ измерений вертикальной структуры течений Керченского пролива, полей течений Азовского моря, а также наиболее характерных типов стратификации вод Таганрогского залива позволяет предположить, что черноморская фауна, характерная для высокосолоноватых (морских) вод, будет и дальше распространяться в Азовском море, занимая освобождающиеся экологические ниши.

Если в авандельте Дона часто наблюдаются слабосолоноватые и солоноватые воды (до 5–7 е.п.с.) [5], то в Таганрогском заливе с 2012 г. постоянно присутствуют высокосолоноватые (морские) воды, с соленостью более 8 е.п.с. и до 13–14 е.п.с., что выше зоогеографического порога обитания местной азовоморской фауны.

ВЫВОДЫ

Измерения показывают исключительную метеозависимость структуры течений Керченского пролива, величины и скорости могут варьироваться в очень высоких пределах. Оценки затоков вод Черного моря могут быть в 30 раз больше, чем средние расходы Дона (400–500 $м^3/с$) при южных ветрах, практически весь измерительный створ шириной 17 км могут заполнять воды северной составляющей течений со скоростями до 30 см/с, но структура вод Керченского пролива быстро перестраивается при изменении метеоусловий, и при северных ветрах обратный перенос вод в Черное море может быть в 5–6 раз выше, нежели в Азовское.

По сравнению с периодом повышенного стока Дона и распреснения моря схема поверхностных и придонных течений моря кардинальных изменений не претерпела. Почти на всей акватории наблюдается чисто дрейфовая схема циркуляции вод. Исключением является юго-восточная часть моря, где активизировались струи затоков черноморских вод, даже в условиях северных ветров в придонном горизонте наблюдаются воды с соленостью 15–17 е.п.с. и течения восточного и северо-восточного направлений со скоростями 10–15 см/с, причем эти течения имеют частичную геострофическую природу, наверняка являются постоянными, не прекращаясь при северных ветрах и значительно усиливаясь при южных. Наблюдения за бентосными сообществами показывают, что в этой части Азовского моря уже сформировались устойчивые колонии видов, характерных для более соленого Черного моря, что говорит о долговременном присутствии черноморских вод в рассматриваемом районе [7].

Проникновение вод Черного моря приводит к формированию подпора высокосолоноватых (морских) вод в Таганрогском заливе и сокращению объема районов перемешивания с речными, в 2019 г. наблюдалась тенденция продвижения таких вод выше по заливу вплоть до 30–40 км от устья Дона. На сегодняшний день важной является задача измерения скоростей течений непосредственно в Керченском проливе, который, в наиболее узкой части, более чем втрое уже створа измерений НИС "Денеб" в 2018–2019 гг., а также продолжения мониторинга за площадью распространения чисто черноморских вод, для более точного описания гидрофизического состояния Азовского моря.

Публикация осуществлена при финансовой поддержке Всероссийской организации "Русское географическое общество", "Азовская комплексная экспедиция", договор № 08/2019-И, проекта РФФИ № 18-29-05078 мк "Изучение воздействия организмов-деструкторов на металлы в зоне смешения речных и морских вод в широком диапазоне гидроклиматических условий" и реализации Государственного задания № 0256-2019-0028 № гр. АААА-А18-118122790121-5 "Морские биогеосистемы юга России и их водосборы в условиях аридного климата, хозяйственного освоения и современных геополитических вызовов".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Григоренко К.С., Олейников Е.П., Григоренко Е.Г.* Влияние половодья Дона 2018 г. на термохалинную структуру Азовского моря // Наука юга России. 2019. Т. 15. № 3. С. 63–69.

2. *Дашкевич Л.В., Бердников С.В., Кулыгин В.В.* Многолетнее изменение средней солености Азовского моря // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 5. С. 563–572.

3. *Жуков Л.А.* Общая океанология / Под ред. Доронина Ю.П. Л.: Гидрометеоиздат. 1976. 376 с.

4. *Лемешко Е.М., Морозов А.Н., Федоров С.В.* Исследования течений в Керченском проливе по данным акустического доплеровского профилометра течений (ADCP) // Экология. Экономика. Информатика. Азовское море, Керченский пролив и предпроливные зоны в Черном море: проблемы управления прибрежными территориями для обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования. Сборник материалов III Всероссийской конференции. Ростов-на-Дону Изд-во Южного федерального университета, 2016. С. 213–228.

5. *Матишов Г.Г., Григоренко К.С.* Причины осолонения Таганрогского залива // Докл. АН. 2017. Т. 477. № 1. 92–96.

6. *Матишов Г.Г., Матишов Д.Г.* Новые представления циркуляции вод Азовского моря // Труды ЮНЦ РАН. Том 4: Моделирование и анализ гидрологических процессов в Азовском море. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. С. 196–203.

7. *Семин В.Л., Колючкина Г.А., Григоренко К.С. и др.* Изменения донной фауны Азовского моря в условиях аномального осолонения // Труды VIII Международной научно-практической конференции "Морские исследования и образование (MARESEDU-2019)" Тверь: ООО "ПолиПРЕСС", 2020. Т. II(III). С. 490–494.

8. *Федоров К.Н.* Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 296 с.

Currents of the Azov Sea during the Don Lack of Water Period

G. G. Matishov[a, b], K. S. Grigorenko[a, #]

[a]*Southern Scientific Center RAS, Rostov-On-Don, Russia*
[b]*Murmansk Marine Biological Institute KSC RAS, Murmansk, Russia*
[#]*e-mail: klim_grig@mail.ru*

Based on marine observations onboard of the R/V *Deneb* in 2018 and 2019 water exchange between the Black and Azov seas is investigated. The investigations were carried out under different weather conditions, which led to a large scatter of the results. The north wind contributes to the formation of water transfer to the south 5–6 times higher than the transfer of water to the north, southern leads to the filling of the entire cross-section, 17 km wide, with waters, moving to the north and up to 30 times more than the average flow of the Don for the modern period of water scarcity. In this work, water circulation patterns of the Azov Sea on the surface and in the bottom horizons are constructed, confirming the drift scheme of water movement. The inflows of the Black Sea waters to the Temryuk Bay are described in detail. Based on the database of the SSC RAS, a classification of the types of stratification of the waters of the Taganrog Bay is constructed, four types are highlighted, the restructuring of the types of stratification in connection with the salinization of the sea was also noted.

Keywords: The Azov Sea, aridization of climate, salinity dynamics, Don lack of water, sea currents

УДК 556.54:551.465

Структура речной дельты и соленость замыкающего водоема[1]

Г. Г. Матишов*, **, В. Г. Ильичев*,

Л. В. Дашкевич*

На основании теоретико-вероятностных аналогий предложена количественная характеристика разнообразия речной дельты — дисперсия. В результате ряда компьютерных экспериментов с гидрологической моделью показано, что с увеличением дисперсии структуры дельты уменьшается внутригодовая амплитуда колебаний солености замыкающего водоема. Расчеты, проведенные на примере р. Дон и Таганрогского залива Азовского моря (как замыкающего водоема), показали, что современные климатические изменения и антропогенные факторы сокращают полноценное функционирование рукавов. Поэтому, вероятно, будет происходить уменьшение дисперсии речного стока и, следовательно, дестабилизация и рост вариабельности солености замыкающего водоема.

Ключевые слова: река, замыкающий водоем, дельта, дисперсия, амплитуда, соленость.

DOI: 10.52002/0130-2906-2021-7-90-100

1. Введение

Дельты многих рек представляют собой разветвленную сеть рукавов, которая со временем эволюционирует: некоторые малые рукава объединяются в большие, а крупные рукава, напротив, расщепляются на малые из-за образования островов и отмелей. Образованию речных дельт способствует вынос водами рек больших объемов аллювиального материала. Характер аккумуляции определяется размерами твердого стока реки, ее режимом, направлением и скоростью современных тектонических движений, а также степенью воздействия моря (волнение, сгонно-нагонные течения, приливо-отливные изменения морского уровня) [17]. Дробление речного потока в устьевом отрезке на систему рукавов дает начало образованию многорукавных дельт. На юге России яркими представителями рек с многорукавными дельтами являются Волга, Дон, Кубань. Эти реки и большая часть их притоков выработали относительно неглубокие, но широкие долины, заложенные в легко размываемых осадочных породах.

В настоящей работе на основе компьютерных экспериментов впервые показано, что перераспределение стока воды в дельте реки по рукавам (и

---

* *Южный научный центр Российской академии наук; e-mail: vitaly369@yandex.ru (Ильичев Виталий Григорьевич).*

***Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра Российской академии наук.*

[1] **Оригинальный текст:** *Матишов Г.Г., Ильичев В.Г., Дашкевич Л.В.* Структура речной дельты и соленость замыкающего водоема // Метеорология и гидрология. 2021. № 7. С. 90–100.

морфология последних) влияет на динамику солености замыкающего водоема (ЗВ). Целью настоящей работы было на примере р. Дон показать стабилизирующую роль разнообразия речной дельты (ее дисперсии) для вариабельности солености ЗВ (в данном случае Таганрогского залива Азовского моря). Актуальность работы обусловлена необходимостью прогноза развития экосистемы дельты реки и устьевой части моря при увеличивающейся антропогенной нагрузке (водозабор на нужды орошения, расширение и углубление основного русла с оттяжкой вод из малых рукавов и др.). В данной статье обсуждается следующая задача: как в зависимости от морфометрии дельты (количества и пропускной способности рукавов) изменяется соленость ЗВ при зафиксированном годовом режиме речного стока.

Морфометрия каждого из рукавов дельты определяет пропускную способность (вектор λ) и время добегания (вектор τ) воды в рукавах до ЗВ при деформации объема (v) основного русла. В теоретическом плане расчет этих характеристик является трудной задачей, но можно получить данную информацию на основе натурных наблюдений или экспериментов в гидрологических лотках. Ниже считаем, что зависимости $\lambda(v)$ и $\tau(v)$ априори заданы.

Куда более сложными при формировании дельты являются сгонно-нагонные явления. Здесь должны учитываться не два участника “вода — суша”, а три — “вода — суша — воздух”. Такие модели только начинают создаваться [9], их практическое применение еще впереди, и здесь этот аспект также опускается.

Статья состоит из двух частей. В первой предложена простая гидрологическая модель взаимодействия реки и замыкающего водоема. Во второй части приведены расчеты солености ЗВ в зависимости от деформации морфометрии дельты. В качестве входной информации использованы данные по р. Дон и Таганрогскому заливу. Расчеты проводились на длительный срок вплоть до установления асимптотического режима [15].

2. Материалы и методы

Приведем различные трактовки речной дельты. Разумеется, выбор подхода диктуется спецификой той или иной задачи.

1. Функция веса в линейных динамических системах. Так, пусть задан ориентированный граф-дерево, описывающий потоки в дельте реки. Здесь следует выделить начальную вершину — верховье реки, в которую поступает сток; конечную вершину (или набор конечных вершин) — место впадения воды в ЗВ. Разумеется, промежуточные вершины — это или точки разветвления, или точки пересечения рукавов. В каждый момент времени t гидрологическое состояние дельты задается вектором $X(t) = \{x_1(t), ..., x_n(t)\}$, в котором компонентами являются объемы воды в каждой из n вершин. Ребра этого графа отвечают за распределение потоков между вершинами и длительность перетоков между вершинами.

Обозначим через $v(t)$ и $w(t)$ — объемы воды во входящем (верховья реки) и выходящем (устье реки) потоках в момент времени t. Вся информация о структуре графа может быть максимально сжата в так называемой функции веса $m(t)$ [20]. Так, при $x(0) = 0$ имеет место основная связка “вход — выход”:

$$w(t) = \int_0^t v(t-s)m(s)ds. \quad (1)$$

Обсудим два важнейших свойства любой такой функции веса:

— неотрицательность, т. е.

$$m(t) \geq 0 \text{ для всех } t \geq 0, \quad (2)$$

иначе найдется неотрицательная функция входа, при которой хотя бы в одной точке функция выхода будет отрицательной (иногда это называют условием физической реализуемости [8]);

— нормирование. Из условия закона сохранения материи следует, что за бесконечное время суммарный вход равен суммарному выходу:

$$\int_0^\infty v(t)dt = \int_0^\infty w(t)dt. \quad (3)$$

Если интегралы в (3) конечны, то с учетом (1) находим

$$\int_0^\infty m(t)dt = 1. \quad (4)$$

2. Теоретико-вероятностная функция плотности. Теперь обратим внимание на свойства (2) и (4). Фактически $m(t)$ является функцией плотности некоторой неотрицательной случайной величины. Семейство всех таких функций образует выпуклое множество [22], вершинами которого являются все дельта-функции вида $\delta(t-\tau)$ с неотрицательным параметром $\tau > 0$. Разумеется, набор всех вершин образует своеобразный базис, поскольку здесь любая точка оказывается выпуклой комбинацией вершин. Грубо говоря, для каждой функции веса имеет место свое представление [5]:

$$m(t) = \lambda_1\delta(t-\tau_1) + \ldots + \lambda_n\delta(t-\tau_n) \quad (5)$$

для некоторых неотрицательных наборов $\{\tau_i\}$ и $\{\lambda_i\}$. При этом $\lambda_1 + \ldots + \lambda_n = 1$.

Из соотношения (5) получаем удобное упрощение формулы (1):

$$w(t) = \lambda_1 v(t-\tau_1) + \ldots + \lambda_n v(t-\tau_n). \quad (6)$$

Ниже выражение (6) для $w(t)$ будем называть распределенным речным стоком. Во многих прикладных разделах математики данное соотношение называют скользящим средним [3].

Отметим, что в простом соотношении (6) скрыты нетривиальные результаты функционального анализа. Однако, чтобы получить соотношение (6), можно аппроксимировать (1) через формулу Дюамеля. Но тогда возникают вопросы об “относительности” $\{\tau_i\}$ и $\{\lambda_i\}$, т. е. возможной зависимости параметров от входной функции $v(t)$. Напротив, наш подход гарантирует абсолютные значения этих констант независимо от входной функции $v(t)$ и поэтому предпочтителен.

Так как функцию веса можно трактовать как плотность некоторой случайной величины, то далее в рамках методов теории вероятностей ключевое соотношение (1) можно представить в форме

$$w(t) = M(t-T),$$

где M — символ математического ожидания, T — случайная величина с функцией плотности $m(t)$. В частности, формула (6) вкладывается в эту схему при выборе следующей случайной величины: $T = \tau_i$ с вероятностью τ_i для каждого $i = 1, ..., n$. Отметим, что здесь основные теоретико-вероятностные характеристики T задаются следующими соотношениями:

— математическое ожидание:

$$\mu = \lambda_1\tau_1 + ... + \lambda_n\tau_n;$$

— дисперсия:

$$\sigma^2 = \lambda_1(\tau_1 - \mu)^2 + ... + \lambda_n(\tau_n - \mu)^2.$$

Разумеется, когда при каждом v все компоненты $\lambda_i(v)$ и $\tau_i(v)$ определены, то заданы и функции $\mu(v)$ и $\sigma(v)$.

Для некоторых рек такая информация во многом уже имеется. Так, в работе [18] для р. Дон приведены параметры расщепления русла на четыре основных рукава в зависимости от объема речного стока (станица Раздорская). Позднее эти результаты были дополнены в статье [23], в которой указаны векторы параметров расщепления и времени добегания при средней (50—75%) обеспеченности объема донского стока.

Представляет интерес вопрос о функциональной роли этих теоретико-вероятностных характеристик в гидрологии дельты. Ниже будет показано, что дисперсия пучка рукавов оказывает стабилизирующее воздействие на солевой режим замыкающего водоема.

3. Гидрологические “атомы”. Приведем геометрическую интерпретацию формулы (6). А именно, в ней отражена простейшая гидрологическая ситуация (рис. 1), когда входящий поток в вершину затем расщепляется на n рукавов, а время движения по i-му рукаву составляет τ_i. Такую конструкцию можно назвать “гидрологический атом”. Формально ее можно описать матрицей $A = \begin{pmatrix} \lambda_1, ..., \lambda_n \\ \tau_1, ..., \tau_n \end{pmatrix}$. Далее на семействе таких атомов можно ввести операции “склеивания” и получать сколь угодно сложные “молекулы”.

Так, положим

$$A_{12} = \begin{pmatrix} \lambda_1, \lambda_2 \\ \tau_1, \tau_2 \end{pmatrix}, \quad B_{34} = \begin{pmatrix} \mu_1, \mu_2 \\ \theta_1, \theta_2 \end{pmatrix},$$

при этом считаем, что атом A предшествует B. В этом случае выходящий поток 1 из вершины A вливается в вершину B и возникает молекула с последовательным соединением атомов

$$C = A \oplus B = \begin{pmatrix} \lambda_1\mu_1, \lambda_1\mu_2, \lambda_2 \\ \tau_1 + \theta_1, \tau_1 + \theta_2, \tau_2 \end{pmatrix},$$

но уже с тремя выходными потоками.

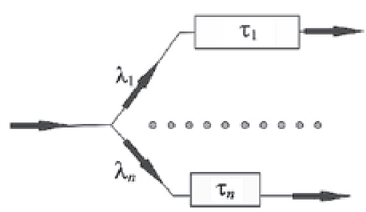


Рис. 1. Гидрологический “атом”: расщепление потока с запаздываниями.

А если к каждому выходу A прикрепить один и тот же атом B, то получаем молекулу с параллельным соединением и четырьмя выходами

$$C = A \otimes B = \begin{pmatrix} \lambda_1\mu_1, \ \lambda_1\mu_2, \ \lambda_2\mu_1, \ \lambda_2\mu_2 \\ \tau_1 + \theta_1, \ \tau_1 + \theta_2, \tau_2 + \theta_1, \ \tau_2 + \theta_2 \end{pmatrix}.$$

Примечательно, что результатом таких операций оказываются все те же структуры атомов. Поэтому с функциональной точки зрения удобно и универсально представлять структуру дельты (= сложной гидрологической молекулы) в виде простого атома (рис. 1). Данный подход применим ко всем процессам, допускающим адекватное линейное описание. Так, например, процессы распада органических веществ до минеральных форм, как пучка обратных связей с запаздыванием, укладываются в эту схему [12]. И она подтверждает известную биологическую гипотезу [16]: органическое вещество неоднородно и состоит из ряда фракций (путей) с различной скоростью образования минеральных форм. При этом оказалось, что при достаточно большой дисперсии пучка путей происходит стабилизация динамики фитоценоза [12].

4. Исторический очерк гидросистемы р. Дон → Таганрогский залив. Пойма Нижнего Дона на основе морфологии разделяется на собственно речную (верхнюю) и дельтовую (нижнюю). Процесс дельтообразования в настоящее время осуществляется в нижней зоне аккумуляции — субаквальной части речной дельты, приуроченной к авандельтовым участкам устьевой области реки. Граница между ними проходит примерно по линии устье р. Сал — ст. Раздорская. Вершина нимфейской и одновременно современной дельты — место отделения рукава Мертвый Донец от главного русла Дона [4].

Морской край дельты Дона неоднократно смещался. Палеодельта, очевидно, располагалась на стыке ложбинообразной впадины, которая протянулась на 150 *км* от устья Дона до подводной низменности Панова с глубинами 10—14 *м*. На востоке Таганрогского залива на сейсмопрофилях наблюдаются признаки еще ряда палеодельт. В эпоху климатического оптимума (5,5—4,5 тыс. лет назад (л. н.)) черноморская адвекция “проталкивала” азовские воды вверх по Дону. Такого рода затоки подтверждают формирование дельты Дона в условиях максимума новочерноморской (4—6 тыс. л. н.) и нимфейской (1,5 тыс. л. н.) трансгрессий [10, 14].

Современная дельта Дона — разветвленная сеть протоков, ериков, перекопок и озер, отделяющих друг от друга множество островов. Около двух десятков проток [19] открывается непосредственно в Таганрогский залив, но главным из них является судоходный рукав — Старый Дон.

Основные этапы сооружения плотин, пересыпей, каналов и трансформация речного стока в авандельте Дона в XVIII—XXI вв. рассмотрены в работе [13]. Там же отмечены значительные изменения в распределении стока и расходов воды между рукавами в дельте Дона, как по естественным причинам, так и в результате антропогенного засорения и перекрытия одних рукавов, при дноуглублении других. Так, кардинальное изменение гидрологического режима рукава Старый Дон произошло после завершения строительства Азово-Донского морского канала. Подходной глубоководный канал значительно изменил уровневый режим, увеличил уклон дна, что привело к росту дальности действия стоковых течений на предустьевом взморье.

Значительные изменения в характере эрозионно-аккумулятивных процессов в низовьях Дона произошли в результате строительства водохранилищ и гидроузлов. В связи с изъятием части стока растянулись во времени весенние паводки, уменьшилось влияние волны весеннего половодья. В результате усилился вынос из дельтовой зоны наносов, отложившихся в рукавах в течение года. При этом уменьшался уклон русла рукава Старый Дон и, соответственно, снижалась доля стока через этот рукав [13].

В условиях естественного стока природные факторы обусловили сложную иерархию форм русла Нижнего Дона. В настоящее время под воздействием антропогенных факторов происходит ее упрощение. Кроме того, в результате антропогенного нарушения русловых процессов изменился механизм активных переформирований русла Нижнего Дона. Если в условиях естественного стока он заключался в образовании пойменных проток и в переходах в них (или в староречья) основного потока реки, то современные преобразования осуществляются путем горизонтальных смещений русла [21].

Современный явный спад водных ресурсов в бассейне Дона отражает эпоху маловодья и сказывается на перераспределении стока между рукавами в дельте реки. Наблюдается обмеление и заиление рукавов. А антропогенное углубление основного русла дополнительно забирает и без того немноговодный поток из других рукавов и проток, вызывая значительное упрощение структуры дельты.

Маловодье и зарегулирование речного стока привели к необратимым деформациям в прошлом очень продуктивных и богатых промысловыми рыбами экосистем дельты Дона и Таганрогского залива. Опасными стали частые смещения изогалины 4—5‰ (зоогеографического барьера) из залива в дельту в местах обитания зообентоса и ихтиофауны. Периодически возникающие концентрация и химический состав солей в воде, непривычные для местной флоры и фауны, способствуют угнетению биоты и изменению естественной экосистемы взморья [1]. При падении уровня воды в дельте складывается ситуация, когда протоки Мокрый Кагальник, Сухой Кагальник и Свиное гирло практически целиком заполняются минерализованными водами подземного стока [11]. Регулярное заполнение рукавов и проток дельты Дона слабосоленой и солоноватой водой вызывает тяжелые последствия для рыбного хозяйства, аквакультуры и забора питьевой воды для городов Приазовья. Самые неблагоприятные условия для нерестовых миграций рыб складываются во время частых периодов обмеления водотоков при сгонных ветрах.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Структура модели

Чтобы продемонстрировать чувствительность солености воды Таганрогского залива к деформации дельты Дона, построим простейшую гидрохимическую модель залива. Так, обозначим через $Azov_t$ объем водообмена между заливом и открытым морем в момент времени t. Напомним, что Таганрогский залив отделен от открытого моря косами Долгая и Белосарайская. Если $Azov_t > 0$, то вода перетекает из залива в море, в противном случае поток имеет противоположное направление. Эта величина во многом зависит от элементов водного баланса, ее можно рассчитать по формуле

$$Azov_t = Don_t + Os_t - Isp_t, \quad (7)$$

где Don_t — объем стока р. Дон; Os_t — атмосферные осадки; Isp_t — испарение над Таганрогским заливом.

Далее рассмотрим два одновременно протекающих процесса солеобмена: детерминированный (без учета ветра) и стохастический (учет только ветра). В детерминированном случае задействованы только элементы водного баланса. Кроме того, полагаем, что водообмен стационарный. Избыток воды в заливе компенсируется ее истоком в море, недостаток — притоком из открытого моря. Таким образом, объем (W) залива за единицу времени не изменяется. Поэтому водообмен между заливом и открытым морем задается формулой (7).

Сначала обсудим случай, когда $Azov_t > 0$. Тогда имеет место переток воды из залива в море, и соответственно, возникает отток солей из Таганрогского залива.

Обозначим здесь через δ концентрацию солей в донской воде. Наличие солей в осадках (дождь и снег) нельзя отрицать, но их содержание незначительно. Кроме того, объем атмосферных осадков над акваторией Таганрогского залива примерно в 10 раз меньше донского стока. Поэтому полагаем концентрацию солей в осадках равной 0. Соленость воды в открытом море достаточно стабильна и не изменяется так быстро, как соленость Таганрогского залива, поэтому полагаем ее постоянной во времени и равной β.

Окончательно динамика солености Таганрогского залива (S_t) задается следующим уравнением:

$$S_{t+1} = S_t[1 - Azov_t/W] + \delta Don_t/W. \quad (8)$$

Фактор стохастики включает в себя молекулярную диффузию и ветровое перемешивание. Считаем, что этот процесс подчиняется закону Фика и пропорционален разности солености воды залива и открытого моря с некоторым коэффициентом (k). Он определяется по материалам многолетних наблюдений.

Поэтому окончательно имеем

$$S_{t+1} = S_t[1 - Azov_t/W] + \delta Don_t/W + k(\beta - S_t). \quad (9)$$

Теперь рассмотрим случай $Azov_t < 0$. Здесь возникает поток из моря в залив и детерминированная составляющая имеет вид

$$S_{t+1} = \frac{S_t W + \delta Don_t + \beta_t(-Azov_t)}{W}.$$

С учетом стохастики окончательно получаем:

$$S_{t+1} = S_t + \delta\frac{Don_t}{W} - \beta\frac{Azov_t}{W} + k(\beta - S_t). \quad (10)$$

Вероятно, этот простой подход достаточен для описания гидрологии вытянутых водоемов, разделенных перешейками. Он гораздо проще, чем более тонкая камерная модель, использованная при моделировании Цимлянского водохранилища [6].

3.2. Результаты расчетов

На рис. 2 приведены сравнительные модельные прогнозы динамики донского стока и солености в Таганрогском заливе при выборе разных структур дельты: для нераспределенного стока с параметрами $\tau_1 = 7$ и $\lambda_1 = 1$ (здесь $\sigma = 0$) и распределенного стока с параметрами $n = 2$ и $\tau_1 = 1$, $\tau_2 = 13$, $\lambda_1 = \lambda_2 = 1/2$, здесь $\sigma = 6$.

Расчеты проводились на 100 лет. Разумеется, в данном асимптотическом режиме финальные значения не зависели от выбора начального состояния солености в Таганрогском заливе. В качестве входной информации были использованы среднемноголетние данные о стоке Дона (помесячно), испарении и осадках (по сезонам), взятые из литературных источников [2]. Для всех из них осуществлялась интерполяция с пятисуточным шагом. Были выбраны следующие значения модельных констант: $\delta = 0{,}38$; $\beta = 12{,}15$; $W = 24$; $\kappa = 0{,}045$.

Как видно на рис. 2, при большей дисперсии уменьшается амплитуда динамики стока и солености.

В настоящее время количественные характеристики дельты Дона (пропускная способность рукавов и время добегания) требуют дополнительных гидрологических наблюдений, поэтому ниже будут использованы несколько искусственные данные. Для большей выразительности размер дельты немного завышен.

В первом эксперименте рассматривается речная дельта, состоящая из двух рукавов с фиксированными параметрами времени добегания $\tau_1 = 18$ и $\tau_2 = 54$. Пропускную способность рукавов будем варьировать: λ_1 от 0 до 1 с шагом 0,1 (при этом $\lambda_2 = 1 - \lambda_1$). Разумеется, параметр $\mu = \lambda_1\tau_1 + \lambda_2\tau_2$ линейно и монотонно уменьшается от 54 до 18, а параметр σ вогнутым образом изменяется от 0 до 18.

Пусть заданы некоторые параметры λ_1, λ_2. Теперь проведем модельные расчеты на многолетнюю перспективу (100 лет) с ежегодным повторением режима элементов водного баланса. В течение этого достаточно большого промежутка времени в Таганрогском заливе устанавливается однозначный

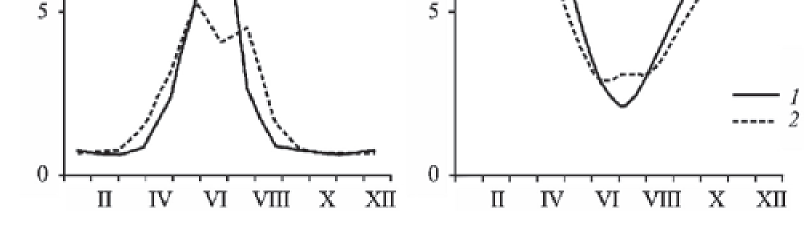


Рис. 2. Асимптотики: *а*) годовая динамика стока р. Дон; *б*) динамика солености в Таганрогском заливе.

1 — нераспределенный сток; *2* — распределенный сток.

Параметры речной дельты и соленость в Таганрогском заливе

λ_1	λ_2	μ	σ	S_{min}	S_{mdl}	S_{max}
0,0	1,0	54,0	0,0	2,0	6,3	9,3
0,1	0,9	50,4	10,8	2,1	5,8	8,2
0,2	0,8	46,8	14,4	2,3	5,5	7,5
0,3	0,7	43,2	16,5	2,6	5,3	7,1
0,4	0,6	39,6	17,6	2,9	5,1	6,7
0,5	0,5	36,0	18,0	3,2	5,0	6,5
0,6	0,4	39,4	17,6	3,4	5,0	6,4
0,7	0,3	28,8	16,5	3,0	5,1	6,3
0,8	0,2	25,2	14,4	2,7	5,2	6,5
0,9	0,1	21,6	10,8	2,4	5,4	6,9
1,0	0,0	18,0	0,0	2,2	5,7	7,5

Примечание. Описание параметров приведено в тексте.

режим динамики солености с периодом 1 год, так называемый асимптотический режим. Обозначим через S_{min}, S_{mdl}, S_{max} соответственно минимальное, среднее и максимальное значения солености в асимптотическом режиме. Полученные результаты приведены в таблице. Видно, что при изменении пропускной способности λ_1 от 0 до 0,5 дисперсия возрастает и попутно увеличивается S_{min}. Напротив, уменьшаются S_{max} и среднее значение солености S_{mdl}. Фактически коридор вариации солености $[S_{min}, S_{max}]$ сужается более чем в 2 раза.

При дальнейшем изменении пропускной способности дисперсия падает, и тогда, напротив, наблюдаем рост диапазона вариации солености. Очевидно, параметр μ не оказывает никакого влияния на стабилизацию. Этот эксперимент подтверждает стабилизирующую роль разнообразия дельты Дона на изменение солености в Таганрогском заливе.

Обсудим второй эксперимент, в котором усложняется структура речной дельты путем последовательного добавления новых (промежуточных) рукавов.

Сначала дельта представлена однорукавной рекой, а сток задается формулой (1) с параметром $\tau = 36$. Затем от основного русла происходит ответвление как слева, так и справа двух пучков рукавов, каждый из которых содержит триаду каналов. Теперь в дельте действуют семь потоков со следующими параметрами: $\tau_1 = 33$, $\tau_2 = 34$, $\tau_3 = 35$, $\tau_4 = 36$, $\tau_5 = 37$, $\tau_6 = 38$, $\tau_7 = 39$.

Далее на каждом новом этапе происходит появление (слева и справа) двух новых триад рукавов с все более удаленными параметрами времени добегания от среднего значения 36. На последнем этапе возникают 67 каналов, в соседних каналах время добегания отличается на 1.

Если на каком-то этапе речная дельта состоит из n рукавов, то их пропускные способности считаем одинаковыми: $\lambda_i = 1/n$ для всех $i = 1, ..., n$. Здесь параметр μ не изменяется и равен 36, зато σ растет от 0 до 19,3.

На рис. 3 приведен график зависимости характеристик солености от дисперсии. Здесь начальный коридор солености составляет 2,1—9,7, а финальный диапазон оказался значительно уже: 4,3—5,5.

Отметим, что вариация солености может опосредованно вызывать изменение и других химических компонентов экосистемы, например, азота и фосфора. Так, в работе [7] обнаружен следующий экологический механизм в Азовском море: уменьшение солености → видовая перестройка водорослей → деформация потребления азота и фосфора → дисбаланс биогенных веществ.

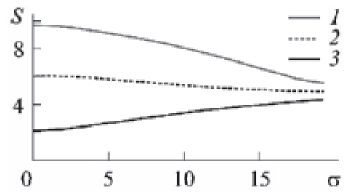


Рис. 3. Зависимость солености в Таганрогском заливе от дисперсии дельты Дона: *1* — S_{max}; *2* — S_{mdl}, *3* — S_{min}.

4. Заключение

На основании теоретико-вероятностных аналогий предложена количественная характеристика разнообразия речной дельты — дисперсия. Впервые показано, что увеличение дисперсии дельты Дона уменьшает внутригодовую амплитуду колебаний солености в Таганрогском заливе (как в замыкающем водоеме). Такая ситуация благоприятна для гидробионтов, поскольку не требует от них значимых энергетических затрат на адаптацию, и способствует высокой продуктивности данного водоема.

При этом антропогенные факторы (такие как водозабор на нужды орошения, дноуглубление основного русла с оттяжкой вод из малых рукавов, проблема отмирания малых рек и др.) зачастую сокращают полноценное функционирование дельты Дона. Ситуация осложняется современным маловодным периодом. Происходит заиление и отмирание проток и рукавов, следовательно, наблюдается уменьшение дисперсии речного стока, возникает негативная дестабилизация солености Таганрогского залива.

Представленный в статье подход, весьма вероятно, может быть использован при анализе функционирования других дельт в системе "река — море", например, при исследовании динамики солености северной части Каспийского моря в зависимости от разнообразия дельты Волги.

Авторы выражают признательность рецензентам за полезные замечания.

Публикация подготовлена в рамках реализации государственных заданий Южного научного центра Российской академии наук № АААА-А18-118122790121-5 и № 01201363188.

Литература

1. Бергер В. Я. Адаптации морских моллюсков к изменениям солености среды. — Л., Наука, 1986, 218 с.

2. Бронфман А. М., Дубинина В. Г., Макарова Г. Д. Гидробиологические и гидрохимические основы продуктивности Азовского моря. — М., Пищевая промышленность, 1979, 288 с.

3. Грешилов А. А., Стакун В. А., Стакун А. А. Математические методы построения прогнозов. — М., Радио и связь, 1997, 112 с.

4. Иванов В. В., Коротаев В. Н., Римский-Корсаков Н. А., Пронин А. А., Чернов А. В. Строение поймы и динамика русла Нижнего Дона. — Вестник Московского университета. Серия 5: География, 2013, № 5, с. 60—66.

5. Ильичев В. Г. Выпуклые структуры в моделях экологии. — Математическое моделирование, 2007, т. 19, № 4, с. 90—102.

6. Ильичев В. Г., Богучарсков В. Т., Бердников С. В., Авраменко Л. Г. О преобразованиях в экологической системе Цимлянского водохранилища в случае потепления. — Метеорология и гидрология, 1993, № 12, с. 63—71.

7. Ильичев В. Г., Дашкевич Л. В. Гидрохимический режим Азовского моря: компьютерные эксперименты. — Природа, 2015, № 12, с. 19—22.

8. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. — М., Мир, 1971, 400 с.

9. Клещенков А. В., Сорокина В. В., Чикин А. Л., Чикина Л. Г. Моделирование процесса поступления стока речных наносов Дона в Таганрогский залив Азовского моря. — Математическое моделирование, 2020, т. 32, № 3, с. 47—62.

10. Матишов Г. Г. Сейсмопрофилирование и картирование новейших отложений дна Азовского моря. — Вестник ЮНЦ РАН, 2007, т. 3, № 3, с. 32—40.

11. Матишов Г. Г., Григоренко К. С. Маловодье и роль грунтовых вод в осолонении авандельты Дона. — Доклады АН, 2018, т. 483, № 4, с. 442—446.

12. Матишов Г. Г., Ильичев В. Г. Концепция времени пребывания в проблемах экологии. — Доклады АН, 2013, т. 448, № 4, с. 468—470.

13. Матишов Г. Г., Московец А. Ю., Инжебейкин Ю. И., Ильичев В. Г., Кириллова Е. Э. Этапы сооружения плотин, пересыпей, каналов и трансформация речного стока в авандельте Дона (XVIII—XXI вв.). — Наука юга России, 2019, т. 15, № 4, с. 46—54; doi: 10.7868/S25001640190406.

14. Матишов Г. Г., Польшин В. В. Новые результаты по истории Азовского моря в голоцене. — Доклады АН, 2019, т. 489, № 2, с. 190—194; https://doi.org/10.31857/S0869-56524892190-194.

15. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. — М., Наука, 1981, 488 с.

16. Остапеня А. П. Детрит и его роль в водных экосистемах. — Гидробиологический журнал, 1975, т. 11, № 1, с. 120—121.

17. Панов Д. Г. Общая геоморфология. — М., Высшая школа, 1966, 428 с.

18. Полонский В. Ф., Мишин Д. В., Беляев А. Г. Оценка современного состояния распределения стока и наносов в основных рукавах дельты реки Дон. — Труды ГОИН, 2001, вып. 213, с. 313—326.

19. Природные условия и естественные ресурсы Ростовской области. — Ростов-на-Дону, 2002, 432 с.

20. Ройтенберг Я. Н. Автоматическое управление. — М., Наука, 1971, 395 с.

21. Тимофеева В. В. Русловые процессы Нижнего Дона и их антропогенные изменения. /Автореферат диссертации на соискание степени кандидата географ. наук (25.00.25). — М., МГУ, 2007, 27 с.

22. Фелпс Р. Лекции о теоремах Шоке. — М., Мир, 1968, 112 с.

23. Шевердяев И. В., Бердников С. В., Клещенков А. В. Применение программного комплекса HEC-RAS для моделирования гидрологического режима дельты Дона. — Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем, 2017, т. 1, № 2, с. 113—122.

Поступила в редакцию 28 VIII 2020 г., после доработки 9 IV 2021 г., принята к публикации 4 VI 2021 г.

STRUCTURE OF THE RIVER DELTA AND SALINITY OF THE CLOSING RESERVOIR

G. G. Matishov, V. G. Il'ichev, and L. V. Dashkevich

On the basis of theoretical-probabilistic analogies, a quantitative characteristic of diversity of the river delta, the variance, is proposed. The series of computer experiments with a hydrological model demonstrates that an increase in the variance of the delta structure reduces the intraannual amplitude of fluctuations in salinity of the closing reservoir. The simulations for the Don River and Taganrog Bay (the Sea of Azov) used as the closing reservoir show that modern climatic change and anthropogenic factors reduce the proper functioning of the River Don arms. Therefore, it is likely that there will be a decrease in the variance of river runoff and, hence, the destabilization and increase in the variability of salinity in the closing reservoir.

УДК 551.465, 551.506, 574.52
DOI: 10.7868/S25000640210204

НОВЫЕ ДАННЫЕ О РОЛИ ПОДЗЕМНЫХ И ЧЕРНОМОРСКИХ ВОД В АЗОВО-ДОНСКОМ БАССЕЙНЕ В ПЕРИОД МАЛОВОДЬЯ [1]

© 2021 г. Академик Г.Г. Матишов[1, 2], К.С. Григоренко[1], Н.И. Булышева[1], А.Ю. Московец[1]

Аннотация. Существенно расширена база наблюдений и выводы относительно режимов проникновения минерализованных вод в дельту Дона.

Пробы воды для гидрохимических анализов были взяты в период с 20.11.2020 г. по 8.03.2021 г. при максимальных сгонах и нагонах, в отдельных случаях отбор проб в реке производили послойно. Отобрана вода из магистрального водопровода Азова. Целенаправленный отбор проб предполагал выяснение природы грунтовых, речных и морских вод в дельте Дона, их сочетания при сгонно-нагонном режиме. Фиксация материала производилась при обычных условиях, при экстремальных колебаниях уровня моря, при резком возрастании доли подземных вод подо льдом, на обмелевшем взморье, в протоках при сгонах.

В ряде рукавов дельты в осенне-зимний период в условиях восточных ветров продолжительностью до 2–4 недель и скоростью более 6–10 м/с прекращается водообмен с Азовским морем и судоходным каналом р. Дон. После прекращения сообщения с рекой и морем протоки заполняются подземными водами. Построена модель эволюции типов стратификации солености морских и подземных вод в Свином гирле (дельта Дона) при чередовании сгонов и нагонов. Объяснены причины маловодья, при котором недостающие объемы компенсируются переносом вод из Черного моря, которые в трансформированном виде периодически заполняют дельту Дона и попадают в водозаборные системы Азова.

На Нижнем Дону и в Приазовье возник значительный дефицит пресной воды, в том числе питьевой, в крупных городах. Многие малые реки Приазовья в теплый период полностью прекращают сток. В условиях очевидной засухи всем отраслям сельхозпроизводства приходится соизмерять потребность в воде с имеющимися водными ресурсами.

Ключевые слова: дельта Дона, маловодье, изменения климата, ионный состав вод, сгонно-нагонные явления, подземный сток.

NEW DATA ABOUT THE FUNCTION OF UNDERGROUND AND BLACK SEA WATERS IN THE AZOV-DON BASIN DURING THE LACK OF WATER PERIOD

Academician RAS G.G. Matishov[1, 2], K.S. Grigorenko[1], N.I. Bulysheva[1], A.Yu. Moskovets[1]

Abstract. The base of observations and conclusions regarding the modes of penetration of saline waters into the Don River delta have been significantly expanded. Water samples for hydrochemical analyses were taken from 20 November 2020 to 8 March 2021 at maximum positive and negative water surges. In some cases, samples in the river were collected in layers. Water was taken from the main water pipeline in the city of Azov. Purposeful sampling involved elucidation of the nature of ground, river and sea waters, their combination under surge conditions. The fixation of the material was carried out under normal conditions, extreme fluctuations in sea level, with a sharp increase of groundwater percent under ice, on a shallow seashore, in canals during negative surge. It was shown that in some delta branches, in the autumn-winter period, under conditions of

[1] Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: matishov_ssc-ras@ssc-ras.ru

[2] Мурманский морской биологический институт Российской академии наук (Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17

[1] **Оригинальный текст:** *Матишов Г.Г., Григоренко К.С., Булышева Н.И., Московец А.Ю.* Новые данные о роли подземных и черноморских вод в Азово-Донском бассейне в период маловодья // Наука Юга России. 2021. Т. 17. № 2. С. 34–48.

eastern winds, lasting up to 2–4 weeks and at a speed of more than 6–10 m/sec, water exchange with the Sea of Azov and the navigable canal of the Don River is stopped. After the cessation of water connection, the channels are filled with groundwater. The evolution pattern of the types of stratification of sea and ground waters salinity in the Svinoe Arm of the Don River delta is constructed with alternating positive and negative surges. The reasons for the lack of water are explained, in which the missing volumes are compensated by the transfer of water from the Black Sea, which, in a transformed form, occasionally fill the Don River delta and enter the water intake systems of the city of Azov. In the Lower Don and Azov regions, there is a significant shortage of fresh water, including drinking water, in large cities. Many small rivers of the Azov region completely stop flowing during the warm period. In the face of obvious drought, all branches of agricultural production have to commensurate the need for water with the available water resources.

Keywords: Don River delta, lack of water, climate change, ion composition, tide-surge phenomena, underflow.

Маловодье – природный процесс, обусловленный внутривековой цикличностью климата – типичное для сухих степей явление. На рубеже XX и XXI веков снова начали преобладать годы с дефицитом влаги и засухой. Происходит опустынивание, сокращение запасов воды в бассейне р. Дон и осолонение Азовского моря. Маловодье и зарегулирование речного стока привело к необратимой трансформации естественных процессов, иссушению почвы, уменьшению количества мелких водоемов и водотоков.

Современное маловодье не единственное в гидрологической истории бассейна Дона (рис. 1) [1; 2]. Для Приазовья и Нижнего Дона типичными являются кратковременные (2–3 года и 7 лет) и внутривековые (1933–1944, 2008–2020 гг.) маловодные периоды. В период самых влажных лет прошлого столетия, в частности 1941–1942 гг., максимальные расходы воды в Дону в районе ст. Раздорской достигали 7–9 тыс. м^3/с [3], а сток Дона составлял 52 км^3. В период пуска Цимлянской ГЭС в 1952 г. средние минимальные расходы воды были 335 м^3/с, а максимальные – 1200 м^3/с. Минимально гарантированный судоходный попуск – 340 м^3/с.

После зарегулирования Дона Цимлянской плотиной годовой сток воды объемом в 30 км^3 являлся оптимальным для азовоморской экосистемы. Однако при наступившем после 2007 г. маловодье речной сток сократился примерно в 3 раза (до 11–16 км^3). Минимальные расходы воды (280 м^3/с в створе гидропоста «Раздорская», 18.11.2020 г.) стали нормой в течение года. Такое уменьшение стока стало замещаться затоком в Таганрогский залив из Черного моря вод соленостью 17 ‰ и объемами порядка 20 км^3 [4].

До критической отметки обмелели Цимлянское и Краснодарское водохранилища. С момента их запуска 70 и 60 лет назад подобных ситуаций не возникало. Стала характерной низкая водность и почти полное прекращение стока Миуса, Еи, Кагальника, Чумбурки и других малых рек. В 2018 г. на р. Миус с 9 по 31 августа расходы воды снизились до значений 0,6–1 м^3/с (табл. 1). В 2020 г. уровень воды опускался на 1,5 м ниже средней позиции. Сельскохозяйственные культуры в степной зоне стали подвергаться воздушной засухе, что снижает урожайность. За 50 лет маловодья произошло заметное заиление Таганрогского залива и дельты Дона. Несмотря на дноуглубление, заиление Азово-Донского судоходного канала необратимо. При восточных ветрах (более 6–8 м/с) малые глубины на фарватере препятствуют движению морских судов в течение 2–3 недель.

Во время сгонно-нагонных процесссов речные и морские воды при сходной величине солености имеют принципиально отличный химический состав [5]. В некоторых изолированных от судоходного канала протоках авандельты стали доминировать подземные воды. Однако до последних лет объем данных гидрохимического анализа был ограничен. Зачастую пробы воды были отобраны не по сезо-

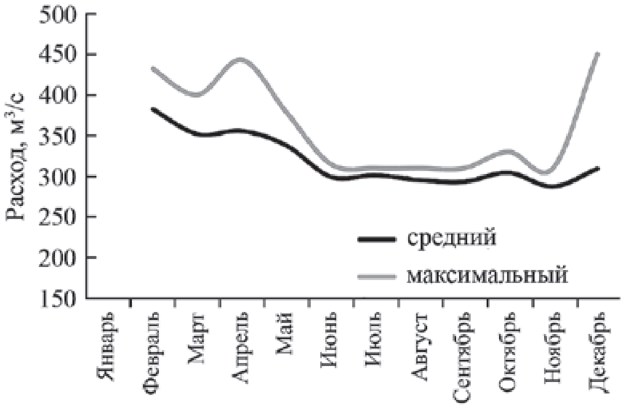


Рис. 1. Водность р. Дон в 2020 г. по данным работы [2].
Fig. 1. Water content of the Don River in 2020 according to [2].

Таблица 1. Среднемесячные, максимальные и минимальные расходы воды в р. Миус в 2018 г.
Table 1. Average monthly, maximum and minimum water discharges in the Mius River in 2018

Месяц Month	Расход воды, м³/с Water discharge, m³/s		
	Средний Average	Максимальный Maximum	Минимальный Minimum
Январь / January	4,17	9,36	3,16
Февраль / February	8,55	13,7	3,57
Март / March	21,4	40,3	9,79
Апрель / April	23,6	35,5	15
Май / May	9,95	15,6	6,17
Июнь / June	2,95	6,27	1,05
Июль / July	2,18	2,52	1,52
Август / August	0,88	1,52	0,6
Сентябрь / September	1,19	1,54	0,61
Октябрь / October	1,95	2,6	1,54
Ноябрь / November	2,33	3,26	2,11
Декабрь / December	2,77	3,55	1,63

нам и не привязывались к экстремальным стадиям сгонов и нагонов. Наши наблюдения произведены с учетом записей солености автоматическими гидрометеопостами. Специально была поставлена задача увеличить количество проб воды разной природы при максимальных верховках и низовках (ветер более 10–15 м/с).

В условиях нарастающей трансформации естественной термохалинной структуры водных масс в низовьях Дона и Таганрогском заливе ставилась задача изучить обстоятельства, при которых в одних случаях доминируют местные подземные воды со своим набором химических элементов, в других – черноморские воды. Целью исследования было выполнить предварительную типизацию вод по химическому составу, определить переходные режимы минерализации вод в протоках дельты.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В основу работы положены целенаправленные исследования воды при разных режимах и уровнях в Нижнем Дону и на взморье Таганрогского залива. Эксперимент охватывал период с 20.11.2020 г. по 8.03.2021 г. Для гидрохимических анализов отобрана вода при максимальных сгонах и нагонах. В отдельных случаях отбор проб в реке производили послойно. Взята также вода из магистрального водопровода Азова. В работе учтены анализы проб, собранных специалистами Южного научного центра Российской академии наук (ЮНЦ РАН) ранее, в 2018–2020 гг. [1; 5]. В 2020 г. на гидрометеопосту ЮНЦ РАН «Донской» (х. Донской, Азовский район Ростовской области) сотрудниками ЮНЦ РАН начались измерения солености непосредственно в русле Дона, гидрологический режим которого в меньшей степени зависит от подземного стока.

Целенаправленный отбор проб предполагал выяснение природы грунтовых, речных и морских вод, их сочетания при сгонно-нагонном режиме. Фиксацию материала производили при обычных условиях, при экстремальных колебаниях уровня моря, при резком возрастании доли подземных вод подо льдом, на обмелевшем взморье, в протоках при сгонах. На гидрометеопостах в с. Кагальник (Азовский район Ростовской области), х. Донской и др. получены термохалинные характеристики вод в режиме реального времени (рис. 2, 3).

Набор регистраторов среды включает измеритель течений AANDERAA RCM 9 LW, океанографические зонды (SBE-19, SBE-19 + V2, CTD-90) и датчики электропроводности СОЛИС СЛ15-10Т. Дискретность измерений датчиков составляет 10 минут. За восемь лет в базе данных накоплено более 280 тыс. измерений.

Соленость рассчитана с помощью шкалы практической солености PSS-78 [6]. Во время двух-трехнедельных восточных ветров, когда взморье осушается на многие километры от берега, а обмелевшая авандельта сливается с плавнями вдоль островов, с квадрокоптеров DJI Phantom 3 Pro производилась детальная аэрофотосъемка и ландшафтные исследования прибрежной зоны и акватории.

Собраны данные по ежемесячным расходам воды в створе гидрологического поста «Раздорская» с 1884 по 2020 г. Материалы опубликованы в гидрологических ежегодниках Росгидромета и других источниках [2; 7; 8].

В сборе материала и аналитических работах участвовали И.А. Мельников и Е.Г. Алешина, к.ф.-м.н. Г.В. Валов, к.г.н. А.В. Клещенков.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Водосборный бассейн Дона и малых рек Приазовья формируется в условиях аридного климата на территории сухих степей и отчасти умеренной зоны [9–11]. В обследованной части дельты Дона и прилегающей приазовской степи [4; 5] встречаются воды со следующей минерализацией: пресные, речные (0,4–2 г/л), слабосолоноватые (2–4 г/л), солоноватые (4–8 г/л) и высокосолоноватые (более 8 г/л). Кроме различий в общем количестве солей (г/л, или промилле) изученные воды отличаются разнообразием типов по химическому составу [12].

Гидрохимические показатели, в частности ионный состав воды, в протоках дельты Дона представлены следующим образом: речная вода при общей минерализации от 0,5–1 до 2 г/л содержит SO_4^{2-} от 100–300 до 615 мг/л, а $Na^+ + K^+$ – от 180 до 260–470 мг/л (табл. 2). Подземная (грунтовая) вода при общей минерализации от 2,8 до 6 г/л включает SO_4^{2-} порядка 1–2 г/л и $Na^+ + K^+$ на уровне 0,5–3,3 г/л.

Экспедиционные наблюдения в октябре 2020 г. показали, что общая минерализация вод в р. Северский Донец составила 1,25–1,35 г/л, в устье р. Маныч – 1,96 г/л, в устье р. Сал – 2,27 г/л, в р. Аксай – 1,19 г/л. Содержание ионов Cl^- в пробах достигло 0,17–0,37 г/л и $Na^+ + K^+$ – 0,24–0,45 г/л. На долю этих притоков приходится 30–35 % суммарного стока р. Дон. Минерализация Дона увеличивается с 0,61 г/л выше впадения р. Северский Донец до 0,85–0,92 г/л ниже впадения р. Маныч, то есть в 1,3–1,5 раза. Содержание ионов Cl^- увеличивается в 1,6 раза, ионов $Na^+ + K^+$ – в 1,8 раза.

Черноморская вода в условиях экстремальных низовок на взморье имеет общую минерализацию от 3 до 6–8 ‰ и более. Основные ионы содержат Cl^- на уровне от 1–1,6 до 3–4 г/л и $Na^+ + K^+$ – от 0,7–1 до 2,5 г/л. В общих чертах по количественному содержанию ионы морской воды располагаются в следующем порядке: $Cl^- > SO^{2-} > HCO_3^- + CO_3^{2-}$; $Na^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$, – а в речной карбонатной воде порядок противоположный.

Тип №II

Дата	Соленость поверхности	t пов	Соленость дна	t дна
2020-11-16 00:00:00	1,781	2,8	8,139	3,3
2020-11-16 00:10:00	1,748	2,8	8,014	3,4
2020-11-16 00:20:00	1,748	2,8	7,999	3,4
2020-11-16 00:30:00	1,795	2,8	8,041	3,4
2020-11-16 00:40:00	1,795	2,8	8,019	3,3
2020-11-16 00:50:00	1,804	2,8	7,982	3,4
2020-11-16 01:00:00	1,811	2,7	7,872	3,4
2020-11-16 01:10:00	1,812	2,7	7,898	3,3
2020-11-16 01:20:00	1,853	2,7	7,823	3,4
2020-11-16 01:30:00	1,837	2,7	7,79[illegible]	3,4
2020-11-16 01:40:00	1,745	2,8	7,771	3,3
2020-11-16 01:50:00	1,673	2,8	7,785	3,4
2020-11-16 02:00:00	1,611	2,9	7,675	3,4
2020-11-16 02:10:00	1,601	2,9	[illegible]	3,4
2020-11-16 02:20:00	1,545	3	7,615	3,4
2020-11-16 02:30:00	1,593	3	7,658	3,3
2020-11-16 02:40:00	1,593	3	7,475	3,4
2020-11-16 02:50:00	1,593	3	7,471	3,4
2020-11-16 03:00:00	1,584	3	7,512	3,4
2020-11-16 03:10:00	1,481	3,1	7,501	3,4
2020-11-16 03:20:00	1,509	3,2	7,402	3,4
2020-11-16 03:30:00	1,426	3,3	7,350	3,4
2020-11-16 03:40:00	1,404	3,3	7,332	3,4
2020-11-16 03:50:00	1,445	3,4	7,341	3,5
2020-11-16 04:00:00	1,442	3,4	7,261	3,5
2020-11-16 04:10:00	1,354	3,5	7,274	3,5
2020-11-16 04:20:00	1,342	3,5	7,267	3,5
2020-11-16 04:30:00	1,354	3,5	7,174	3,5
2020-11-16 04:40:00	1,331	3,6	7,098	3,6
2020-11-16 04:50:00	1,331	3,6	7,163	3,7
2020-11-16 05:00:00	1,378	3,7	7,109	3,7
2020-11-16 05:10:00	1,369	3,7	6,983	3,8
2020-11-16 05:20:00	1,373	3,6	7,017	3,8
2020-11-16 05:30:00	1,278	3,8	6,923	3,9
2020-11-16 05:40:00	1,303	4	6,928	3,9
2020-11-16 05:50:00	1,282	4,1	6,926	3,9
2020-11-16 06:00:00	1,303	4	6,875	3,9
2020-11-16 06:10:00	1,307	3,9	6,777	3,9

Тип №I

Дата	Соленость поверхности		Соленость дна	t дна	Уровень воды, мБС
2020-11-24 01:40:00	1,324	1	5,043	1,3	0,005
2020-11-24 01:50:00	1,271	1,1	4,978	1,3	-0,002
2020-11-24 02:00:00	1,241	1,1	4,981	1,3	-0,004
2020-11-24 02:10:00	1,285	1,1	4,997	1,3	-0,029
2020-11-24 02:20:00	1,194	1,1	5,008	1,3	-0,014
2020-11-24 02:30:00	1,184	1,1	5,008	1,3	-0,015
2020-11-24 02:40:00	1,126	1,1	5,086	1,3	-0,030
2020-11-24 02:50:00	1,141	1,1	5,105	[illegible]	-0,029
2020-11-24 03:00:00	1,143	1,1	[illegible]	1,3	-0,041
2020-11-24 03:10:00	1,146	1,1	[illegible]	1,3	-0,047
2020-11-24 03:20:00	1,138	1,1	5,046	1,3	-0,041
2020-11-24 03:30:00	1,226	1,1	[illegible]	1,3	-0,067
2020-11-24 03:40:00	1,219	[illegible]	5,072	1,3	-0,053
2020-11-24 03:50:00	1,144	1,1	5,072	1,3	-0,056
2020-11-24 04:00:00	1,215	1,2	5,076	1,3	-0,065
2020-11-24 04:10:00	1,213	1,2	5,142	1,4	-0,065
2020-11-24 04:20:00	1,213	1,2	5,158	1,4	-0,065
2020-11-24 04:30:00	1,132	1,2	5,111	1,4	-0,056
2020-11-24 04:40:00	1,132	1,2	5,119	1,4	-0,089
2020-11-24 04:50:00	1,131	1,2	5,119	1,4	-0,076
2020-11-24 05:00:00	1,122	1,2	5,127	1,4	-0,106
2020-11-24 05:10:00	1,167	1,2	5,215	1,4	-0,111
2020-11-24 05:20:00	1,167	1,2	5,221	1,4	-0,121
2020-11-24 05:30:00	1,167	1,2	5,223	1,4	-0,145
2020-11-24 05:40:00	1,167	1,2	5,227	1,4	-0,134
2020-11-24 05:50:00	1,167	1,2	5,178	1,4	-0,137
2020-11-24 06:00:00	1,167	1,2	5,194	1,4	-0,137
2020-11-24 06:10:00	1,167	1,2	5,194	1,4	-0,150
2020-11-24 06:20:00	1,167	1,2	5,189	1,4	-0,152
2020-11-24 06:30:00	1,167	1,2	5,191	1,4	-0,163

Рис. 2. Записи системы наблюдения за температурой и соленостью с дискретностью 10 мин при переходах между типами стратификации I и II.

Fig. 2. Records of the system for observing temperature and salinity with a discreteness of 10 minutes during the transitions between stratification types I and II.

Морская вода Таганрогского залива относится к хлоридно-натриевой группе [12; 13]. На практике соленость морской воды рассчитывается по иону хлора. По степени минерализации воды подразделяются следующим образом: вблизи донского взморья – слабосолоноватые (2–4 ‰), в центральной части – солоноватые (4–8 ‰), далее до кос Долгая и Белосарайская – высокосолоноватые (8–13 ‰). В химическом составе преобладают хлоридные соединения (до 89 %). Указанная схема солевой структуры вод в акватории характерна в основном для безветренной погоды в Азовском море.

Дата	Соленость поверхности	t пов	Соленость дна	t дна
2020-11-15 13:40:00	1,565	2,6	4,535	2,7
2020-11-15 13:50:00	1,645	2,6	4,188	2,7
2020-11-15 19:20:00	1,884	2,4	8,365	3,1
2020-11-15 19:30:00	1,961	2,4	8,426	3,2
2020-11-15 19:40:00	1,945	2,5	8,391	3,2
2020-11-15 19:50:00	2,053	2,4	8,414	3,2
2020-11-15 20:00:00	0,063	2,4	8,455	3,2
2020-11-15 20:10:00	2,101	2,4	8,320	3,3
2020-11-15 20:20:00	2,123	2,4	8,319	3,3
2020-11-15 20:30:00	2,169	2,4	8,326	3,3
2020-11-15 20:40:00	2,144	2,4	8,327	3,2
2020-11-15 20:50:00	2,144	2,4	8,316	3,3
2020-11-15 21:00:00	2,145	2,4	8,302	3,3
2020-11-15 21:10:00	2,225	2,4	8,330	3,2
2020-11-15 21:20:00	2,227	2,4	8,357	3,3
2020-11-15 21:30:00	2,144	2,4	8,361	3,3
2020-11-15 21:40:00	2,082	2,5	8,361	3,3
2020-11-15 21:50:00	2,060	2,5	8,258	3,3
2020-11-15 22:00:00	2,112	2,5	8,255	3,3
2020-11-15 22:10:00	2,028	2,7	8,269	3,3
2020-11-15 22:20:00	1,927	2,8	8,268	3,3
2020-11-15 22:30:00	1,952	2,8	8,169	3,3
2020-11-15 22:40:00	1,899	2,9	8,177	3,3
2020-11-15 22:50:00	1,880	2,9	8,166	3,3
2020-11-15 23:00:00	1,879	2,9	8,167	3,3
2020-11-15 23:10:00	1,902	2,8	8,166	3,3
2020-11-15 23:20:00	1,789	2,9	8,221	3,3
2020-11-15 23:30:00	1,790	2,8	8,207	3,3
2020-11-15 23:40:00	1,677	2,9	8,069	3,3
2020-11-15 23:50:00	1,765	2,8	8,080	3,4
2020-11-16 17:00:00	1,927	0,5	5,698	1,6
2020-11-16 17:10:00	1,978	0,6	5,712	1,6
2020-11-16 17:30:00	1,923	0,6	5,814	1,5
2020-11-16 17:40:00	1,974	0,7	5,818	1,5
2020-11-16 18:50:00	2,025	0,6	5,82[illegible]	1,4
2020-11-16 18:00:00	1,996	0,7	5,842	1,4
2020-11-16 18:10:00	2,117	0,6	5,871	1,3
2020-11-16 18:20:00	2,226	0,7	5,831	1,3
2020-11-16 18:00:00	2,197	0,6	5,862	1,2
2020-11-16 19:10:00	2,251	0,6	5,941	1,2
2020-11-16 19:20:00	2,250	0,7	5,961	1,2
2020-11-16 19:30:00	2,311	0,7	5,963	1,2
2020-11-16 19:40:00	2,356	0,6	5,963	1,2
2020-11-16 19:50:00	2,350	0,6	5,968	1,2
2020-11-16 20:00:00	2,438	0,6	5,931	1,1
2020-11-16 20:10:00	2,384	0,6	6,045	1,1
2020-11-16 20:20:00	2,423	0,6	6,041	1,1
2020-11-16 20:30:00	2,438	0,6	6,058	1,1
2020-11-16 20:40:00	2,338	0,6	6,058	1,1
2020-11-16 20:50:00	2,349	0,5	6,058	1,1
2020-11-16 21:00:00	2,456	0,5	6,079	1
2020-11-16 21:10:00	2,289	0,4	6,018	1
2020-11-16 21:20:00	2,383	0,4	6,026	1,1
2020-11-16 21:30:00	2,203	0,3	6,101	1,1
2020-11-16 21:40:00	2,163	0,2	6,103	1,1
2020-11-16 21:50:00	2,207	0,1	6,118	1,1

Рис. 3. Записи системы наблюдения за температурой и соленостью с дискретностью 10 мин при продолжительном наблюдении типа стратификации II.

Fig. 3. Records of the system for observing temperature and salinity with a discreteness of 10 minutes with long-term observation of type II stratification.

Речная вода, исходя из новейших исследований [4; 5], подразделяется на питьевую (0,4–1 ‰) и пресную (речную) (0,4–2 ‰). До зарегулирования донская вода в районе между Азовом и Багаевской относилась к кальциево-гидрокарбонатной группе [9]. Сейчас среднегодовая минерализация воды в створе Ростова-на-Дону составляет 0,7–1 г/л и имеет натриево-сульфатный состав [14]. В результате маловодья рукава, протоки и взморье длительное время заполняются водой с соленостью до 5 ‰ и более. Нередко наблюдается двухслойная стратификация с более соленой (3–5 ‰) придонной водой. В результате в течение года воды гирл в основном относятся к сульфатному классу натриевой группы.

В прошлую климатическую эпоху в течение большей части года в дельту и взморье до Очаковской косы происходило естественное проникновение пресной (0,5–0,9 ‰) воды [15]. В настоящее время, в XXI веке, при западных ветрах наличие слабосолоноватых (2–4 ‰) азовоморских вод – характерное явление для Нижнего Дона [4]. Причина этого – уменьшение пресного стока Дона. Например, в октябре 2016 г. сбросы воды через Цимлянский гидроузел составляли всего 180 м^3/с при нормальных расходах 350–400 м^3/с. По мере развития нагонного течения (0,5–3 суток) в обстановке сильных и умеренных (10–20 м/с) юго-западных ветров в сторону дельты клином направлена адвекция соленых черноморских вод [16]. В результате речной сток Дона стал неспособен постоянно создавать естественный фронт пресных вод в Таганрогском заливе.

С начала XXI века в условиях маловодья все чаще стали возникать ранее не отмечавшиеся явления стремительных адвекций черноморских вод. В течение каждого из последних лет многократно происходило заполнение дельты Дона типично черноморскими водами с соленостью до 10 ‰ (рис. 4, 5). Одновременно из внешней части Таганрогского залива гидрохимический барьер с перепадом солености более 5–6 ‰ сместился на 20–40 км вверх по дельте Дона. Такого рода галоклин разделяет ареалы пресноводной и морской фауны [17].

По нашим данным, воды в скважинах южного берега Дона, при сильных сгонах в р. Кагальник и Свином гирле, собственно в р. Дон и в Керченском проливе имеют преимущественно кальциево-сульфатный, натриево-сульфатный, натриево-хлоридный и смешанный состав (рис. 6). В анионном составе вод разной солености обычно преобладает Cl^-, в катионном – Na^+ и Ca^{2+}. В подчиненном отношении находятся ионы SO_4^{2-}, HCO_3^-, CO_3^{2-}, Mg^{2+}, K^+ [9; 18]. Вода сульфатная определяется по содержанию иона SO_4^{2-}, при содержании SO_4^{2-} в количестве более 250 мг/л вода становится агрессивной.

Для подземных вод характерно высокое содержание хлоридов и доминирование сульфатов среди анионов, высокие концентрации кальция среди катионов (рис. 6). Ионный состав грунтовых вод существенно зависит от водоносного горизонта и состава дренируемых пород. Так, в водах скважины из с. Займо-Обрыв, расположенного в 7 км от с. Кагальник, доминируют сульфаты, катионы натрия и калия [5].

На исследуемой территории наблюдаются грунтовые воды двух видов: одни просачиваются из осадочных пластов коренного берега (рис. 7), а другие текут с возвышающихся при верховках островов собственно дельты. Таким образом, во время сгонов

Таблица 2. Ионный состав воды в протоках дельты Дона, полужирным шрифтом выделены преобладающие катионы и анионы
Table 2. Ionic composition of water in the channels of the Don River delta, the prevailing cations and anions are highlighted in bold

Место отбора проб Sampling point	Время отбора проб Sampling time	Cl^-, мг/л / mg/l	HCO_3^-, мг/л / mg/l	SO_4^{2-}, мг/л / mg/l	Ca^{2+}, мг/л / mg/l	Mg^{2+}, мг/л / mg/l	$Na^+ + K^+$, мг/л / mg/l	Общая минерализация, г/л Water mineralisation, g/l	Уровень воды, мБС Water level, mBS
Речная вода / River water									
Река Кагальник Kagalnik River	27.02.1951	64,5	117	**123,6**	**47,9**	30,3	34,1	0,5	
Река Кагальник Kagalnik River	18.03.1954	67,6	31,7	**99,5**	**32,5**	19,6	31,8	0,3	
Река Дон, поверхность Don River, surface	19.03.2018	177	271	**365**	96	58	**186**	1,2	−0,8
Река Дон, дно Don River, bottom	19.03.2018	177	271	**365**	104	58	**176**	1,2	−0,8
Родник, о. Свиной Svinoy Island, spring	19.03.2018	177	283	**432**	112	78	**166**	1,2	−0,8
Свиное гирло, поверхность Svinoe arm, surface	22.11.2020 10:25	248,6	249	**345,8**	76,15	48,64	**262**	1,23	−0,1
Свиное гирло, поверхность Svinoe arm, surface	22.11.2020 10:30	226,9	246,5	**326,6**	76,15	41,34	**251**	1,17	−0,1
Свиное гирло, поверхность Svinoe arm, surface	22.11.2020 10:40	226,9	246,5	**307,4**	68,14	48,64	**236**	1,13	−0,1
Свиное гирло, поверхность Svinoe arm, surface	23.11.2020 10:20	241,1	239,2	**345,8**	80,16	48,64	**248**	1,2	−0,1
Свиное гирло, поверхность Svinoe arm, surface	23.11.2020 10:30	248,2	251,4	**345,8**	80,16	48,64	**258**	1,23	−0,1
Река Дон, порт Азов, Don River, port of Azov	15.02.2021 14:40	425,4	300,2	**614,8**	120,2	60,80	**468**	1,99	2,1
Колузаево, Koluzaevo	13.02.2021	212,7	288	**403,5**	112,2	51,07	**233**	1,30	2
Ростов-Арена Rostov-Arena	13.02.2021	191,4	292,9	**345,8**	112,2	46,21	**200**	1,19	2
Ростов-Арена Rostov-Arena	14.02.2021	205,6	305,1	**365**	108,2	51,07	**220**	1,26	1,6
Ростов-на-Дону, 29-я линия, понтон / Rostov-on-Don, 29th Line, pontoon	13.02.2021	191,4	295,34	**326,6**	108,2	51,07	**186**	1,16	2
Грунтовые воды / Ground waters									
Река Кагальник Kagalnik River	25.10.1954	629,1	350,6	**1161,6**	166,9	153,8	**640,2**	3,1	
Река Кагальник Kagalnik River	1.10.1958	220,7	380,6	**1350,7**	194,4	155,3	**435,1**	2,8	
Река Сухой Кагальник, дно Sukhoy Kagalnik River, bottom	19.03.2018	709	378	**1729**	240	231	**780**	4,1	−0,8
Река Мокрый Кагальник, поверхность / Mokry Kagalnik River, surface	19.03.2018	620	378	**1681**	248	178	**793**	3,9	−0,8

Продолжение табл. 2

Место отбора проб Sampling point	Время отбора проб Sampling time	Cl^-, мг/л / mg/l	HCO_3^-, мг/л / mg/l	SO_4^{2-}, мг/л / mg/l	Ca^{2+}, мг/л / mg/l	Mg^{2+}, мг/л / mg/l	$Na^+ + K^+$, мг/л / mg/l	Общая минерализация, г/л Water mineralisation, g/l	Уровень воды, мБС Water level, mBS
Река Мокрый Кагальник, дно Mokry Kagalnik River, bottom	19.03.2018	603	369	**1681**	240	195	**751**	3,8	−0,8
Свиное гирло, поверхность Svinoe arm, surface	19.03.2018	496	339	**1249**	200	134	**614**	3,0	−0,8
Свиное гирло, дно Svinoe arm, bottom	19.03.2018	620	373	**1681**	257	173	**791**	3,9	−0,8
Ерик Черепаший, поверхность Erik Cherepashiy, surface	19.03.2018	496	344	**961**	168	105	**566**	2,6	−0,8
Ерик Черепаший, дно Erik Cherepashiy, bottom	19.03.2018	532	354	**1297**	200	170	**595**	3,1	−0,8
Скважина, с. Кагальник Well bore, Kagalnik village	6.03.2018	744	488	**1105**	521	180	**3267**	3,3	−0,03
Скважина, с. Займо-Обрыв Well bore, Zaymo-Obryv village	16.08.2011	319	393	**1249**	216	127	**506**	2,8	
Скважина, 40 м, с. Кагальник, «Плоды Приазовья» / Well bore, 40 m, Kagalnik village, "Plody Priazov'ya" farm	12.2020	**1390**	180	20	1290		**2500**	5,39	
Свиное гирло, поверхность Svinoe arm, surface	20.11.2020 13:00	709	368,6	**1585**	224,5	175,1	**836**	3,9	−1,2
Свиное гирло, поверхность Svinoye arm, surface	20.11.2020 15:00	726,7	366,1	**1585**	256,5	204,3	**747,5**	3,89	−1,2
Свиное гирло, поверхность Svinoye arm, surface	01.12.2020	815,4	366,1	**2305,4**	304,6	240,8	**1050**	5	−1,2
Свиное гирло, дно Svinoye arm, bottom	01.12.2020	833,1	366,1	**2353,5**	320,6	243,2	**1062,5**	5,1	−1,2
Свиное гирло, дно Svinoye arm, bottom	02.12.2020	815,4	380,8	**2353,5**	344,7	277,3	**956**	5,1	−0,9
Свиное гирло, дно Svinoye arm, bottom	02.12.2020	815,4	375,9	**2353,5**	352,7	235,9	**1029**	5,1	−0,9
Свиное гирло, поверхность Svinoye arm, surface	06.12.2020	957,2	485,7	**2737,7**	384,8	301,6	**1199**	6	
Морские воды / Sea waters									
Гидрометеопост «Донской», поверхность / Hydrometeopost "Donskoy", surface	05.02.2021 11:14	**1861,1**	251,4	720,6	116,2	163	**1310,5**	4,4	0,7
Гидрометеопост «Донской», дно Hydrometeopost "Donskoy", bottom	05.02.2021 11:12	**1949,8**	253,8	672,4	120,2	175,1	**1319**	4,5	0,7
Свиное гирло, поверхность Svinoye arm, surface	05.02.2021 11:43	**1683,9**	273,4	816,5	120,2	150,8	**1264,5**	4,3	0,7
Свиное гирло, дно, Svinoye arm, bottom	05.02.2021 11:40	**1683,9**	278,3	768,5	120,2	170,2	**1201,5**	4,2	0,7

Окончание табл. 2

Место отбора проб Sampling point	Время отбора проб Sampling time	Cl^-, мг/л / mg/l	HCO_3^-, мг/л / mg/l	SO_4^{2-}, мг/л / mg/l	Ca^{2+}, мг/л / mg/l	Mg^{2+}, мг/л / mg/l	$Na^+ + K^+$, мг/л / mg/l	Общая минерализация, г/л Water mineralisation, g/l	Уровень воды, мБС Water level, mBS
Свиное гирло, поверхность Svinoye arm, surface	13.02.2021	**2020,6**	275,8	912,6	152,3	187,3	**1438**	5	2,3
Свиное гирло Svinoye arm	14.02.2021 06:00	**3332,3**	253,8	1056,7	152,3	284,5	**2229**	7,3	2,3
Свиное гирло Svinoye arm	15.02.2021	**2658,8**	273,4	960,6	156,3	270	**1737**	6,06	0,4
Свиное гирло, поверхность Svinoye arm, surface	08.03.2021	**1347,1**	263,6	653,2	136,3	121,6	**978**	3,5	2,4
Свиное гирло, дно Svinoye arm, bottom	08.03.2021	**1382,6**	263,6	634	128,3	136,2	**973**	3,5	2,4
Азов, Западный микрорайон, водопроводная вода / Azov, Zapadnyy microdistrict, urban water	14.02.2021 11:00	**2517**	244,1	960,6	132,3	235,9	**1725**	5,81	1,6
Азов, Западный микрорайон, водопроводная вода / Azov, Zapadnyy microdistrict, urban water	14.02.2021 15:00	**2056,1**	239,2	1008,6	136,3	270	**1348**	5,06	1,7
Азов, Западный микрорайон, водопроводная вода / Azov, Zapadnyy microdistrict, urban water	14.02.2021 20:00	**3474,1**	246,5	1056,7	144,3	313,7	**2276**	7,51	0,9
Азов, Западный микрорайон, водопроводная вода / Azov, Zapadnyy microdistrict, urban water	14.02.2021 21:50	**3757,7**	258,7	1105	160,3	291,8	**2531**	8,1	0,8
Азов, Западный микрорайон, водопроводная вода / Azov, Zapadnyy microdistrict, urban water	15.02.2021 20:00	**3474,1**	239,2	1008,6	148,3	299,1	**2273**	7,44	0,3
Азов, Западный микрорайон, водопроводная вода / Azov, Zapadnyy microdistrict, urban water	16.02.2021 20:00	**974,9**	256,3	499,5	112,2	104,6	**697,5**	2,64	−0,15
Река Дон, порт Азов Don River, port of Azov	13.02.2021 14:00	**1347,1**	270,9	557,2	116,2	133,8	**931**	3,36	2,3
Река Дон, порт Азов Don River, port of Azov	14.02.2021 13:20	**2871,5**	256,3	912,6	140,3	255,4	**1905**	6,34	2,2
Рогожкино Rogozhkino	13.02.2021	**2002,9**	258,7	730,1	128,3	177,5	**1373,5**	4,67	2
Дугино Dugino	13.02.2021	**1577,5**	268,5	691,6	116,2	153,2	**1122,5**	3,93	2

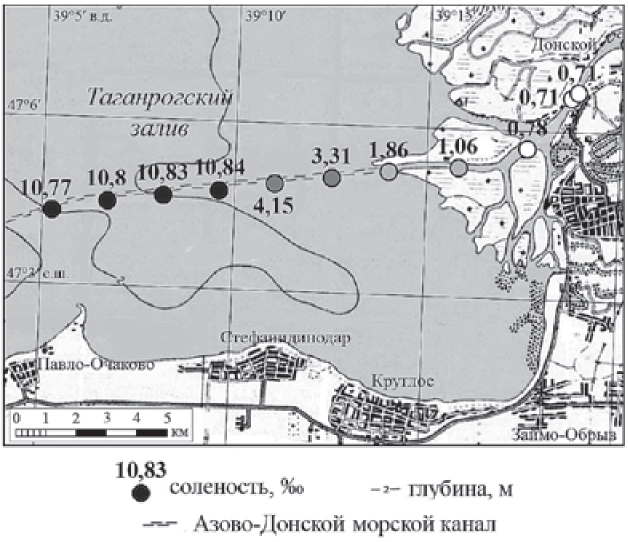


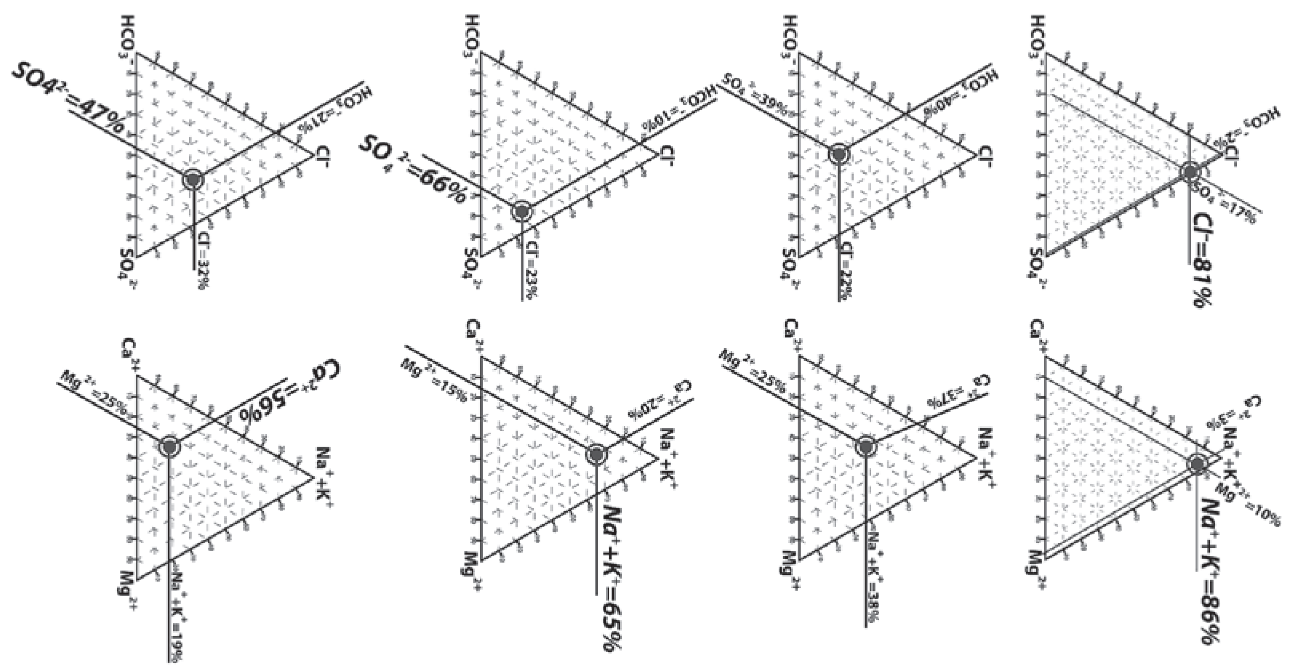
Рис. 4. Распределение солености на поверхности предустьевого взморья дельты Дона 17.12.2020.
Fig. 4. Distribution of salinity on the surface of the pre-estuarine seashore of the Don River delta on 17 December 2020.

аномально повышается доля минерализованного подземного стока. Результаты анализа воды из скважины на правом, невысоком (10 м), берегу протоки Сухой Кагальник показали следующее: содержание анионов (г/л): гидрокарбонатов HCO_3^- – 0,18, хлоридов Cl^- – 1,39, сульфатов SO_4^{2-} – 0,02; содержание катионов: Ca^{2+} + Mg^{2+} – 1,29, Na^+ + K^+ – 2,5, сухой остаток (сумма солей) – 5,39 (табл. 2).

Географические особенности Свиного гирла, на котором с ноября 2020 г. до середины марта 2021 г. были сфокусированы наблюдения, имеют следующие геоморфологические черты: Свиное гирло соединяет между собой протоки Кагальника, Сухой Кагальник и Мокрый Кагальник, и Азово-Донской морской канал, по которому проходит основной сток р. Дон. Левый берег (по ходу течения Дона) является коренным обрывом (суглинки) высотой 14–17 м. Во время верховки Свиное гирло, как и большинство других рукавов авандельты, фактически изолировано от Азовского моря и судоходного канала. Взморье на 5–12 км осушается [5].

Во время сильных сгонов и снижения уровня воды на 2 м Свиное гирло отделяется от Дона мелководным порогом. Этот порог намывается при дноуглублении в судоходном канале. При экстремальных сгонах порог мелеет и водообмен между Доном и Свиным гирлом практически прекращается. В результате Свиное гирло, длина которого 1,2 км, превращается в изолированную мелкую (глубина 30–50 см) лагуну (рис. 8).

Рис. 5. Изменение питания и ионного состава дельты Дона при разных уровнях воды.
Fig. 5. Changes in the types of feed and ionic composition of the Don River delta at different water levels.



Скважина, с. Кагальник, 06.03.2018 г., кальциево-сульфатный состав, минерализация 3,3 г/л | Свиное гирло, дно, 01.12.2020 г., натриево-сульфатный состав, минерализация 5,1 г/л | Дон, смешанный состав, минерализация 0,6 г/л | Керченский пролив, натриево-хлоридный состав, минерализация 15–17 г/л

Рис. 6. Треугольники ионного состава в Азовском море, протоках и скважинах дельты Дона.
Fig. 6. Triangles of ionic composition in the Sea of Azov, channels and wells of the Don River delta.

Анализ термохалинных закономерностей при экстремальных по продолжительности и величине сгона воды верховок позволяет представить процесс осолонения следующим образом. В осенне-зимний период в условиях восточных ветров продолжительностью до 2–4 недель и скоростью более 6–10 м/с в Свином гирле прекращается водообмен с Азовским морем и судоходным каналом р. Дон. Река Кагальник превращается в узкий ручей. Процесс минерализации и преобразования речных пресных водных масс в солоноватые воды происходит в 2 этапа. В первые дни сгона наблюдается двухслойная структура: тип I – пресная (0,6–1,5 ‰) вода в верхней части, внизу слабосоленая (2–4 ‰). Тонкий верхний слой воды (10–15 см) имеет соленость 0,6–1,3 ‰ в течение 1–2 дней. Соленость нижнего слоя воды (30–40 см) нарастает до 6–9 ‰ (осолоненная). Такой характер стратификации держится до 1–2 суток. II тип – соленость воды в Свином гирле сверху донизу становится однородной. В условиях самых сильных сгонов и обмеления гирл до 0,4–0,6 м вся толща воды становится солоноватой (до 6–8,5 ‰). Свиное гирло практически целиком заполняется минерализованными водами подземного стока.

В целом, будучи отрезанными от основного русла Дона, южные протоки (Сунжа, Свиное гирло) заполняются подземным стоком р. Кагальник. Наблюдения 2020 г. показали, что общее ухудшение водообмена между Доном и Свиным гирлом по причине дальнейшего заиления перешейка между ними ведет к практически постоянному присутствию в Свином гирле минерализованных вод. Такой гидрохимический состав вод стал возникать и в летний сезон, чего раньше не наблюдалось. Пробы воды, отобранные 20.11.2020 г. (минерализация 4 г/л) и 06.12.2020 г. (минерализация 6 г/л), имеют одинаковый ионный состав: 12–14 % HCO_3^{2-}, 23–27 % Cl^- и 60–65 % SO_4^{2-}, 18–20% Ca^{2+}, 14–16 % Mg^{2+} и 64–68 % $Na^+ + K^+$, – то есть являются натриево-сульфатными. Описанный состав полностью совпадает с составом вод, отобранных в 2018 г. в протоках Сухой и Мокрый Кагальник (табл. 2).

Три основных катиона и три основных аниона расставлены в виде треугольной диаграммы (рис. 6). Треугольник ионного состава показывает процентное соотношение ионов, но не свидетельствует об общей минерализации. Диаграмма ил-

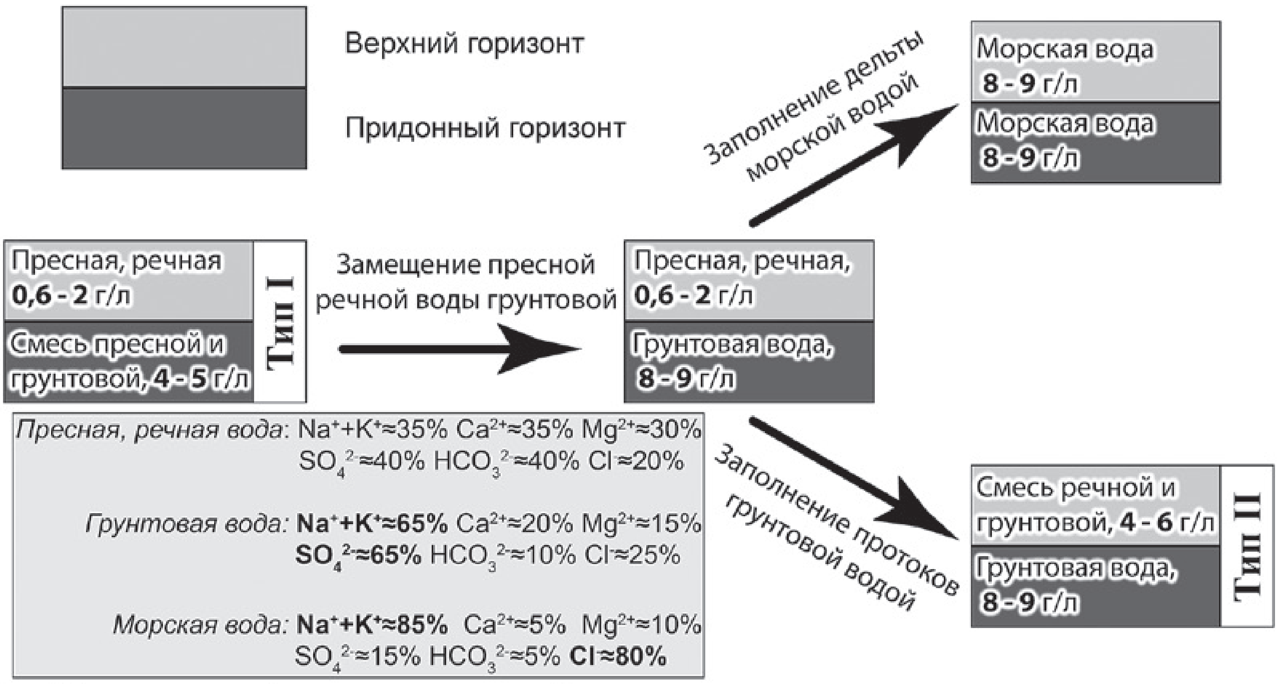


Рис. 7. Новые типы стратификации солености в дельте Дона.
Fig. 7. New types of salinity stratification in the Don River delta.

Рис. 8. Осушение протоки Свиное гирло при падении уровня воды на 1,5 м.
Fig. 8. Drainage of the Svinoe delta arm when the water level drops to 1.5 m.

люстрирует разницу между морской, речной, подземной водой, заполнявшей Свиное гирло в начале декабря 2020 г. Гидрохимические эпизоды такого рода, имевшие место на взморье в 2017–2020 гг. на протяжении 10–17 дней, требуют специального изучения.

Сопряженный анализ гидрохимического состава вод, непрерывных записей регистраторов солености (рис. 2, 3) с учетом различных режимов (стадий) сгонно-нагонных явлений и общей физико-географической обстановки в эпоху маловодья дает основание классифицировать возникающие формы водных масс в устьевой области Дона (рис. 7).

В условиях западных ветров, в том числе экстремальных низовок, преобразование вод происходит по цепи последовательных гидрологических стадий. Пресная (речная) вода замещается перемешанной черноморской и речной водой и затем морской (до 10 ‰). У морского края дельты штормовые (до 20–30 м/с) юго-западные ветры приводят к подъему уровня воды на 3–4 м. В ситуации обратной низовки-черноморки после длительного сгона

Таблица 3. Расчет аномалий сезонной температуры воздуха, годовых и максимальных среднемесячных расходов воды р. Дон у ст. Раздорская и в Приазовье

Table 3. Calculation of seasonal air temperature anomalies, annual and maximum average monthly water discharges in the Don River at Razdorskaya village and Azov region

Регион	Методика
Расчет аномалий сезонной температуры воздуха в Приазовье / Calculation of seasonal air temperature anomalies in Azov region	1. Вычисление среднемесячных температур воздуха на основе суточных значений на гидрометеостанциях / Calculation of month average temperature values based on the daily values at hydrometeorological stations (HMS) from the databases
	2. Вычисление сезонных величин по годам на основе среднемесячных значений / Averaging monthly values on the HMS by years to seasonal values
	3. Расчет средней сезонной температуры для Приазовья по годам путем осреднения данных трех гидрометеостанций (Таганрог, Геническ, Керчь) / Calculations of the average seasonal temperature of the Azov region, based on averaging of seasonal data from three HMS (Taganrog, Kerch, Genichesk) over the years
	4. Расчет климатической нормы для рассматриваемого региона с помощью осреднения данных трех гидрометеостанций за период 1961–1990 гг. (принят Всемирной метеорологической организацией в качестве стабильного базового периода для долгосрочной оценки изменений климата) / The climatic norm for the Azov region is calculated on the basis of the year-averaged data of three HMS for the period 1961–1990 (adopted by the World Meteorological Organization as a stable base period for long-term assessment of climate change)
	5. Аномалии зимней температуры по годам находили с помощью расчета разницы между сезонным значением температуры воздуха и климатической нормой / Anomalies of seasonal temperature over the years were found by calculating the difference between the seasonal temperature value and the climatic norm
Расчет годовых и максимальных среднемесячных расходов воды р. Дон в ст. Раздорской / Calculation of annual and maximum monthly averaged discharges of the Don River in Razdorskaya	1. Вычисление годовых расходов воды на основе средних месячных значений по данным из ежегодников Государственного водного кадастра / Calculation of annual values by average monthly data from the yearbooks of the State Water Cadastre
	2. Анализ данных, выбор максимальных значений из средних месячных расходов для каждого года / Data analysis, selection of maximum values from average monthly discharges for each year

воды возникают самые опасные разрушительные нагоны (март 2013 г., сентябрь 2014 г.) [16]. Только ураганный юго-юго-западный ветер вдоль края взморья создает подпор донскому стоку, и в считанные (2–3) часы приморская зона донской дельты заливается.

При восточных ветрах (экстремальных верховках) эволюция вод имеет следующий порядок: пресная → грунтовая (подземная) → черноморская (рис. 7). В отдельных случаях существует стратификация: питьевая (0,4–1 ‰) на поверхности и пресная (речная) (1–2 ‰) у дна. Солоноватая вода (2–4 ‰) как тип ранее на взморье и в авандельте не отмечалась. Своим происхождением вода с таким составом прежде всего обязана черноморской адвекции при крайне ограниченном донском стоке [4].

Методика расчета аномалий сезонной температуры воздуха в Приазовье, а также годовых и максимальных ежемесячных расходов р. Дон в ст. Раздорская показана в таблице 3 [1]. В результате анализа гидрометеорологических данных (1884–2020 гг.) выявлены внутривековые изменения климата и водности в Приазовье. Исследуемый период можно подразделить на три этапа: холодный (многоводный, 1884–1942 гг.), переходный (1942–1985 гг.) и теплый (маловодный, 1986–2020 гг.) [2]. В течение последних полутора веков циклы колебания средних температур воздуха зимой и водного режима в регионе Азово-Донского бассейна были синхронны. Вместе с тем в отдельные годы указанных интервалов возникали отклонения и аномальные скачки исследуемых параметров.

Исключением в ряду маловодных лет стала весна 2018 г. Ярким примером природно-техногенной аномалии на фоне продолжительного маловодья на Дону стала ситуация, когда избыток воды от весеннего паводка привел к аварийным попускам воды из Цимлянского водохранилища. Среднесуточный объем сброса в р. Дон составлял 10 апреля 345 м^3/с, 28 апреля – 1503 м^3/с, а к 6 мая увеличился до 1701 м^3/с. Это привело в конце апреля – начале мая 2018 г. к формированию экстремальной волны половодья на Дону и экстремальному затоплению авандельты. Одновременный сброс воды из Цимлянского водохранилища и нагон со стороны моря приводит к опасным наводнениям, как, например, в марте 2013 г. [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование дополняет и уточняет ранее сделанные выводы [19; 20] о том, что начиная с середины 50-х гг. прошлого века в Азово-Донской экосистеме независимо от общей климатической изменчивости стали нарастать негативные и разрушительные воздействия индустриальной природы. Самым заметным, явно причиняющим вред и приведшим к необратимым последствиям в бассейне Дона, стало гидротехническое зарегулирование реки на всем ее протяжении, от верховий до Азовского моря. Переломным в гидробиологическом развитии водоема явилось перекрытие в 1952 г. долины Дона Цимлянской плотиной, которая безвозвратно нарушила естественную ритмику речного стока.

Неучет свойств аридной зоны, природной внутривековой цикличности климата и возможностей саморегуляции степной реки в яркой форме проявился в первой четверти XXI века. Произошло нарушение и сокращение естественного пресного стока, баланса между речными и черноморскими водами, активизация адвекции в водную систему реки подземной среднеминерализованной (5,39 г/л) воды. Чрезмерное промышленное рыболовство в бассейне Азовского моря и Дона в XX веке привело к снижению количества рыбопромысловой продукции, замещению местной ихтиофауны чужеродными видами и необратимому перевылову всех ценных рыб.

Очевиден еще один негативный фактор, существовавший в XX веке, – это загрязнение речного дна угольным шлаком, который сбрасывали с пароходов в течение более ста лет. В современных илистых отложениях маркирующий слой шлака имеет толщину 5–10 см и протяженность в несколько десятков километров [1].

Не исключено, что при возможном экстраординарном уменьшении стока Дона соленые морские воды могут распространяться намного выше Азова и даже Ростова-на-Дону. Сложившаяся в настоящий период обстановка приводит к периодическому (во время сильных низовок) заполнению водопровода в Азове и других населенных пунктах солоноватой (4–8 ‰) водой; в отдельных случаях, как, например, 14.02.2021 г., зафиксирована высокосолоноватая (8–10 ‰) вода (рис. 6).

В период длительного действия сгонного явления повышается роль стока небольших речек, у которых водосборный участок находится в пределах коренного берега. Источниками питания таких речек в основном являются разгрузки высокоминерализованных грунтовых подземных вод. Для подтверждения данной гипотезы требуется проведение

Рис. 9. Протока Свиное гирло в сторону р. Кагальник и в сторону р. Дон.
Fig. 9. Svinoe delta arm in the direction of the Kagalnik River and in the direction of the Don River.

отбора вод в таких речках на протяжении действия сгонного ветра. На северном коренном берегу Дона к таким речкам относятся Донской Чулек, Мокрый Чалтырь. На южном коренном берегу это реки Сухой и Мокрый Кагальник, протоки Сунжа и Узяк с многочисленными ручьями (рис. 9).

Для предупреждения стремительных черноморских адвекций в Таганрогский залив, заблаговременного оповещения о разрушительных паводках необходим гидрометеорологический мониторинг с опорой на обширную сеть (не менее 25–40) автоматических гидропостов на Нижнем Дону. Но в будущем возникает задача постановки экспериментальных исследований устойчивости к коррозии и разрушения металлов и других материалов под влиянием водных масс, разных по химическому составу. Важно учесть условия эстуарных и сгонно-нагонных процессов.

На Нижнем Дону и в Приазовье возник значительный дефицит пресной воды, в том числе питьевой, в крупных городах (Таганрог, Азов и др.). Многие малые реки Приазовья в теплый период полностью прекращают сток. В условиях засухи всем отраслям сельхозпроизводства приходится соизмерять потребность в воде с имеющимися водными ресурсами. Очевидна нарастающая потеря доходов водопользователями.

Исследования осуществлены при финансовой поддержке проекта РФФИ № 18-29-05078 мк «Изучение воздействия организмов-деструкторов на металлы в зоне смешения речных и морских вод в широком диапазоне гидроклиматических условий», № 18-05-80010 Опасные явления «Исследование и прогноз опасных гидрометеорологических и геолого-геоморфологических процессов в районах функционирования стратегических объектов на Азово-Черноморском побережье (исторические и современные аспекты)» и в рамках реализации Государственного задания № гр. AAAA-A18-118122790121-5 «Морские биогеосистемы юга России и их водосборы в условиях аридного климата, хозяйственного освоения и современных геополитических вызовов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матишов Г.Г., Дашкевич Л.В., Титов В.В., Кириллова Е.Э. 2021. Анализ внутривековой природной изменчивости в Приазовье и на Нижнем Дону: причина маловодья. *Наука Юга России.* 17(1): 13–23. doi: 10.7868/S25000640210102

2. Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России. 2014. *Информационно-аналитический Центр Регистра и Кадастра.* URL: http://gis.vodinfo (дата обращения: 12.02.2021).

3. Симов В.Г. 1989. *Гидрология устьев рек Азовского моря.* М., Гидрометеоиздат: 328 с.

4. Матишов Г.Г., Григоренко К.С. 2017. Причины осолонения Таганрогского залива. *Доклады Академии наук.* 477(1): 92–96. doi: 10.7868/S086956521731019X

5. Матишов Г.Г., Григоренко К.С. 2018. Маловодье и роль грунтовых вод в осолонении авандельты Дона. *Доклады Академии наук.* 483(4): 444–448. doi: 10.31857/S086956520003284-5

6. Мамаев О.И. 1987. *Термохалинный анализ вод Мирового океана.* Л., Гидрометеоиздат: 296 с.

7. Ежегодники и обзоры. 2010–2019. *Гидрохимический институт.* URL: http://gidrohim.com/node/44 (дата обращения: 20.02.2021).

8. *Научно-прикладной справочник: Основные гидрологические характеристики водных объектов бассейна реки Дон.* 2020. СПб., Свое издательство: 262 с.

9. *Ресурсы поверхностных вод СССР, том 7. Донской район.* 1973. Л., Гидрометеоиздат: 459 с.

10. *Ресурсы поверхностных вод СССР, том 8. Северный Кавказ.* 1973. Л., Гидрометеоиздат: 448 с.

11. *Гидрометеорологический справочник Азовского моря.* 1962. Л., Гидрометеоиздат: 856 с.

12. Никаноров А.М. 2017. *Гидрохимия и методы исследования качества вод суши.* Ростов н/Д, изд-во ЮФУ: 572 с.

13. Бронфман А.М., Дубинина В.Г., Макарова Г.Д. 1979. *Гидрологические и гидрохимические основы продуктивности Азовского моря.* М., Пищевая промышленность: 288 с.

14. Никаноров А.М. 2011. *Региональная гидрохимия.* Ростов н/Д, НОК: 389 с.

15. Гаргопа Ю.М. 2003. Сопряженность крупномасштабных изменений биопродуктивности Азовского моря и гидрометеорологических условий ее формирования. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки.* 2: 78–82.

16. Матишов Г.Г. 2015. Случаи экстремальной адвекции соленых вод в дельту Дона и льда в Керченский пролив. *Доклады Академии наук.* 465(1): 99–103. doi: 10.7868/S0869565215310229

17. Бергер В.Я. 1986. *Адаптации морских моллюсков к изменениям солености среды.* Л., Наука: 218 с.

18. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том V. Азовское море.* 1991. СПб., Гидрометеоиздат: 236 с.

19. Бронфман А.М., Хлебников Е.П. 1985. *Азовское море. Основы реконструкции.* Л., Гидрометеоиздат: 272 с.

20. Никаноров А.М., Брызгало В.А., Кондакова М.Ю. 2012. *Реки России. Часть V. Реки Приазовья (гидрохимия и гидроэкология).* Ростов н/Д, НОК: 316 с.

REFERENCES

1. Matishov G.G., Dashkevich L.V., Titov V.V., Kirillova E.E. 2021. [Analysis of intracentury environmental variability in the Sea of Azov and Lower Don regions: the cause of low water period]. *Nauka Yuga Rossii.* 17(1): 13–23. (In Russian). doi: 10.7868/S25000640210102

2. [Information system on water resources and water management of Russian river basins]. 2014 *Informatsionnaya sistema po vodnym resursam i vodnomu khozyaystvu basseynov rek Rossii.* Available at: http://gis.vodinfo.ru (accessed 12 February 2021). (In Russian).

3. Simov V.G. 1989. *Gidrologiya ust'ev rek Azovskogo morya.* [*Hydrology of the river mouths of the Sea of Azov*]. Moscow, Gidrometeoizdat: 328 p. (In Russian).

4. Matishov G.G., Grigorenko K.S. 2017. Causes of salinization of the Gulf of Taganrog. *Doklady Earth Sciences.* 477(1): 1311–1315. doi: 10.1134/S1028334X17110034

5. Matishov G.G., Grigorenko K.S. 2018. Water scarcity and the role of groundwater in salinization of the Don Avandelta. *Doklady Earth Sciences.* 483(2): 1528–1533. doi: 10.1134/S1028334X18120073

6. Mamaev O.I. 1987. *Termokhalinnyy analiz vod Mirovogo okeana.* [*Thermohaline analysis of the waters of the World Ocean*]. Leningrad, Gidrometeoizdat: 296 p. (In Russian).

7. [Yearbooks and Reviews]. 2010–2019. *Gidrokhimicheskiy institut.* Available at: http://gidrohim.com/node/44 (accessed 20 February 2021). (In Russian).

8. *Nauchno-prikladnoy spravochnik: Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki vodnykh ob"ektov basseyna reki Don.* [*Scientific and applied handbook: basic hydrological characteristics of water bodies of the Don River basin*]. St Petersburg, Svoe izdatel'stvo: 262 p. (In Russian).

9. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR, tom 7. Donskoy rayon.* [*Surface water resources of the USSR, volume 7. Don region*]. 1973. Leningrad, Gidrometeoizdat: 459 p. (In Russian).

10. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR, tom 8. Severnyy Kavkaz.* [*Surface water resources of the USSR, volume 8. North Caucasus*]. 1973. Leningrad, Gidrometeoizdat: 448 p. (In Russian).

11. *Gidrometeorologicheskiy spravochnik Azovskogo morya.* [*Hydrometeorological reference book of the Sea of Azov*]. 1962. Leningrad, Gidrometeoizdat:. 856 p. (In Russian).

12. Nikanorov A.M. 2017. *Gidrokhimiya i metody issledovaniya kachestva vod sushi.* [*Hydrochemistry and methods of the quality of land waters investigating*]. Rostov-on-Don, Southern Federal University: 572 p. (In Russian).

13. Bronfman A.M., Dubinina V.G., Makarova G.D. 1979. *Gidrologicheskie i gidrokhimicheskie osnovy produktivnosti Azovskogo morya.* [*Hydrological and hydrochemical bases of the productivity of the Sea of Azov*]. Moscow, Pishchevaya promyshlennost': 288 p. (In Russian).

14. Nikanorov A.M. 2011. *Regional'naya gidrokhimiya.* [*Regional hydrochemistry*]. Rostov-on-Don, NOK: 389 p. (In Russian).

15. Gargopa Yu.M. 2003. [Conjugation of large-scale changes in bio-productivity of the Azov Sea and the meteorological conditions of its formation]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki.* 2: 78–82. (In Russian).

16. Matishov G.G. 2015. Extreme saline water advection into the Don River delta and ice advections into Kerch Strait. *Doklady Earth Sciences.* 465(1): 1154–1158. doi: 10.1134/S1028334X15110057

17. Berger V.Ya. 1986. *Adaptatsii morskikh mollyuskov k izmeneniyam solenosti sredy.* [*Adaptations of marine mollusks to changes in salinity of the environment*]. Leningrad, Nauka: 218 p. (In Russian).

18. *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morey SSSR. Tom V. Azovskoe more.* [*Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Volume V. The Sea of Azov*]. 1991. St Petersburg, Gidrometeoizdat: 236 p. (In Russian).

19. Bronfman A.M., Khlebnikov E.P. 1985. *Azovskoe more. Osnovy rekonstruktsii.* [*The Sea of Azov. Basics of reconstruction*]. Leningrad, Gidrometeoizdat: 272 p. (In Russian).

20. Nikanorov A.M., Bryzgalo V.A., Kondakova M.Yu. 2012. *Reki Rossii. Chast' V. Reki Priazov'ya (gidrokhimiya i gidroekologiya).* [*Rivers of Russia. Part V. Rivers of the Azov region (hydrochemistry and hydroecology)*]. Rostov-on-Don, NOK: 316 p. (In Russian).

Поступила 09.03.2021

УДК 532.543.2:556
DOI: 10.7868/S25000640210203

ПРОНИКНОВЕНИЯ СОЛЕНЫХ ВОД ИЗ ТАГАНРОГСКОГО ЗАЛИВА В РУКАВА ДЕЛЬТЫ ДОНА (ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ПРИМЕРЕ СОБЫТИЯ В ПЕРИОД 23–27.09.2014 г.)[1]

© 2021 г. А.Л. Чикин[1], А.В. Клещенков[1], Л.Г. Чикина[2]

Аннотация. Устьевая область Дона – ключевой район бассейна Азовского моря, где происходят сложные процессы взаимодействия речных и морских вод. Здесь особенно сильно проявляются сгонно-нагонные колебания уровня и связанное с этим поступление морских трансформированных вод в рукава дельты Дона. Соленые воды Таганрогского залива при определенных гидрометеорологических условиях проникают даже в устье р. Дон, где находятся водозаборы Азова и Таганрога.

В работе описана математическая модель процесса поступления соленой воды Таганрогского залива в дельту Дона. Гидродинамическая составляющая модели основана на уравнениях Сен-Венана, записанных в характеристическом виде. Транспортная составляющая описана одномерным уравнением конвекции – диффузии в случае консервативного вещества. В качестве области расчета был выбран участок Нижнего Дона от ст. Раздорская до устьев дельты Дона, включая рукава Старый Дон, Мокрая Каланча и Большая Кутерьма. Задача решается конечно-разностными методами с использованием неявных схем.

Расчеты проведены с учетом метеорологической обстановки в период 23–27.09.2014 г., когда наблюдался наиболее сильный за последние годы ветровой нагон. Приведены результаты расчетов скорости течения воды и солености в рукавах Дона в зависимости от уровня воды в Таганрогском заливе. Сравнение расчетных значений солености воды в районе азовского порта с зарегистрированными показало, что представленная математическая модель достаточно адекватно описывает процесс поступления соленой воды из Таганрогского залива в основные рукава р. Дон. В то же время модель дает представление об общей тенденции развития процесса возможного осолонения дельты Дона при нагонных явлениях, что может быть использовано для прогноза таких явлений и принятия оперативных решений для обеспечения устойчивого водоснабжения приморских городов.

Ключевые слова: неустановившееся течение, соленость, математическая модель, вычислительный эксперимент, сгонно-нагонные явления, конвективный перенос.

PENETRATION OF SALINE WATERS FROM THE TAGANROG BAY INTO THE BRANCHES OF THE DON RIVER DELTA (NUMERICAL MODELING ON THE EXAMPLE OF AN EVENT IN THE PERIOD FROM 23 TO 27 SEPTEMBER 2014)

A.L. Chikin[1], A.V. Kleshchenkov[1], L.G. Chikina[2]

Abstract. The mouth area of the Don is a key area of the Sea of Azov basin, where complex processes of interaction between river and sea waters take place. Wind-induced water level fluctuations and the related inflow of transformed sea waters into the Don River delta branches are especially manifested here. Under certain hydrometeorological conditions, the salty waters of the Taganrog Bay penetrate even into the mouth of the Don River, where fresh water intake is located.

[1] Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: chikin@sfedu.ru

[2] Южный федеральный университет (Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42

[1] **Оригинальный текст:** *Чикин А.Л., Клещенков А.В., Чикина Л.Г.* Проникновения соленых вод из Таганрогского залива в рукава дельты Дона (численное моделирование на примере события в период 23–27.09.2014 г.) // Наука Юга России. 2021. Т. 17. № 2. С. 24–33.

The paper describes a mathematical model of the process of the salt water inflow of the Taganrog Bay into the Don River delta. The hydrodynamic component of the model is based on the equations of Saint-Venant, written in characteristic form. The transport component is described by the one-dimensional convection-diffusion equation in the case of a conservative substance. The mouth section of the Lower Don from the village of Razdorskaya to the mouths of the Don River delta, including the Stary Don, Mokraya Kalancha, and Bolshaya Kuterma branches, was chosen as the calculation area. The problem is solved by finite-difference methods using implicit schemes.

The calculations were carried out taking into account the meteorological situation in the period from 23 to 27 September 2014, when the strongest wind surge in recent years was observed. The results of calculations of the water flow rate and salt concentration in the Don branches depending on the water level in the Taganrog Bay are presented. Comparison of the calculated values of the salt concentration in the Azov port area with the observed values showed that the presented mathematical model adequately describes the process of salt water inflow from the Taganrog Bay into the main branches of the Don River. At the same time, the model gives an idea of the general trend of possible salinization of the Don River delta during surges, which can be used for prediction of such phenomena and taking executive decisions for sustainable water supply of seaside cities.

Keywords: unsteady flow, salinity, mathematical model, computational experiment, surge phenomena, convective transfer.

ВВЕДЕНИЕ

Устьевая область Дона – ключевой район бассейна Азовского моря, где происходят сложные процессы взаимодействия речных и морских вод. Она состоит из устьевого участка реки (от ст. Раздорской до вершины дельты в районе Ростова-на-Дону), дельты Дона и Таганрогского залива до условной линии, соединяющей Должанскую и Белосарайскую косы [1; 2]. Здесь особенно сильно проявляются сгонно-нагонные колебания уровня и связанное с этим поступление морских трансформированных вод в рукава дельты Дона [3]. Установлено, что в устьевой области даже во время сгонов фиксируется значительное повышение солености (до 5 ‰), что свидетельствует о резко возросшей роли Азово-Черноморского компенсационного течения [4; 5]. Сокращение стока Дона наряду с интенсивной циклонической деятельностью и аномальной адвекцией черноморских вод также привело к тому, что в Таганрогском заливе стала возможной высокая соленость (до 12 ‰) [6].

Серьезную угрозу представляют экстремальные сгонные явления при восточных и нагонные явления при западных ветрах. Особенно опасна ситуация, когда перед нагоном наблюдался сгон воды. Это происходит при резкой смене восточного ветра на западный. При таком стечении обстоятельств затопление происходит быстрее, и оно сильнее по масштабу, чем при постоянно действующим западном ветре. Подобная картина наблюдалась 23.03.2013 г., когда восточный ветер (3–11 м/с) сменился на юго-западный (15 м/с с порывами 20–22 м/с) [7].

Соленые воды Таганрогского залива при определенных гидрометеорологических условиях проникают даже в устье р. Дон, где находятся водозаборы таких городов, как Азов и Таганрог. Во время экстремального нагона в июне 2014 г. наблюдался подъем уровня моря на 1,7 м, а соленость в устье Дона достигала 5 ‰ [8]. В сентябре 2014 г. вода с повышенной (5–9 ‰) соленостью проникла по Дону до Азова, где закачивалась в городской водопровод. Впоследствии подобное повторялось несколько раз, последнее наблюдалось в феврале 2021 г.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Подробное описание численной реализации гидродинамической составляющей приведено в работе [9] для расчета уровня свободной поверхности русла. В вышеупомянутом исследовании был выбран участок Нижнего Дона от ст. Раздорская до второго узла дельты Дона (исток рукава Каланча). В данной работе рассматривается дельтовая область Дона от ст. Раздорская до Таганрогского залива, состоящая из основного русла Дона и его основных рукавов – Старого Дона, Большой Каланчи, переходящей в Мокрую Каланчу и Большую Кутерьму. Следуя работе [10], дельту Дона представим в виде графа (рис. 1), состоящего из пяти ребер, соответствующих участкам открытых русел, и шести вершин, четыре из которых соответствуют концевым узлам, а две – узлам разветвлений.

Математическая модель состоит из гидродинамической и транспортной составляющих. Будем рассматривать исследуемый участок русла Дона в

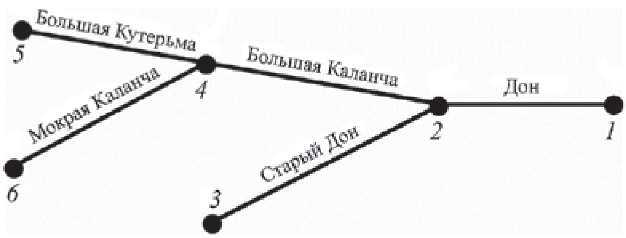


Рис. 1. Схема дельты Дона (основные рукава). Числа означают последовательность узлов.
Fig. 1. Diagram of the Don River delta (main reaches). Numbers mean a sequence of nodes.

предположении, что на нем зоны резкого изменения живого сечения, а также распределенный боковой приток в силу его незначительности отсутствуют. Гидродинамическая составляющая описывается уравнением движения

$$\begin{cases} \dfrac{\partial Q}{\partial t} + gW\left(\dfrac{\partial z}{\partial x} + \dfrac{Q|Q|}{K^2}\right) = 0, \\ \dfrac{\partial W}{\partial t} + \dfrac{\partial Q}{\partial x} = 0, \end{cases}$$

где x – координата; t – время; Q – расход воды; z – уровень воды; W – площадь живого сечения; K – модуль расхода; g – ускорение свободного падения.

В случае, когда поперечное сечение русла имеет параболический профиль, данную систему можно переписать в виде:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial Q}{\partial t} + gW\left(\dfrac{\partial z}{\partial x} + \dfrac{Q|Q|}{K^2}\right) = 0, \\ b\dfrac{\partial z}{\partial t} + \dfrac{\partial Q}{\partial x} = 0, \end{cases} \tag{1}$$

где b – ширина русла.

Систему (1) запишем в операторном виде

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + A\frac{\partial \bar{U}}{\partial x} = \bar{b}\ , \tag{2}$$

где $\bar{U} = \begin{pmatrix} z \\ Q \end{pmatrix}$, $A = \begin{pmatrix} 0 & 1/B \\ gW & 0 \end{pmatrix}$, $\bar{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ \varphi \end{pmatrix}$,

$\varphi = -gW\dfrac{Q|Q|}{K^2}$.

Собственные значения оператора A равны $c^* = \pm\sqrt{\dfrac{gW}{B}}$, а собственные векторы $\bar{I}_1 = \left(gW;\quad c^*\right)$, $\bar{I}_2 = \left(gW;\quad -c^*\right)$ соответственно.

Умножая (2) слева на собственные векторы, получим характеристическую форму системы (1):

$$\begin{cases} \dfrac{gW}{c_*}\dfrac{\partial z}{\partial t} + \dfrac{\partial Q}{\partial t} + gW\dfrac{\partial z}{\partial x} + c_*\dfrac{\partial Q}{\partial x} = -gW\dfrac{Q|Q|}{K^2}, \\ -\dfrac{gW}{c_*}\dfrac{\partial z}{\partial t} + \dfrac{\partial Q}{\partial t} + gW\dfrac{\partial z}{\partial x} - c_*\dfrac{\partial Q}{\partial x} = -gW\dfrac{Q|Q|}{K^2}, \end{cases} \tag{3}$$

где $c_* = \sqrt{\dfrac{gW}{b}}$.

В качестве граничных условий в начальной точке задается расход поступающей воды $Q_0(0,t)$, в конечных точках X_k задается уровень в принимающем водоеме $z_k(X_k,t)$. В узлах ветвления граничные условия задаются следующим образом: сумма притоков – оттоков равна нулю $\sum_i Q_*^i = 0$ (i – число рукавов, приходящих в узел разветвления), а уровни водной поверхности равны между собой: $z_i = z_*$.

Транспортная составляющая консервативного вещества описывается уравнением переноса:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + v\frac{\partial S}{\partial x} - \mu\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} = 0, \tag{4}$$

где S – концентрация; v – скорость движения воды в русле; μ– коэффициент турбулентной диффузии.

На концах рукавов граничные условия задаются в зависимости от знака скорости течения. В случае поступления воды в рукав задается условие

$$\frac{\partial S}{\partial x} = \frac{v}{\mu}\left(S - S^*\right), \tag{5}$$

где S^* – значение концентрации соли на конце рукава.

В случае, когда вода покидает рукав, ставится условие

$$\frac{\partial S}{\partial x} + S\frac{v}{\mu} = 0, \tag{5a}$$

которое соответствует удалению соли из рукава.

Так, во время сильных нагонов на границе рукавов, совпадающих с устьями в Таганрогском заливе, ставится условие $\dfrac{\partial S}{\partial x} = \dfrac{v}{\mu}\left(S - S_{zal}\right)$, где S_{zal} – значение концентрации соли в Таганрогском заливе. В случае, когда конец рукава содержит сосредоточенные параметры, в частности концентрацию, S_{zal} надо заменить на S^* – концентрацию в точке ветвления, которая вычисляется следующим образом:

$$S^* = \frac{\sum S_i Q_i}{\sum Q_i}.$$

Суммирование проводится только по втекающим в точку ветвления рукавам.

Данная задача решается конечно-разностными методами с использованием неявных схем. Приведем конечно-разностную аппроксимацию системы (3) на произвольном отрезке, соответствующем отдельному открытому руслу. Разобьем отрезок на $M+2$ узлов (рис. 2) с шагом $\Delta = x_{j+1} - x_j$, $j = 1,2,...,M$ (число M для каждого отрезка может быть различным). Шаг по времени обозначим через τ.

$$\begin{cases} \frac{gW_j^n}{c_*\tau}\left(z_j^{n+1}-z_j^n\right)+\frac{1}{\tau}\left(Q_j^{n+1}-Q_j^n\right)+\frac{gW_j^n}{\Delta}\left(z_j^{n+1}-z_{j-1}^{n+1}\right)+ \\ +\frac{c_*}{\Delta}\left(Q_j^{n+1}-Q_{j-1}^{n+1}\right)=-gW_j^n\frac{\left|Q_j^n\right|}{K^2}Q_j^{n+1}, \\ -\frac{gW_j^n}{c_*\tau}\left(z_j^{n+1}-z_j^n\right)+\frac{1}{\tau}\left(Q_j^{n+1}-Q_j^n\right)+\frac{gW_j^n}{\Delta}\left(z_{j+1}^{n+1}-z_j^{n+1}\right)- \\ -\frac{c_*}{\Delta}\left(Q_{j+1}^{n+1}-Q_j^{n+1}\right)=-gW_j^n\frac{\left|Q_j^n\right|}{K^2}Q_j^{n+1}. \end{cases} \quad (6)$$

Систему (6) представим в виде:

$$\begin{cases} c_1 z_{j-1} + c_2 Q_{j-1} + c_3 z_j + c_4 Q_j = f_j^n, \\ m_3 z_j + m_4 Q_j + m_5 z_{j+1} + m_6 Q_{j+1} = g_j^n, \end{cases} \quad (7)$$

где

$$c_1 = -\frac{gW_j^n}{\Delta}; c_2 = -\frac{c_*}{\Delta}; c_3 = \frac{gW_j^n}{c_*\tau} + \frac{gW_j^n}{\Delta};$$

$$c_4 = \frac{1}{\tau} + \frac{c_*}{\Delta} + \frac{gW_j^n\left|Q_j^n\right|}{K^2};$$

$$f_j^n = \frac{gW_j^n}{c_*\tau} z_j^n + \frac{Q_j^n}{\tau};$$

$$m_3 = -\frac{gW_j^n}{c_*\tau} - \frac{gW_j^n}{\Delta}; m_4 = \frac{1}{\tau} + \frac{c_*}{\Delta} + \frac{gW_j^n\left|Q_j^n\right|}{K^2};$$

$$m_5 = \frac{gW_j^n}{\Delta}; m_6 = -\frac{c_*}{\Delta};$$

$$g_j^n = -\frac{gW_j^n}{c_*\tau} z_j^n + \frac{Q_j^n}{\tau}.$$

При аппроксимации на левом конце каждого отрезка ($j = 1$ – его начало) берем второе уравнение из (6):

$$-\frac{gW_1^n}{c_*\tau}\left(z_1^{n+1}-z_1^n\right)+\frac{1}{\tau}\left(Q_1^{n+1}-Q_1^n\right)+\frac{gW_1^n}{\Delta}\left(z_2^{n+1}-z_1^{n+1}\right)-$$

$$-\frac{c_*}{\Delta}\left(Q_2^{n+1}-Q_1^{n+1}\right)=-gW_1^n\frac{\left|Q_1^n\right|}{K^2}Q_1^{n+1}.$$

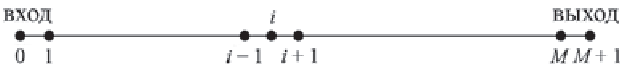


Рис. 2. Конечно-разностная сетка для отдельного русла.
Fig. 2. Finite-difference grid for a separate reach.

При аппроксимации на правом конце каждого отрезка ($j = L$ – его конец) берем первое уравнение из (6):

$$\frac{gW_L^n}{c_*\tau}\left(z_L^{n+1}-z_L^n\right)+\frac{1}{\tau}\left(Q_L^{n+1}-Q_L^n\right)+\frac{gW_L^n}{\Delta}\left(z_L^{n+1}-z_{L-1}^{n+1}\right)+$$

$$+\frac{c_*}{\Delta}\left(Q_L^{n+1}-Q_{L-1}^{n+1}\right)=-gW_L^n\frac{\left|Q_L^n\right|}{K^2}Q_L^{n+1}$$

При конечно-разностной аппроксимации всей области расчета нумерация узлов сетки ведется сквозным образом, и для каждого отрезка в системе (7) будет свой индекс j.

Получаемая матрица системы (7) будет иметь преимущественно пятидиагональный вид. Исключение составляют строки, соответствующие узлам разветвления, где кроме элемента на главной диагонали находится элемент, отстоящий от главной диагонали на расстоянии, равном удвоенному количеству узлов рукава плюс один.

Конечно-разностная аппроксимация уравнения (4) имеет вид:

$$\frac{\delta S}{\delta t} + v\frac{\delta S}{\delta x} - \mu\frac{\delta^2 S}{\delta x^2} = 0, \quad (8)$$

а общий вид разностного уравнения следующий:

$$a_1 S_{j-1} + a_2 S_j + a_3 S_{j+1} = f_j, j = 1,2,...,M. \quad (9)$$

В уравнении (8) разности представлены следующим образом:

$$\frac{\delta S}{\delta t} = \frac{S_j^{n+1} - S_j^n}{\Delta t}, \ \frac{\delta^2 S}{\delta x^2} = \frac{S_{j+1}^{n+1} - 2S_j^{n+1} + S_{j-1}^{n+1}}{\Delta x^2}.$$

Коэффициенты a_1, a_2, a_3, а также правая часть f_j в (9) без учета конвективной составляющей имеют вид:

$$a_1 = -\frac{\mu}{\Delta x^2}\Delta \mathrm{t},$$

$$a_2 = 1 + \frac{2\mu}{\Delta x^2}\Delta t,$$

$$a_3 = -\frac{\mu}{\Delta x^2}\Delta t,$$

$$f_j = S_j^n.$$

К коэффициентам a_1, a_2, a_3 добавляются слагаемые, полученные из аппроксимации конвективной составляющей, которая аппроксимируется второй противопотоковой схемой [11]:

$$u\frac{\delta S}{\delta x}=\frac{u_R S_R-u_L S_L}{\Delta x},$$

где

$$u_R=\frac{u_{j+1}^{n+1}+u_j^{n+1}}{2};u_L=\frac{u_{j-1}^{n+1}+u_j^{n+1}}{2},$$

$$S_R=\begin{cases}S_j^{n+1}, & u_R>0\\ S_{j+1}^{n+1}, & u_R<0\end{cases},S_L=\begin{cases}S_{j-1}^{n+1}, & u_L>0\\ S_j^{n+1}, & u_L<0\end{cases}.$$

Рассмотрим все случаи знаков скорости.

1. Случай $u_R > 0$, $u_L < 0$.

Получаем $u\frac{\delta S}{\delta x}=\frac{u_R S_j^{n+1}-u_L S_j^{n+1}}{\Delta x}=\frac{S_j^{n+1}}{\Delta x}(u_R-u_L)$.

В коэффициент a_2 добавляется слагаемое $\frac{(u_R-u_L)}{\Delta x}$.

2. Случай $u_R < 0$, $u_L > 0$.

Получаем $u\frac{\delta S}{\delta x}=\frac{u_R S_{j+1}^{n+1}-u_L S_{j-1}^{n+1}}{\Delta x}$. В a_1 добавляется слагаемое $-\frac{u_L}{\Delta x}$, а в коэффициент a_3 добавляется слагаемое $\frac{u_R}{\Delta x}$.

3. Случай $u_R > 0$, $u_L > 0$.

Получаем $u\frac{\delta S}{\delta x}=\frac{u_R S_j^{n+1}-u_L S_{j-1}^{n+1}}{\Delta x}$. В a_1 добавляется слагаемое $-\frac{u_L}{\Delta x}$, а в коэффициент a_2 добавляется слагаемое $\frac{u_R}{\Delta x}$.

4. Случай $u_R < 0$, $u_L < 0$.

Получаем $u\frac{\delta S}{\delta x}=\frac{u_R S_{j+1}^{n+1}-u_L S_j^{n+1}}{\Delta x}$. В a_2 добавляется слагаемое $-\frac{u_L}{\Delta x}$, а в коэффициент a_3 добавляется слагаемое $\frac{u_R}{\Delta x}$.

На левом конце каждого отрезка ($j = 0$ – его начало) в зависимости от знака скорости u_L аппроксимация граничного условия в соответствии с (5) или (5а) будет следующей:

$$\frac{S_1^{n+1}-S_0^{n+1}}{\Delta x}-\frac{u_L}{\mu}S_0=-\frac{u_L}{\mu}S^*,(u_L>0),$$

$$\frac{S_1^{n+1}-S_0^{n+1}}{\Delta x}+\frac{u_L}{\mu}S_0=0,(u_L<0).$$

или

$$S_0=\frac{1}{1+\frac{u_L}{\mu}\Delta x}S_1+\frac{\frac{u_L}{\mu}\Delta x S^*}{1+\frac{u_L}{\mu}\Delta x},(u_L>0),$$

$$S_0=\frac{1}{1-\frac{u_L}{\mu}\Delta x}S_1,(u_L<0).$$

На правом конце ребра ($j = M + 1$ – его конец) в зависимости от знака скорости u_R аппроксимация граничного условия в соответствии с (5) или (5а) будет следующей:

$$\frac{S_{M+1}^{n+1}-S_M^{n+1}}{\Delta x}-\frac{u_R}{\mu}S_{M+1}=-\frac{u_R}{\mu}S_{zal},(u_R<0),$$

$$\frac{S_{M+1}^{n+1}-S_M^{n+1}}{\Delta x}+\frac{u_R}{\mu}S_{M+1}=0,(u_R>0).$$

или

$$S_{M+1}=\frac{1}{1-\frac{u_R}{\mu}\Delta x}S_M-\frac{\frac{u_R}{\mu}\Delta x S_{zal}}{1-\frac{u_R}{\mu}\Delta x},(u_R<0),\tag{10}$$

$$S_{M+1}=\frac{1}{1+\frac{u_R}{\mu}\Delta x}S_M,(u_R>0).$$

В случае, когда правый конец рукава содержит сосредоточенные параметры, в частности концентрацию, в формулах (10) надо S_{zal} заменить на S^* – концентрацию в точке ветвления.

Полученные системы линейных алгебраических уравнений решались с использованием пакета LAPACK с помощью подпрограмм для ленточных матриц общего вида.

Расчет гидродинамических параметров осуществляли на уже откалиброванной ранее модели течений в дельте Дона [9], где калибровку модели проводили путем подбора коэффициентов шероховатости. Морфометрические значения глубины и ширины русла были заданы в соответствии с «Навигационным атласом единой глубоководной системы России» [12] и данными промерных работ, выполненных Южным научным центром Российской академии наук (ЮНЦ РАН) в ходе рейсов на научно-исследовательском судне «Профессор Панов».

Данные по изменению уровня воды на гидрометеопосту в х. Донской (Азовский район Ростовской области) взяты из открытой базы данных ЮНЦ РАН, точка наблюдения 1001 [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для верификации данной модели была рассмотрена ситуация, сложившаяся в период 23–27.09.2014 г., когда в результате действия сильного юго-западного ветра вода из Таганрогского залива стала поступать в русло Дона. Был выбран временной интервал длиной 96 часов, что соответствовало четырем суткам наблюдения.

Данные по солености в области устьевого взморья и расходам воды в рукаве Старый Дон представлены в таблице 1.

Данные по солености в акватории порта Азов приведены в таблице 2.

Из-за сложной штормовой ситуации данные, приведенные в таблицах 1 и 2, нерегулярны по времени. Кроме того, для солености в области взморья и расхода поступающей в рукав воды указаны среднесуточные значения. Все это налагало определенные трудности при верификации модели.

Пространственный шаг равен 1000 м вдоль основного судового хода. Аналитическая оценка допустимого шага по времени в используемых разностных схемах не проводилась, но численные расчеты показали устойчивость счета при $\Delta t < 1200$.

Расчетные значения снимались каждые 10 минут модельного времени. На рисунке 3 приведен график расчетных значений солености в указанный период в районе азовского порта, а также зарегистрированные значения в отдельные моменты времени. Здесь же приводится график изменения уровня воды. Концентрация соли зависит как от скорости течения, так и от направления потока. Соленая вода может попасть в русло реки при наличии обратного течения воды снизу вверх по руслу. Видно, что с резким повышением уровня воды повышается и концентрация соли. Снижение концентрации соли наблюдается при появлении прямого течения в русле (скорость течения меняет знак с минуса на плюс).

Изменение скорости течения в рукаве Старый Дон в районе азовского порта представлено на рисунке 4. Там же приведен график изменения уровня воды в Таганрогском заливе.

Таблица 1. Изменение солености в устьевом взморье в период 23–27.09.2014 г. и расхода воды, поступающей в рукав Старый Дон

Table 1. Changes in salinity in the estuary seaside for the period from 23 to 27 September 2014 and the flow rate of water entering the Stary Don branch

Дата Date	Павло-Очаковская коса, соленость, ‰ Pavlo-Ochakovskaya foreland, salinity, ‰	Таганрог, соленость, ‰ Taganrog, salinity, ‰	Рукав Старый Дон, расход воды, м^3/с Stary Don, discharge, m^3/s
23.09.2014	0,92	4,92	260,4
24.09.2014	3,82	4,96	301,2
25.09.2014	6,33	4,97	426,6
26.09.2014	6,52	4,95	375,6
27.09.2014	5,94	4,94	–

Таблица 2. Изменение солености в акватории порта Азов в период 23–27.09.2014 г.

Table 2. Changes in salinity in the water area of the port of Azov for the period from 23 to 27 September 2014

Дата Date	Время Time	Соленость, ‰ Salinity, ‰
23.09.2014	–	0,48
24.09.2014	15:42	4,1
24.09.2014	23:00	5,59
25.09.2014	8:30	4,69
26.09.2014	8:30	2,86
26.09.2014	17:00	1,18
27.09.2014	8:30	0,69

Видно, что 24.09.2014 г. с резким подъемом уровня воды в Таганрогском заливе возникает обратное течение с увеличением скорости до 0,85 м/с. Затем, к утру 25.09, с понижением уровня воды в Таганрогском заливе обратное течение начинает сильно замедляться до нулевого значения, и далее восстанавливается прямое течение в рукаве с положительным значением скорости. Кроме того, на графике прослеживается периодическое изменение скорости. Это связано, скорее всего, с длинноволновыми колебаниями уровня в Таганрогском заливе при сгонно-нагонном процессе. Так, увеличение скорости прямого течения 26.09.2014 г. с 12:00 до 18:00 определяется резким понижением уровня воды с 1,29 м до 0,75 м.

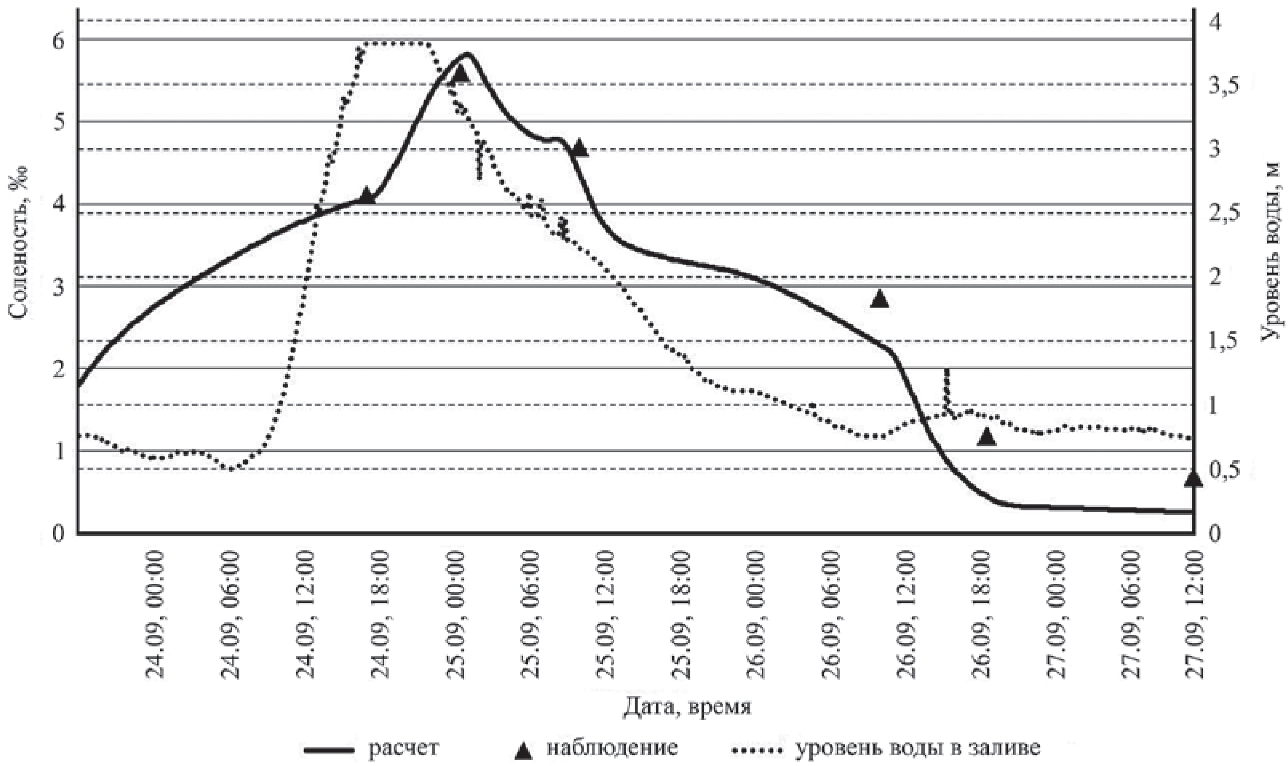


Рис. 3. Графики расчетных значений солености и уровня воды в устье Дона.
Fig. 3. Graphs of the calculated values of salinity and water level at the mouth of the Don River.

На рисунке 5 представлено изменение скоростей течения в точке разветвления основного русла Дона на рукава Старый Дон и Каланча. Расчеты показали, что во время нагона существует интервал времени, на протяжении которого вода из рукава Старый Дон перетекает в рукав Каланча. На графике это проявляется различием знаков скоростей в руслах. Так, весь день 24.09.2014 г. и ночь 25.09.2014 г. наблюдалось обратное течение по обоим рукавам и основному руслу Дона, скорости течения имели отрицательные значения. Однако 25.09.2014 г. примерно с 04:00 на протяжении двух часов течение в Каланче прямое, а в основном русле и в Старом Дону обратное. Это означает, что часть воды из Старого Дона при обратном течении поступает в Каланчу, а часть в основное русло. После 06:00 картина течения меняется. Теперь уже в основном русле и в Каланче прямые течения, а в Старом Дону все еще обратное. Это означает, что из основного русла вся вода идет в Каланчу плюс в Каланчу попадает вода из Старого Дона. После 08:00, когда во всех рукавах восстанавливается прямое течение, вода из основного русла частично идет в Каланчу, а частично в Старый Дон.

Погрешность расчетов, оцениваемая как относительная погрешность $\delta = \sqrt{\dfrac{\sum_i \left(C_i - C_i^0\right)^2}{\sum_i \left(C_i^0\right)^2}}$, где C_i – расчетные значения, C_i^0 –зарегистрированные значения, составляла 11,3 %.

Если проводить оценку меры существенности различий расчетных значений солености и зарегистрированных данных по критерию $J_R = \sqrt{\dfrac{\sum_i \left(C_i - C_i^0\right)^2}{\sum_i \left(C_i + C_i^0\right)^2}}$, то данная оценка дает значение 0,057. Согласно шкале оценки меры существенности различий структур [14] полученный результат соответствует весьма низкому уровню различий (табл. 3).

ВЫВОДЫ

Исследование сгонно-нагонных явлений в устье Дона показало, что в данном явлении присутствуют

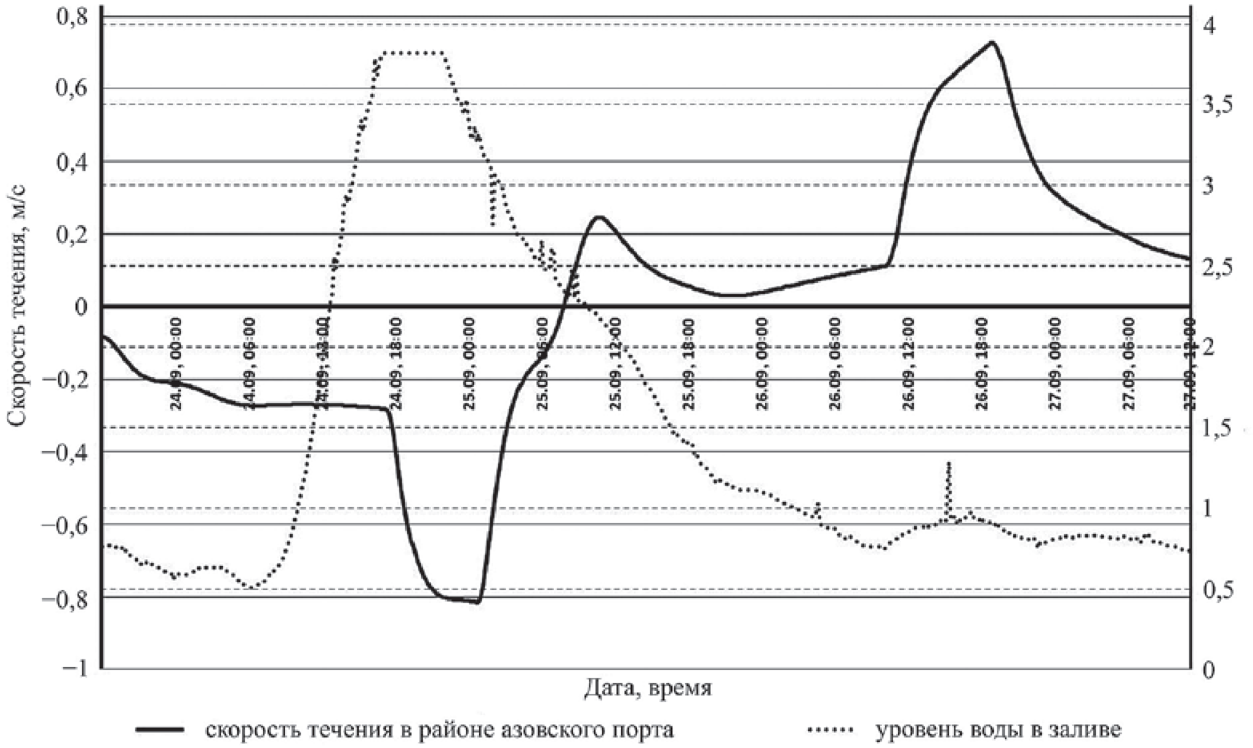


Рис. 4. Графики расчетных значений солености и уровня воды в устье Дона.
Fig. 4. Graphs of the calculated values of salinity and water level at the mouth of the Don River.

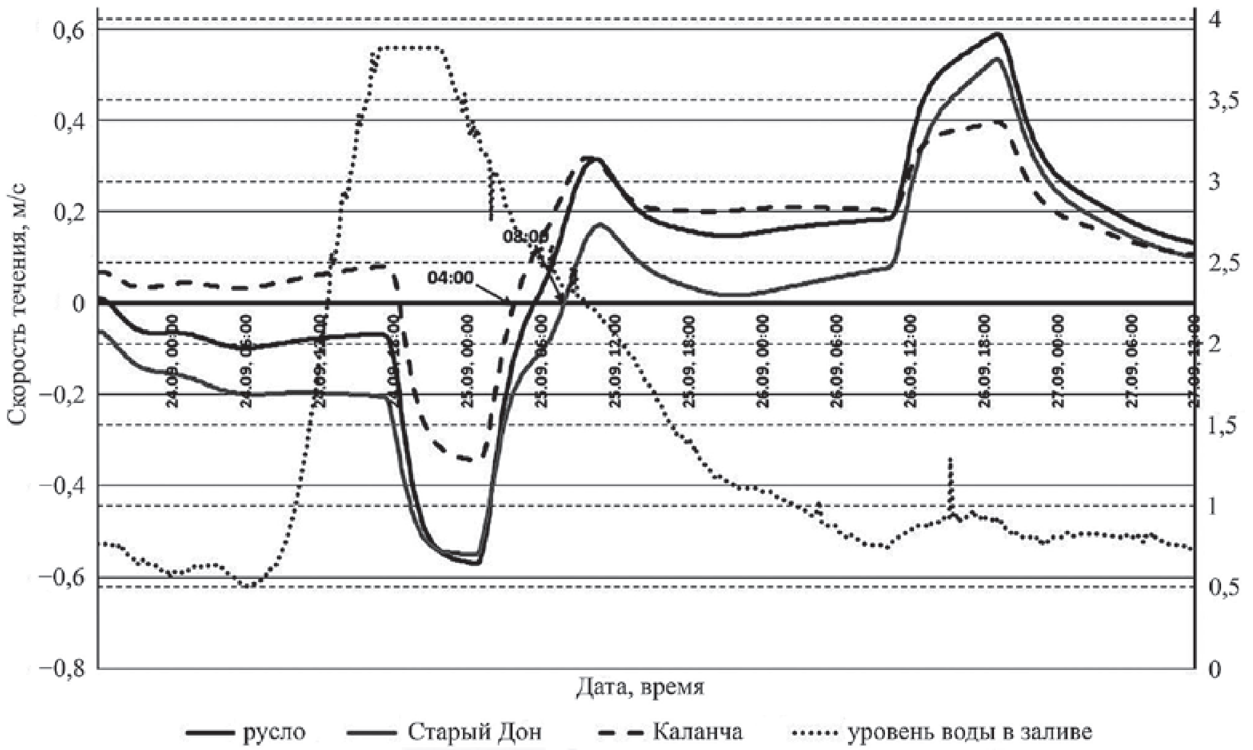


Рис. 5. Скорости течения в разветвлении основного русла на Старый Дон и Каланчу.
Fig. 5. Current velocities in the branching of the main reach to the Stary Don and Kalancha.

Таблица 3. Шкала оценки меры существенности различий структур по критерию J_R
Table 3. Scale for assessing the significance of differences in structures by the J_R criterion

Интервалы значений J_R Intervals of J_R values	Характеристика меры структурных различий Characteristic of the measure of structural differences
0,000–0,030	Тождественность структур / Identity of structures
0,031–0,070	Весьма низкий уровень различий / Very low level of differences
0,071–0,150	Низкий уровень различий / Low level of differences
0,151–0,300	Существенный уровень различий / Substantial level of differences
0,301–0,500	Значительный уровень различий / Significant level of differences
0,501–0,700	Весьма значительный уровень различий / Very significant level of differences
0,701–0,900	Противоположный тип структур / Opposite type of structures
0,901 и выше	Полная противоположность структур / The complete opposite of structures

сложные гидродинамические процессы, которые не всегда можно описать математической моделью, дающей результаты с достаточно высокой точностью. Существенным ограничением применения данной модели является предположение о параболической форме сечения русла. Кроме того, при экстремальных подъемах уровня воды, когда происходит затопление дельты Дона и рукава превращаются в один общий водоем, данная модель не может дать хорошего результата.

Предложенный математический подход позволяет достаточно точно аппроксимировать гидрологические параметры в узлах сопряжения. Предложенная математическая модель дает возможность учитывать распределения расходов воды по основным рукавам Дона при разных гидродинамических ситуациях. Проведенные расчеты подтвердили влияние резкого повышения уровня воды на поступление соленой воды из Таганрогского залива в дельту Дона, что может приводить к проникновению соленой воды вплоть до Ростова и Аксая. В то же время эта модель дает представление об общей тенденции развития процесса возможного осолонения дельты Дона при нагонных явлениях.

Важность изучения такого опасного явления, как нетипичные затоки соленых черноморских вод в дельту Дона, определяется необходимостью прогнозирования экстремальных наводнений и обеспечения безопасности населения азовского побережья. Предложенная нами модель может быть использована для прогноза таких явлений и принятия оперативных решений с целью создания устойчивого водоснабжения приморских городов.

Публикация подготовлена в части сбора и анализа данных об уровенном режиме и солености воды в рукавах Дона в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН № гр. проекта АААА-А18-118122790121-5, в части постановки задачи, разработки методов численного моделирования – в рамках научного проекта РФФИ 18-05-80010 «Исследование и прогноз опасных гидрометеорологических и геолого-геоморфологических процессов в районах функционирования стратегических объектов на Азово-Черноморском побережье (исторические и современные аспекты)». Расчеты выполнены на кластере Центра коллективного пользования Южного федерального университета «Высокопроизводительные вычисления».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Остроумова Л.П. 2017. Исследование нагонных и сгонных явлений в морских устьях рек на примере устьевой области р. Дон. *Метеорология и гидрология*. 12: 69–82.

2. Симов В.Г. 1989. *Гидрология устьев рек Азовского моря*. М., Гидрометеоиздат: 328 с.

3. Мишин Д.В., Полонский В.Ф. 2013. Исследование нестационарных водных потоков в неприливном устье реки Дон. *Труды государственного океанографического института*. 214: 166–179.

4. Матишов Г.Г., Григоренко К.С. 2017. Причины осолонения Таганрогского залива. *Доклады Академии наук*. 477(1): 92–96. doi: 10.7868/S086956521731019X

5. Матишов Г.Г., Ковалева Г.В., Ясакова О.Н. 2016. Аномальное осолонение в Таганрогском эстуарии и дельте Дона. *Наука Юга России*. 12(1): 43–50.

6. Матишов Г.Г., Григоренко К.С., Московец А.Ю. 2017. Механизмы осолонения Таганрогского залива в условиях экстремально низкого стока Дона. *Наука Юга России*. 13(1): 35–43. doi: 10.23885/2500-0640-2017-13-1-35-43

7. Матишов Г.Г., Чикин А.Л., Бердников С.В., Шевердяев И.В. 2014. Экстремальное наводнение в дельте Дона (23–24 марта 2013 г.) и факторы, его определяющие. *Доклады Академии наук*. 455(3): 342–345. doi: 10.7868/S0869565214090229

8. Матишов Г.Г. 2015. Случаи экстремальной адвекции соленых вод в дельту Дона и льда в Керченский пролив. *Доклады Академии наук*. 465(1): 99–103. doi: 10.7868/S0869565215310229

9. Чикин А.Л., Клещенков А.В., Чикина Л.Г. 2019. Численное исследование влияния расхода воды на уровенный режим в устьевой области Дона. *Морской гидрофизический журнал*. 35(4): 355–366. doi: 10.22449/0233-7584-2019-4-355-366

10. Воеводин А.Ф., Никифоровская В.С., Овчарова А.С. 1983. Численные методы решения задачи о неустановившемся движении воды на устьевых участках рек. *Труды Арктического и антарктического научно-исследовательского института*. 378: 23–34.

11. Роуч П. 1980. *Вычислительная гидродинамика*. М., Мир: 618 с.

12. Навигационный атлас единой глубоководной системы России. Том 8 (часть 2) – р. Дон от Волгодонска до устья. 2009. *DeckOfficer.ru*. URL: https://deckofficer.ru/titul/handbook/item/navigatsionnyj-atlas-edinoj-glubokovodnoj-sistemy-rossii (дата обращения: 21.03.2021).

13. *Мониторинг ЮНЦ РАН*. URL: http://meteo.ssc-ras.ru (дата обращения: 03.03.2021).

14. *Региональная статистика*. 2006. М., Финансы и статистика: 624 с.

REFERENCES

1. Ostroumova L.P. 2017. Investigation of surges in marine estuaries (A case study for the Don River mouth). *Russian Meteorology and Hydrology*. 42(12): 792–802. doi: 10.3103/S106837391712007X

2. Simov V.G. 1989. *Gidrologiya ust'ev rek Azovskogo morya*. [*Hydrology of the mouths of the rivers of the Sea of Azov*]. Moscow, Gidrometeoizdat: 328 p. (In Russian).

3. Mishin D.V., Polonskiy V.F. 2013. [Research of non-stationary water streams in nontidal mouth of Don River]. *Trudy gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta*. 214: 166–179. (In Russian).

4. Matishov G.G., Grigorenko K.S. 2017. Causes of salinization of the Gulf of Taganrog. *Doklady Earth Sciences*. 477(1): 1311–1315. doi: 10.1134/S1028334X17110034

5. Matishov G.G., Kovaleva G.V., Yasakova O.N. 2016. [Anomalous high salinity in the Taganrog bay estuary and the Don delta]. *Nauka Yuga Rossii*. 12(1): 43–50. (In Russian).

6. Matishov G.G., Grigorenko K.S., Moskovets A.Yu. 2017. [The salinization mechanisms in the Taganrog Bay under the conditions of the Don River extremely low runoff]. *Nauka Yuga Rossii*. 13(1): 35–43. (In Russian). doi: 10.23885/2500-0640-2017-13-1-35-43

7. Matishov G.G., Chikin A.L., Berdnikov S.V., Sheverdyaev I.V. 2014. The extreme flood in the Don River delta, March 23–24, 2013, and determining factors. *Doklady Earth Sciences*. 455(1): 360–363. doi: 10.1134/S1028334X14030295

8. Matishov G.G. 2015. Extreme saline water advection into the Don River delta and ice advections into Kerch strait. *Doklady Earth Sciences*. 465(1): 1154–1158. doi: 10.1134/S1028334X15110057

9. Chikin A.L., Kleshchenkov A.V., Chikina L.G. 2019. Numerical study of the water flow effect on the water level in the Don mouth. *Physical Oceanography*. 26(4): 316–325. doi: 10.22449/1573-160X-2019-4-316-325

10. Voevodin A.F., Nikiforovskaya V.S., Ovcharova A.S. 1983. [Numerical methods for solving the problem of unsteady water movement on river estuaries]. *Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta*. 378: 23–34 (In Russian).

11. Rouch P.J. 1976. *Fundamentals of Computational Fluid Dynamic*. Albuquerque, Hermosa Publishers: 446 p.

12. [Navigational atlas of the united deep-water system of Russia. Volume 8 (part 2) – the Don River from Volgodonsk to the mouth]. 2009. *DeckOfficer.ru*. Available at: https:// deckofficer.ru/titul/handbook/item/navigatsionnyj-atlas-edinojglubokovodnoj-sistemy-rossii (accessed 21 March 2021). (In Russian).

13. *Monitoring YuNTs RAN*. Available at: http://meteo.ssc-ras.ru (accessed 3 Mach 2021). (In Russian).

14. *Regional'naya statistika*. [*Regional statistics*]. 2006. Moscow, Finansy i statistika: 624 p. (In Russian).

Поступила 16.03.2021

УДК 57.045+57.047:67.017
DOI: 10.7868/S25000640210310

ВЛИЯНИЕ АБИОТИЧЕСКИХ И БИОТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ОБРАЗЦЫ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16 В ЗОНЕ СМЕШЕНИЯ МОРСКИХ И РЕЧНЫХ ВОД[1]

© 2021 г. Академик Г.Г. Матишов[1, 2], Н.И. Булышева[1], А.В. Клещенков[1], Г.Ю. Глущенко[1], К.В. Кренёва[1], К.С. Григоренко[1], А.В. Назаренко[1], Е.А. Варченко[3], А.А. Гончаров[3], А.В. Гладких[3]

Аннотация. С целью оценки коррозионной стойкости образцов алюминиевого сплава марки Д16 на двух станциях в устьевой области Дона проведены натурные стендовые испытания в период с декабря 2018 г. по декабрь 2019 г. Описан гидролого-гидрохимический режим акватории. Флуктуации ионного состава на участках проведения эксперимента зависели от объема речного стока, частоты и амплитуды сгонно-нагонных явлений и связанных с ними интрузий осолоненных вод при нагонах или падений уровня воды при сгонах. Условия среды воздействуют на экспериментальные пластины как непосредственно, так и опосредованно, через влияние на состав и структуру формирующегося сообщества обрастания.

Сукцессионный ход микрофитоперифитона на образцах Д16 в разных участках дельты р. Дон характеризовался двухпиковой кривой с максимумом на девятом месяце экспозиции. В структуре фитоперифитона на протяжении исследования преобладали диатомовые водоросли. Микрозооперифитон на экспериментальных пластинах представлен преимущественно инфузориями. С увеличением срока экспозиции была отмечена тенденция к увеличению доли колониальных и крупных сидячих видов инфузорий. Формирование сообществ макрообрастания начиналось на образцах, находящихся в воде более трех месяцев. Фонообразующими видами на пластинах, экспонировавшихся при полном погружении в течение 6 месяцев, являются мшанки *Fredericella sultana*, а через 9 и 12 месяцев – моллюски *Dreissena polymorpha.*

При испытаниях в воде образцов в течение 12 месяцев выявлено, что наибольшая площадь коррозионных поражений для сплава Д16 получена на станции 2 – 50 %, в то время как при испытаниях на станции 1 площадь коррозионных поражений не превышает 30 % от общей площади поверхности. По результатам определения состава продуктов коррозии на всех пластинах превалируют продукты окисления поверхности образцов, элементы, входящие в состав водной среды, а также элементы органического происхождения.

Ключевые слова: алюминиевый сплав Д16, коррозия, устьевая область Дона, зона смешения вод, гидроклиматические условия, сообщества обрастаний.

INFLUENCE OF ABIOTIC AND BIOTIC FACTORS ON SAMPLES OF D16 ALUMINUM ALLOY IN THE MIXING AREA OF SEA AND RIVER WATERS

Academician RAS G.G. Matishov[1, 2], N.I. Bulysheva[1], A.V. Kleshchenkov[1], G.Yu. Glushchenko[1], K.V. Kreneva[1], K.S. Grigorenko[1], A.V. Nazarenko[1], E.A. Varchenko[3], A.A. Goncharov[3], A.V. Gladkih[3]

Abstract. In order to assess the corrosion resistance of samples of aluminum alloy grade D16, full-scale bench tests were carried out at two stations in the Don River mouth area. Test period: December 2018 –

[1] Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: bulysheva@ssc-ras.ru

[2] Мурманский морской биологический институт Российской академии наук (Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17

[3] Геленджикский центр климатических испытаний им. Г.В. Акимова Всероссийского института авиационных материалов (G.V. Akimov Gelendzhik Climate Test Center of All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, Gelendzhik, Russian Federation), Российская Федерация, 353466, Краснодарский край, г. Геленджик, ул. Почтовая, 20

[1] **Оригинальный текст:** *Матишов Г.Г., Булышева Н.И., Клещенков А.В., Глущенко Г.Ю., Кренёва К.В., Григоренко К.С., Назаренко А.В., Варченко Е.А., Гончаров А.А., Гладких А.В.* Влияние абиотических и биотических факторов на образцы алюминиевого сплава Д16 в зоне смешения морских и речных вод // Наука Юга России. 2021. Т. 17. № 3. С. 80–93.

December 2019. During the research, the hydrological and hydrochemical regimes of the water area were described. Fluctuations of the ionic composition in the areas of the experiment depended on the volume of river runoff, the frequency and amplitude of surges and the associated intrusions of saline waters during surges or a drop in the water level during surges. It is shown that environmental conditions affect the experimental plates both directly and indirectly through the influence on the composition and structure of the forming fouling community.

The dynamics of microphytoperiphyton on samples D16 in different parts of the delta was characterized by a two-peak curve with a maximum at the nineth month after the beginning of the experiment. Diatoms predominated, which is typical of many water bodies. Microzooperiphyton on the experimental plates is represented mainly by ciliates. With an increase in the exposure period, there was a tendency to an increase in the proportion of colonial and large sessile ciliates. The formation of macro-fouling communities began on samples that have been in the water for more than three months. The dominating species on the plates exposed at full immersion for 6 months were bryozoans *Fredericella sultana*. After 9 and 12 months the mollusks *Dreissena polymorpha* were dominant.

When testing samples in water for 12 months, it was revealed that the largest area of corrosion damage for alloy D16 was obtained at Station 2 – 50 %, while during tests at Station 1 the area of corrosion damage does not exceed 30 % of the surface. According to the results of determining the composition of corrosion products on all plates, oxidation products of the samples surface, elements that make up the aqueous medium, and also elements of organic origin prevail.

Keywords: D16 aluminum alloy, corrosion, Don River estuary, water mixing zone, hydroclimatic conditions, fouling communities.

ВВЕДЕНИЕ

Алюминиевые сплавы благодаря ряду преимуществ (небольшой вес по сравнению со стальными конструкциями, стойкость к механическим ударам и т.д.) имеют широкий спектр применения в различных отраслях промышленности. В этой группе дюралюминий марки Д16 стоит особняком. По твердости и механической прочности он не уступает стали, но в отличие от нее обладает более легким удельным весом. Тем не менее этот сплав имеет один существенный недостаток – низкую коррозионную стойкость и нуждается в специальных антикоррозийных средствах защиты. Д16 широко используется в авиастроении, космической отрасли, нефтедобывающей промышленности и машиностроении. В последнее время изделия из сплавов такого типа в качестве конструкционных элементов начали широко применяться на промышленных объектах в различных климатических условиях (включая прибрежные районы), поэтому был проведен ряд экспериментов по изучению их характеристик в коррозионной среде [1]. В качестве коррозионной среды согласно ГОСТ 9.021-74 [2] использовался раствор состава: 30 г/л хлористого натрия + 10 мл/л соляной кислоты, плотность раствора 1,19 г/мл, температура 25–30 °С. Авторами работы [1] было выявлено, что в образцах после испытания в коррозионной среде возникающие механические напряжения ниже, чем в образцах, испытанных на воздухе.

Д16 находит применение и в судостроении при изготовлении конструкций, не соприкасающихся с морской атмосферой и водой, а также для корпусов клепаных речных катеров и настилов полов. Однако конструктивным элементам не всегда удается избежать контакта с коррозионной средой, к которой относятся морские и речные воды. Следует учитывать, что факторы внешней среды, такие как температура воздуха и воды, ионный состав, уровень минерализации, могут воздействовать на материалы как непосредственно, так и косвенно – они влияют на формирование сообществ обрастания на смачиваемых и погруженных поверхностях.

Главной особенностью воздействия морской среды на алюминиевые сплавы является ее повышенная агрессивность, ведущая к значительным коррозионным повреждениям [3]. При испытаниях на специальном научно-исследовательском судне, курсировавшем в тропических морях, было отмечено, что расслаивающая коррозия на образцах Д16Т, прикрепленных к днищу (полное погружение), вследствие сплошного обрастания образцов и формирования слоя минеральных отложений была меньше (0,7 мм), чем у экспонировавшихся на палубе (1,4 мм) [4]. При погружении образцов на глубину свыше 100 м в Черном море, где обрастание отсутствовало, скорость расслаивающей коррозии резко возрастала (>4 мм). По данным экспериментов, проводившихся в прибрежной зоне Черного моря, для сплава Д16Т установлено увеличение глубины межкристаллитной коррозии с

0,5 мм (3 месяца экспозиции) до сквозной коррозии (через 12 месяцев экспозиции) в зоне сопряжения поверхностей, с 0,06 до 0,22 мм – в зоне, свободной от сопряжения. Поверхность образцов по истечении 12 месяцев эксперимента была покрыта водорослями рода *Cystoseira* [5].

Помимо испытаний образцов Д16 в морской воде были проведены опыты по оценке коррозионной стойкости этого сплава с использованием природных пресных вод. В ходе эксперимента было выявлено, что наименьшая скорость коррозии наблюдалась по истечении 3 суток эксперимента, затем она нарастала [6].

Сведения о стойкости Д16 в зоне смешения морских и речных вод отсутствуют, поэтому целью исследований была оценка коррозионной устойчивости этого сплава в условиях натурного эксперимента в устьевой области Дона.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

На полигонах Южного научного центра Российской академии наук (станция 1 – береговая научно-экспедиционная база (БНЭБ) «Кагальник» (протока Свиное гирло); станция 2 – гидрометеопост (ГМП) «Донской» (рукав Старый Дон)) в устьевой области р. Дон 19.12.2018 г. на глубине 2 м были вертикально установлены стенды с экспериментальными пластинами площадью 15 × 15 см, изготовленными из алюминиевого сплава марки Д16 (рис. 1). По истечении 1, 3, 6, 9 и 12 месяцев экспозиции в воде часть образцов изымали, каждую пластину фотографировали с обеих сторон, помещали в отдельный контейнер с водой, в течение 10–15 минут доставляли в лабораторию на береговой базе для визуального осмотра и отбора пробы оброста.

Отбор и обработку организмов-обрастателей осуществляли в соответствии со стандартными гидробиологическими методиками [7]. При камеральной обработке живого материала сначала отбирали микрофито- и микрозооперифитон, затем макрозооперифитон.

Параметры воздушной и водной среды фиксировались в автоматическом режиме с дискретностью 10 минут. Соленость рассчитывали кондуктометрическим способом с использованием уравнения состояния морской воды УС-80 [8].

В течение периода наблюдений проводили отбор проб воды для определения ионного состава, pH, концентрации кислорода.

Исследование микроструктуры поверхности образцов, а также определение локального химиче-

Рис. 1. Карта-схема расположения экспериментальных станций и диаграммы ионного состава морских (*1*), речных (*2*) вод и вод зоны смешения (*3*).

Fig. 1. Schematic map of the location of experimental stations and diagrams of the ionic composition of sea waters (*1*), river waters (*2*) and waters of the mixing zone (*3*).

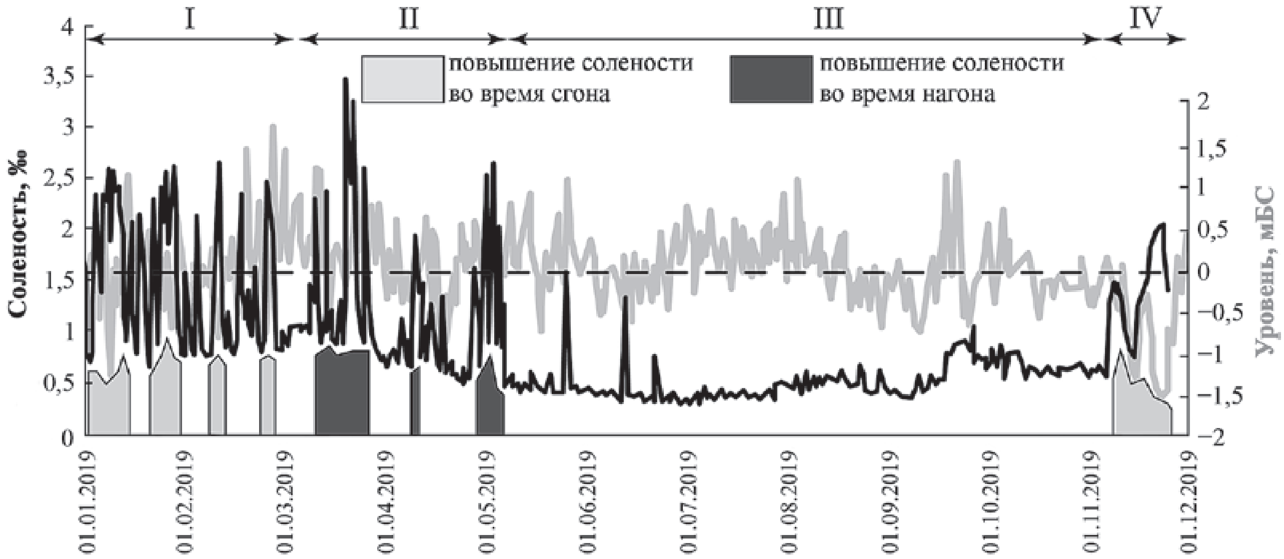


Рис. 2. Ход уровня воды и солености по данным гидрометпоста БНЭБ «Кагальник» в 2019 г.
Fig. 2. The course of the water level and salinity according to the data of the meteorological station of the Coastal Scientific Expedition Base "Kagal'nik" in 2019.

ского состава продуктов коррозии проводили в два этапа. На первом этапе исследования производили контроль качества экспериментальных пластинок на содержание в них сторонних компонентов. Результаты измерений показали, что используемые марки отвечают ГОСТам и не содержат посторонних примесей. На втором этапе провели элементный анализ экспериментальных пластинок на электронном сканирующем микроскопе Carl Zeiss EVO 40 с рентгеновской приставкой энергодисперсионного микроанализа INCA при увеличении ×400. Ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток пучка – 1 нА. Калибровку величины силы тока проводили на эталонном образце кобальта. Время накопления спектров составляло 50 с.

Определение твердости проводили по ASTM E2546-15 [9] по методу Виккерса. Твердость определяли алмазной пирамидкой по Виккерсу при нагрузке 100 Н и скорости нагружения 0,5 мм/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Термохалинная структура. Температура воды на участках проведения эксперимента в придонном слое в период с 19.12.2018 по 19.03.2019 г. менялась от 0 до +5 °С. Устойчивый весенний рост температуры отмечен с 28.02.2019 г. В период 20–30.03.2019 г. значения температуры колебались в районе +6 °С, 30.03–13.04.2019 г. наблюдали устойчивый рост температуры до +11 °С, после чего произошел ветровой сгон воды и температура понизилась до +5 °С. К началу июня вода прогрелась до +25 °С. Такая температура сохранялась до 27.06.2019 г.

Устьевая область Дона подвержена влиянию сгонно-нагонных явлений, при которых осолоненные воды Таганрогского залива могут подниматься на значительное расстояние вверх по течению реки. В настоящее время для данной территории характерно сложное сочетание пресных, слабосолоноватых и солоноватых вод: формируются шесть основных типов водных масс, часто наблюдается повышение солености (до 5 ‰), имеют место случаи инверсии стратификации вод, внедрения в солоноватые воды линз пресной воды [10].

В протоке Старый Дон отмечено свободное проникновение морских вод, тогда как южные рукава дельты Дона, в том числе Свиное гирло, во время ветровых сгонов практически полностью изолируются от речных вод Дона мелководными порогами и заполняются минерализованными водами р. Кагальник, которые имеют преимущественно сульфатно-кальциевый состав [11].

Увеличение солености на станции 2 связано только с нагонными явлениями. Для станции 1 в зимний период характерен повышенный фон солености (до 2,5 ‰), а максимальные значения фиксировались как при сгонах, так и при нагонах. Зарегистрированный максимум составил 3,4 ‰ 10.03.2019 г.

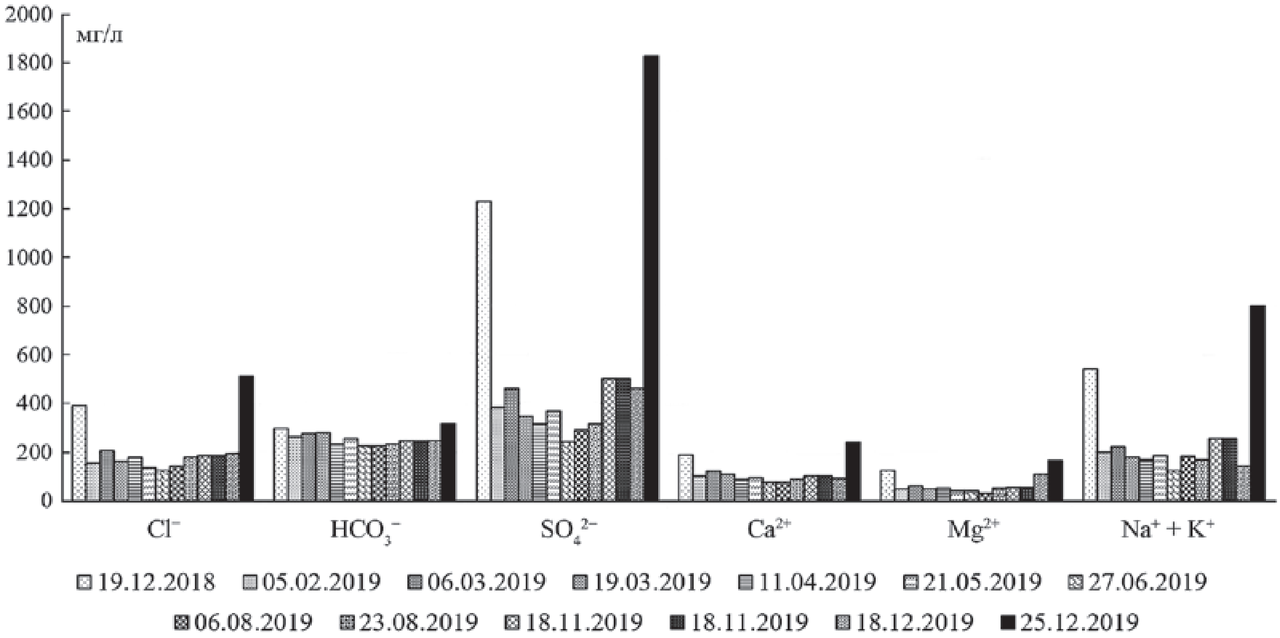


Рис. 3. Изменение ионного состава на участке экспозиции БНЭБ «Кагальник».
Fig. 3. Change in the ionic composition at the exposition area of the Coastal Scientific Expedition Base "Kagal'nik".

С 20.03 по 30.06.2019 г. зафиксировано четыре эпизода повышения минерализации. Три связаны со сгонами (18–20.05, 4–7.06, 13–16.06). Период 13–25.04 сопровождался переменным уровнем – от −0,5 до +0,5 мБС. Период I, 20–30.03 (рис. 2), охарактеризован частным заполнением Свиного гирла подземными водами, общим повышенным уровнем солености, сгонно-нагонными колебаниями уровня воды и стабильными показаниями температуры. В апреле (период II) начался весенний рост температуры при таком же нестабильном уровне воды и солености. Во время весенне-летнего сезона (период III) прекратились эпизоды заполнения водотоков минерализованными подземными водами, общий уровень солености понизился до фонового, сгонно-нагонный режим был нестабилен, температура возросла до 20 °C, после чего наступила летняя межень, температура достигла максимума, минерализация при нечастых и коротких сгонах держалась на минимальном уровне. Такой термохалинный режим сохранился в сентябре и октябре. Минимальный уровень воды наблюдался 20.11.2019 г., впоследствии протоки дельты Дона заполнились подземными минерализованными водами, что характерно для зимней межени (период IV) (рис. 2).

Гидрохимические условия. Флуктуации ионного состава в акватории проведения эксперимента зависели от объема речного стока, частоты и амплитуды сгонно-нагонных явлений и связанных с ними интрузий осолоненных вод при нагонах или падений уровня воды при сгонах. Весной, летом и осенью 2019 г. воды на станции 1 относились к сульфатному классу кальциевой группы с преобладанием в ионном составе сульфатов. Однако в условиях сгона 25.12.2019 г. по результатам отбора проб воды у БНЭБ «Кагальник» были отнесены к сульфатному классу натриевой группы [12] (рис. 3). Значения pH изменялись от 8,1 до 8,5.

На станции 2 в период с 19.12.2018 по 25.12.2019 г. воды были отнесены к гидрокарбонатному классу кальциевой группы. Минерализация воды в обследуемой акватории во второй половине 2019 г. сохранялась в пределах 1 г/л (рис. 4). Значения pH в период исследований изменялись в диапазоне 8,1–8,7.

В ходе проведения эксперимента особое внимание было уделено изучению сезонного изменения концентрации растворенного в воде кислорода как одного из факторов, влияющих на коррозионную активность среды. Фотосинтез водных растений, динамика вод увеличивают содержание O_2, снижают его разложение органических остатков, «цветение» водоема [13]. Степень насыщения воды растворенным кислородом в сочетании с соленостью может влиять на изменение скорости коррозии. Так, коррозия в воде с пониженной соленостью, но насыщенной кислородом (в устьях рек), более интенсивная, чем в морской воде с высоким содержанием Cl^-, но низким содержанием O_2 [13].

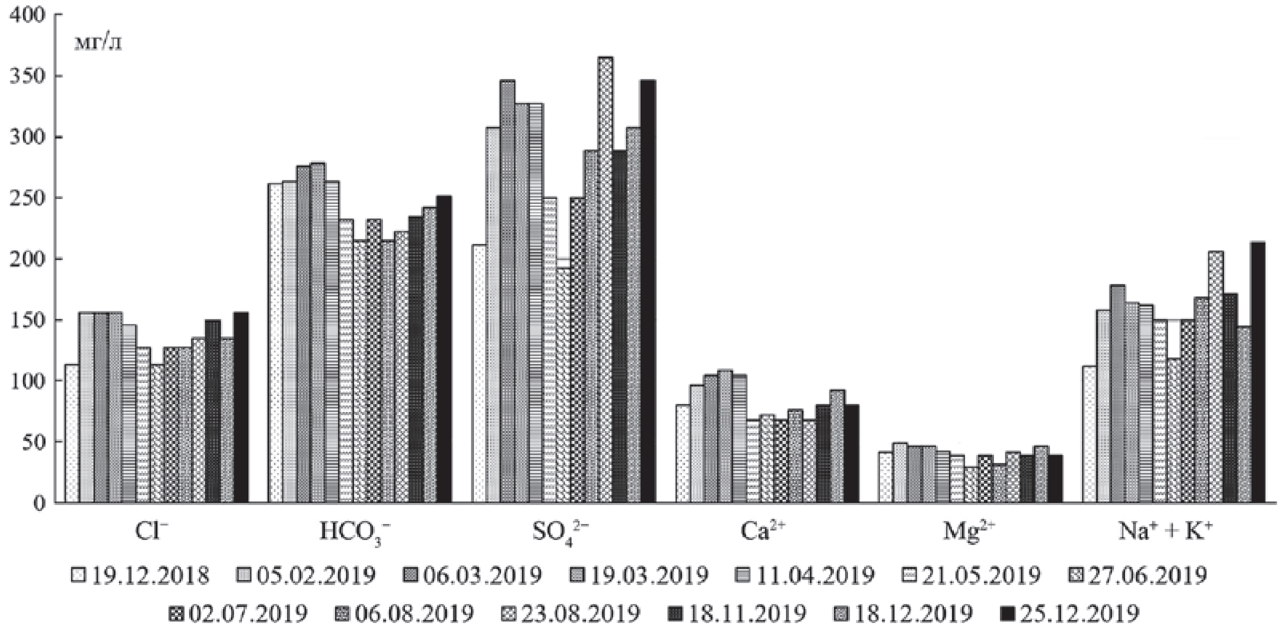


Рис. 4. Изменение ионного состава на участке экспозиции ГМП «Донской».
Fig. 4. Change in the ionic composition at the exposure area of the gauging station "Donskoy".

В пределах станции 1 в весенний период наблюдаются более благоприятные условия для развития фитопланктона – быстрое прогревание воды по сравнению со станцией 2, что приводит к продуцированию значительного количества кислорода, поступающего в водную толщу. Концентрации O_2 в воде на БНЭБ «Кагальник» достигают значений 13–14 мг/л, насыщение – 103–105 %, в то время как на ГМП «Донской» – 10–11 мг/л и насыщение 85–87 %. Дополнительным фактором выступает ослабленная гидродинамика в Свином гирле (скорость течения редко превышает 0,5–0,8 м/с), в то время как на станции 2 за время экспозиции неоднократно фиксировались скорости более 1,2 м/с. В летний период, с ростом температуры воды, концентрации O_2 снижаются на обеих станциях и достигают значений 5–9 мг/л (насыщение 66–96 %) на станции 1 и 5–10 мг/л (насыщение 60–119 %) на станции 2. На ГМП «Донской» кислородный режим подвержен меньшим колебаниям из-за лучшей гидродинамики и водообмена с прилегающими участками русла. В осенне-зимний период на станции 2 наблюдается более низкая температура воды; промывной режим русла способствует тому, что в данной акватории не накапливаются остатки отмерших водных растений и фитопланктона, поэтому концентрации кислорода здесь составляют 7,4–8,4 мг/л (насыщение 73–83 %). В то же время на станции 1 температура воды, как правило, на 2–3 °С выше, идет активное разложение отмирающих органических остатков в условиях пониженного водообмена с прилегающими участками русла, и, как следствие, концентрации кислорода здесь ниже – 7,3–6,8 мг/л (насыщение 78–67 %).

Условия среды (гидролого-гидрохимический режим, сезон, глубина и др.) определяют состав и структуру сообществ обрастания в каждой конкретной акватории.

Сообщества обрастания. В составе **фитоперифитона** на образцах Д16 было обнаружено 146 таксонов микроводорослей рангом ниже рода, относящихся к семи отделам. Большинство обнаруженных видов принадлежало диатомовым водорослям (49 %), в меньшей степени зеленым (29 %) и цианобактериям (13 %), и совсем незначительная доля от общего разнообразия была у эвгленовых (5 %), харовых (2 %), динофитовых и криптофитовых водорослей (по 1%). В основном данные виды являются типичными эпифитам и представителями бентоса, но также в составе были отмечены и планктонные формы.

По истечении 1 месяца экспозиции наиболее часто встречаемыми были представители перифитонной и бентосной флоры отдела Bacillariophyta в обоих районах наблюдения (виды родов *Navicula* Bory, 1822, *Staurosirella* Wiliams & Round, 1988, *Cymbella* cf. *lanceolata* (C. Agardh) Kirchner). Биомасса и численность микрофитоперифитона на пластинах Д16 на станции 1 были 0,04 мкг/см² и

Таблица 1. Изменения количественных характеристик фито- и микрозооперифитона в течение 1, 3, 6, 9 и 12 месяцев экспозиции
Table 1. Changes in the quantitative characteristics of phytoperiphyton and microzooperiphyton during 1, 3, 6, 9 and 12 months of exposure

Срок экспозиции Exposure period	Биомасса (мкг/см²) Biomass (μg/cm²)		Численность (кл./см²) Density (cells/cm²)		Количество видов Number of species	
	Кагальник Kagal'nik	Донской Donskoy	Кагальник Kagal'nik	Донской Donskoy	Кагальник Kagal'nik	Донской Donskoy
1 месяц экспозиции / 1 month of exposure						
Фитоперифитон Phytoperiphyton	0,04	0,19	26	85	17	21
Микрозооперифитон Microzooperiphyton	0,03	0,40	2	12	4	7
3 месяца экспозиции / 3 months of exposure						
Фитоперифитон Phytoperiphyton	0,22	1,18	116	387	22	18
Микрозооперифитон Microzooperiphyton	–	2,40	–	111	–	5
6 месяцев экспозиции / 6 months of exposure						
Фитоперифитон Phytoperiphyton	0,12	0,42	53	109	27	27
Микрозооперифитон Microzooperiphyton	3,90	1,20	105	13	17	6
9 месяцев экспозиции / 9 months of exposure						
Фитоперифитон Phytoperiphyton	0,32	1,42	235	234	54	33
Микрозооперифитон Microzooperiphyton	0,80	0,50	14	8	6	5
12 месяцев экспозиции / 12 months of exposure						
Фитоперифитон Phytoperiphyton	0,37	0,69	84	171	31	25
Микрозооперифитон Microzooperiphyton	1,70	8,40	52	706	14	8

26 кл./см², число видов – 17; на станции 2 – 0,19 мкг/см² и 85 кл./см², число видов – 21 (табл. 1).

Спустя 3 месяца на экспериментальных пластинах в перифитоне продолжали преобладать диатомовые водоросли. Доминантный комплекс был схожим в обоих районах экспозиции. Преобладающие виды: *Navicula* spp., *Nitzschia sigmoidea* (Nitzsch) Smith, *Cymbella* cf. *lanceolata*, *Cymatopleura solea* (Brébisson) Smith. Увеличились показатели биомассы и численности (табл. 1).

Спустя еще 3 месяца на пластинах Д16 было отмечено резкое снижение количественных показателей (табл. 1), при этом доминирование сохранялось за диатомовыми водорослями.

По истечении 6 месяцев экспозиции отмечено изменение видового состава фитоперифитона. Произошло относительное снижение обилия прикрепленных диатомовых водорослей, отмечены различия в доминирующих комплексах разных районов. Общее количество встреченных на пластинах Д16 видов было равным в разных акваториях (по 27 видов), но доминантами были следующие диатомовые водоросли: на станции 1 преобладали *Cyclotella meneghiniana* Kützing, *Staurosirella* sp., виды рода *Cymbella* Agardh, 1830; на станции 2 – *Navicula lanceolata* Ehrenberg, *Gyrosigma* sp., *Surirella* cf. *brebissonii* Krammer & Lange-Bertalot, *Melosira varians* Agardh.

Через 9 месяцев от начала эксперимента отмечено увеличение количественных показателей и видового разнообразия микроводорослей (табл. 1). Комплексы доминирующих видов на станциях отличались, но при этом в каждом районе среди фитоперифитона были обнаружены в большом количестве и представители планктона. На станции 1 доминировали *Pinnularia* sp. и планктонные виды *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen из диатомовых водорослей и *Snowella lacustris* (Chodat) Komárek & Hindák из цианобактерий. На станции 2 ядро доминирующих видов было представлено диатомовыми водорослями *Nitzschia sigmoidea*, *Gyrosigma* sp. и планктонными представителями *Melosira varians* Agardh из отдела Bacillariophyta и *Microcystis flosaquae* (Wittrock) Kirchner из отдела Cyanobacteria.

По истечении 12 месяцев экспозиции на пластинах Д16 в обоих районах исследования в целом отмечали уменьшение количественных показателей (табл. 1). Основу биомассы составили немногочисленные крупноклеточные диатомовые (*Cymbella* cf. *lanceolata* на станции 1 и виды рода *Gyrosigma* Hassall, 1845 и *Bacillaria paxillifera* (Müller) Marsson на станции 2). В обоих районах исследования развитие микрофитоперифитона имело выраженную сезонную динамику, которую можно представить в виде кривой с двумя пиками значений численности и биомассы в марте и сентябре – октябре. К шестому месяцу эксперимента, в июне, наблюдали снижение количественных показателей в 2–2,8 раза, которое, вероятно, было вызвано не только сезонной сукцессией, но и воздействием интенсивного пресса фитофагов, заселивших к этому времени образцы. К девятому месяцу экспозиции биомасса и численность вновь увеличились в 2,7–3,4 раза, имея более выраженный второй пик, в котором значительная доля принадлежит осевшим на пластины представителям летне-осенней планктонной флоры. В декабре из-за понижения температуры воды и, как следствие, начала отмирания большинства микроводорослей наблюдали снижение количественных показателей фитоперифитона. Сравнивая развитие микрообрастаний в двух районах исследования, следует отметить, что на станции 2 на протяжении всей экспозиции количественные показатели были выше, чем на станции 1, при этом доминантные комплексы этих акваторий были схожими только в течение первых трех месяцев. В формировании структуры фитоперифитона в течение всего периода исследования преобладали диатомовые водоросли, что является типичным для многих водоемов [14], и только в октябре им содоминировали цианобактерии, что было связано с сезонной сукцессией.

Микрозооперифитон на экспериментальных пластинах представлен преимущественно инфузориями. Всего за время исследования на образцах Д16 было обнаружено 43 вида и формы инфузорий, из них 30 видов на пластинах на станции 1 и 27 видов – на станции 2. Наибольшая частота встречаемости в течение всего времени экспозиции на пластинах на станции 1 наблюдалась для таких видов, как *Vorticella campanula* Ehrenberg, 1831 и еще нескольких видов вортицелл, относящихся к группе «*Convallaria*», для *Epistilis* sp., для *Stentor roeseli* Ehrenberg, 1835 и мелкой гипотрихиды *Aspidiska* spp. На пластинах на станции 2 состав комплекса массовых видов немного отличался. Здесь наряду с уже упоминавшимися *Vorticella campanula* Ehrenberg, 1831 и *Stentor roeseli* Ehrenberg, 1835 наибольшая частота встречаемости и уровень развития были у таких видов, как *Carchesium polypinum* Linnaeus, 1758 и *Zoothamnium* sp. Несмотря на общий комплекс массовых видов, уровень включения фаун довольно низок: коэффициент Жаккара – 0,33, коэффициент Серенсена – 0,49.

С увеличением срока экспозиции наблюдалась тенденция к увеличению доли колониальных и крупных сидячих видов инфузорий на пластинах, что приводит к усложнению архитектоники поверхности, увеличивая ярусность и создавая дополнительные поверхности для прикрепления других видов организмов. На колониях было обнаружено значительное количество эпибионтных видов инфузорий – *Cothurnia annulata* Stokes, 1885, *Vorticella* spp., *Pyxicola* spp.

На пластинах, расположенных на станции 1, видовое разнообразие в течение всего времени экспозиции было выше, чем на пластинах на станции 2. Количество видов на пластинах на станции 1 варьировало от 4 до 17, в среднем – 10 видов, на станции 2 – от 5 до 8 видов, в среднем 6. Минимальные значения были отмечены на пластинах 1- и 3-месячной экспозиции, максимальные – на пластинах 6- и 12-месячной экспозиции (табл. 1).

Численность перифитонных инфузорий на образцах на станции 1 колебалась от 2 до 105 кл./см^2 (в среднем 43,2 ± 23,1 кл./см^2), на станции 2 – от 8 до 706 кл./см^2 (в среднем 170 ± 131,5 кл./см^2). Наименьшие значения численности были отмечены на пластинах экспозиции сроком 1 и 9 месяцев, наибольшие – на пластинах, экспонировавшихся в течение 6 и 12 месяцев (табл. 1).

Биомасса перифитонных инфузорий на пластинах, расположенных на станции 1, колебалась от 0,03 до 3,9 мкг/см^2 (в среднем 1,5 ± 0,82 мкг/см^2), на станции 2 – от 0,4 до 8,4 мкг/см^2 (в среднем 2,3 ± 1,53 мкг/см^2). Наименьшие значения численности в обоих случаях были отмечены на пластинах сроком экспозиции 1 месяц, а наибольшие – на пластинах со сроком 6 (станция 1) и 12 месяцев (станция 2) (табл. 1).

Динамика количественных характеристик перифитонного сообщества инфузорий на пластинах, как и фитоперифитон, имела два выраженных пика развития. Повышение количественных характеристик по истечении 12 месяцев экспозиции наблюдалось на обеих станциях. Однако первый пик развития по станциям не совпадал. На станции 1 он отмечен после 6 месяцев экспозиции, а на станции 2 – через 3 месяца. Вероятно, широкий диапазон показателей был обусловлен сильным влиянием сгонно-нагонных явлений и, как следствие, изменениями уровня минерализации вод в районе постановки эксперимента.

Макрообрастание. По истечении первого месяца экспозиции на экспериментальных пластинах макроорганизмы отсутствовали. Через 3 месяца от начала эксперимента на образцах, экспонировавшихся в воде на станции 2, были отмечены единичные особи двустворчатого моллюска *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771), формирующие друзовые сообщества в устье и дельте Дона (табл. 2).

На пластинах, экспонировавшихся в течение полугода, отмечен резкий рост показателей по сравнению с предыдущим этапом эксперимента. На обеих станциях по численности доминировали мшанки *Fredericella sultana* (Blumenbach, 1779) (Bryozoa: Phylactolaemata). Известно, что мшанки являются одними из наиболее опасных организмов-обрастателей для металлов, погруженных в воду, так как, плотно прикрепляясь к поверхности известковыми домиками, могут повреждать ее [13]. В большом количестве на пластинах присутствовала молодь *Dreissena polymorpha* и ракообразные *Corophium volutator* (Pallas, 1766), формирующие специфические корофиидные илы. Максимальное проективное покрытие обрастателей зафиксировано на станции 2 – до 80 %. Основной вклад в биомассу на станции 1 вносили единичные крупные брюхоногие моллюски *Viviparus viviparus* (Linnaeus, 1758), на станции 2 – *Dreissena polymorpha*.

По истечении 9 месяцев зафиксировано возрастание количественных показателей макрообрастателей на обеих станциях (табл. 2). Наибольший вклад как в биомассу (до 90 %), так и в численность (до 71 %) на обеих станциях вносили моллюски *D. polymorpha*. Численность мшанок значительно сократилась.

В ходе обследования образцов, находящихся в воде в течение 12 месяцев на станции 1, отмечено снижение численности в 1,2, биомассы в 2,7 раза по сравнению с данными, полученными после 9 месяцев экспозиции. На станции 2 показатели снизились в 1,7 и 1,5 раза соответственно. Мшанки и гидроиды на экспериментальных пластинах в этот период отсутствовали. Доминирующим видом по-прежнему выступали моллюски *D. polymorpha.*

В период 15–26.11.2019 г. в р. Дон и в Таганрогском заливе Азовского моря был зафиксирован экстремальный сгон. Падение уровня Дона на некоторых участках превышало 2 м. Температура воздуха в эти дни опускалась до −11 °С. Экспериментальные установки оказались в зоне падения уровня воды, частично оголились и подвергались воздействию отрицательных температур, однако это явление не вызвало массовой гибели организмов, формирующих сообщества обрастания. Вероятно, это

Таблица 2. Изменения количественных характеристик сообществ макрообрастания в течение 1, 3, 6, 9 и 12 месяцев экспозиции
Table 2. Changes in the quantitative characteristics of macro-fouling organisms during 1, 3, 6, 9 and 12 months of exposure

Срок экспозиции Exposure period	Биомасса (г/м²) Biomass (g/m²)		Численность (экз/м²) Density (ind/m²)		Количество видов Number of species	
	Кагальник Kagal'nik	Донской Donskoy	Кагальник Kagal'nik	Донской Donskoy	Кагальник Kagal'nik	Донской Donskoy
1 месяц экспозиции 1 month of exposure	–	–	–	–	–	–
3 месяца экспозиции 3 months of exposure	–	0,04	–	44	–	1
6 месяцев экспозиции 6 months of exposure	195,05	55,66	2304	11740	5	7
9 месяцев экспозиции 9 months of exposure	240,68	357,76	4444	35244	6	6
12 месяцев экспозиции 12 months of exposure	90,29	233,29	5456	20856	5	5

Таблица 3. Результаты измерений твердости по Виккерсу (HV) образцов Д16 в исходном состоянии и после 3, 6, 9, и 12 месяцев экспозиции
Table 3. The results of measuring the Vickers hardness (HV) of D16 samples in the initial state and after 3, 6, 9 and 12 months of exposition by stations

Условия экспозиции Exposure conditions	3 месяца 3 months	6 месяцев 6 months	9 месяцев 9 months	12 месяцев 12 months
Исходные данные / Initial data	140,75	140,75	140,75	140,75
Кагальник / Kagal'nik	137,50	135,25	134,75	134,25
Донской / Donskoy	137,25	136,00	135,75	135,50

связано с тем, что к моменту экстремального сгона на пластинах сформировалось сообщество с многослойной структурой, характеризующееся относительной стабильностью.

В целом сезонная динамика показателей макрообрастателей на экспериментальных пластинах соответствует общей закономерности: максимальна в теплое время года и резко снижается в позднеосенний и зимний периоды с поправкой на природные явления (колебания температуры и солености, сгоны и т.д.). Плотность поселения макроорганизмов на станции 2 была выше в 3,8–7,9 раза, чем на станции 1, в течение 6–12 месяцев эксперимента.

Оценка коррозионной стойкости металлических образцов при проведении натурных климатических испытаний. Проведены металлографические исследования с оценкой глубины межкристаллитной и питтинговой коррозии образцов алюминиевого сплава Д16. Через 3 месяца эксперимента глубина межкристаллитной коррозии сплава Д16 достигла значительной величины и на станции 1 составила 0,7, на станции 2 – 0,941 мм.

После 6 месяцев экспозиции на БНЭБ «Кагальник» глубина питтинговой коррозии образцов сплава Д16 составила 0,815 мм, на ГМП «Донской» носила сквозной характер, глубина межкристаллитной коррозии – 0,790 и 0,941 мм соответственно.

Для пластин, находившихся в воде в течение 9 месяцев, глубина питтинговой коррозии на обеих станциях носила сквозной характер, глубина межкристаллитной коррозии – 0,800 мм (станция 1) и 0,965 мм (станция 2).

При испытаниях в воде образцов в течение 12 месяцев выявлено, что наибольшая площадь коррозионных поражений для сплава Д16 получена на ГМП «Донской» – 50 %, в то время как при испытаниях на БНЭБ «Кагальник» площадь коррозионных поражений не превышает 30 % поверхности. Результаты металлографических исследований показали, что значения после 12 месяцев экспозиции на БНЭБ «Кагальник» и ГМП «Донской» остались на уровне 9-месячных значений: глубина питтинговой коррозии образцов сплава Д16 носила сквозной характер, глубина межкристаллитной коррозии – 0,810 и 0,981 мм соответственно.

Оценка изменения твердости поверхности образцов показала, что снижение этого показателя для пластин, экспонировавшихся в воде в течение 3 месяцев во всех условиях, незначительно и составляет около 2,3 % (табл. 3).

Изменение показателя твердости для образцов Д16 через 12 месяцев эксперимента на обеих станциях осталось на уровне 6- и 9-месячных значений и не превысило 6,4 % (табл. 3).

В составе продуктов коррозии, снятых с образцов Д16 после 3-месячной экспозиции в воде на ГМП «Донской» и БНЭБ «Кагальник», на поверхности обнаружены в основном алюминий, кислород и сера, а также кремний, натрий, калий (спектры 19, 42) (рис. 5, 6). На поверхности пластин, экспонировавшихся в течение 6 месяцев, помимо обнаруженных ранее отмечен кальций (спектры 31 и 3) (рис. 5, 6). После 9 месяцев экспозиции на обеих станциях в составе продуктов коррозии обнаружены продукты окисления поверхности, о чем свидетельствуют пики кислорода и алюминия. В большом количестве представлены кремний и фосфор, а также элементы, входящие в состав вод зоны проведения эксперименты: кальций, магний, калий (рис. 5, 6).

После 12 месяцев экспозиции в составе продуктов коррозии под слоем биообрастателей помимо продуктов окисления поверхности (кислорода и алюминия) обнаружены элементы коррозионно-активной среды – хлор и сера, а также частицы органического происхождения.

ВЫВОДЫ

Гидрохимические условия акватории проведения эксперимента определялись взаимодействием речных и морских факторов при формировании гидролого-гидрохимического режима. Речные факторы были представлены объемом речного стока, морские – частотой и амплитудой сгонно-нагонных явлений и связанными с ними интрузиями осолоненных вод при нагонах или падением уровня воды при сгонах. Стоит отметить, что знакопеременные колебания уровня в отдельные периоды формировали на исследуемых участках высокие скорости течений, что следует рассматривать как один из

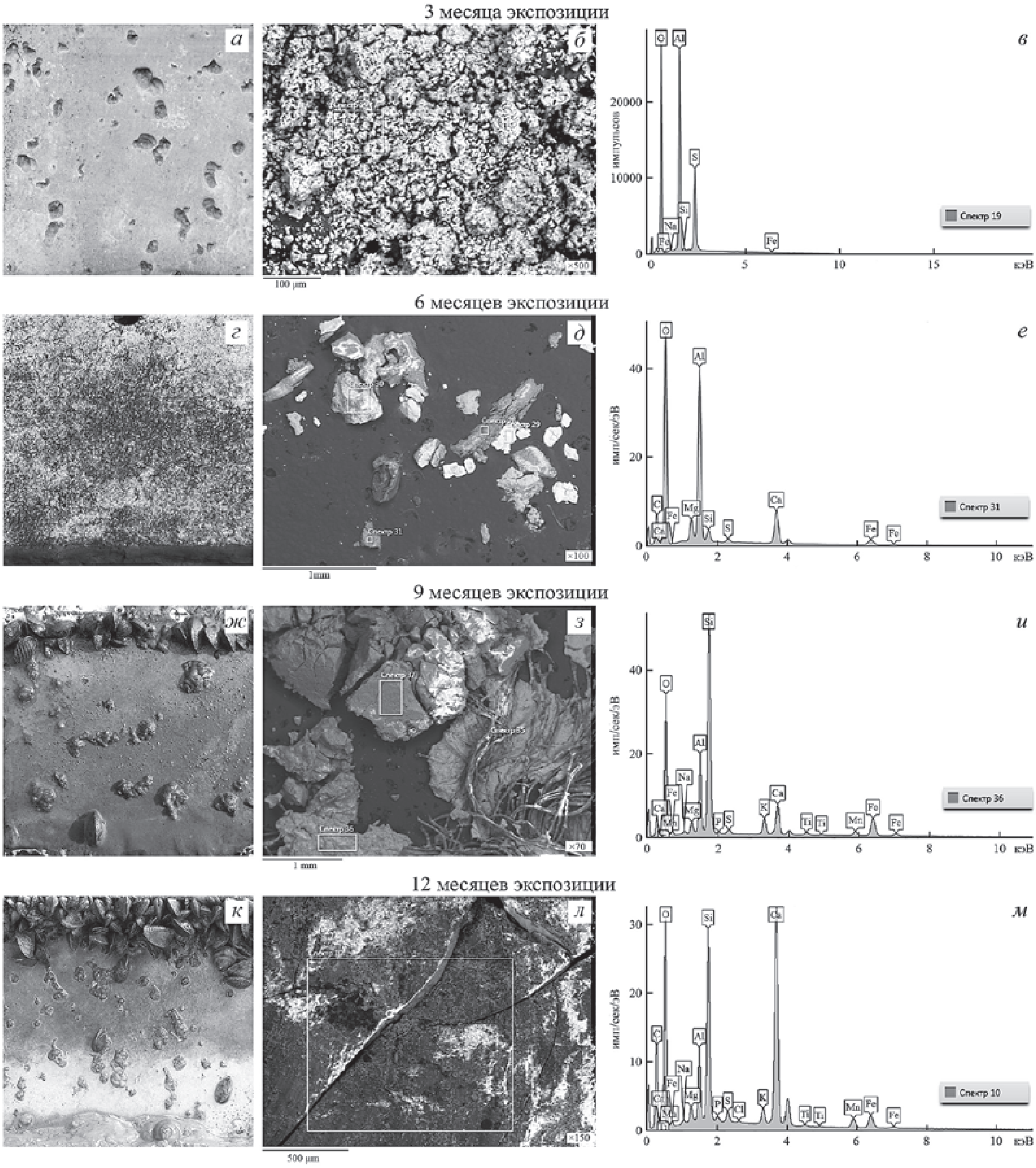


Рис. 5. Анализ состава продуктов коррозии образца Д16, БНЭБ «Кагальник»: *а, г, ж, к* – внешний вид образца; *б, д, з, л* – микроструктура; *в, е, и, м* – локальный химический состав.
Fig. 5. Analysis of the composition of corrosion products of sample D16, Coastal Scientific Expedition Base “Kagal’nik”: *а, г, ж, к* – sample photo; *б, д, з, л* – microstructure; *в, е, и, м* – local chemical composition.

факторов, обусловливающий интенсификацию коррозии за счет разрушения слоя продуктов коррозии и притока кислорода, а также как фактор, влияющий на организмы-обрастатели.

По истечении 12 месяцев эксперимента можно сделать вывод, что сообщество обрастания в районе смешения речных и морских вод представляет собой многовидовой биоценоз, схема развития ко-

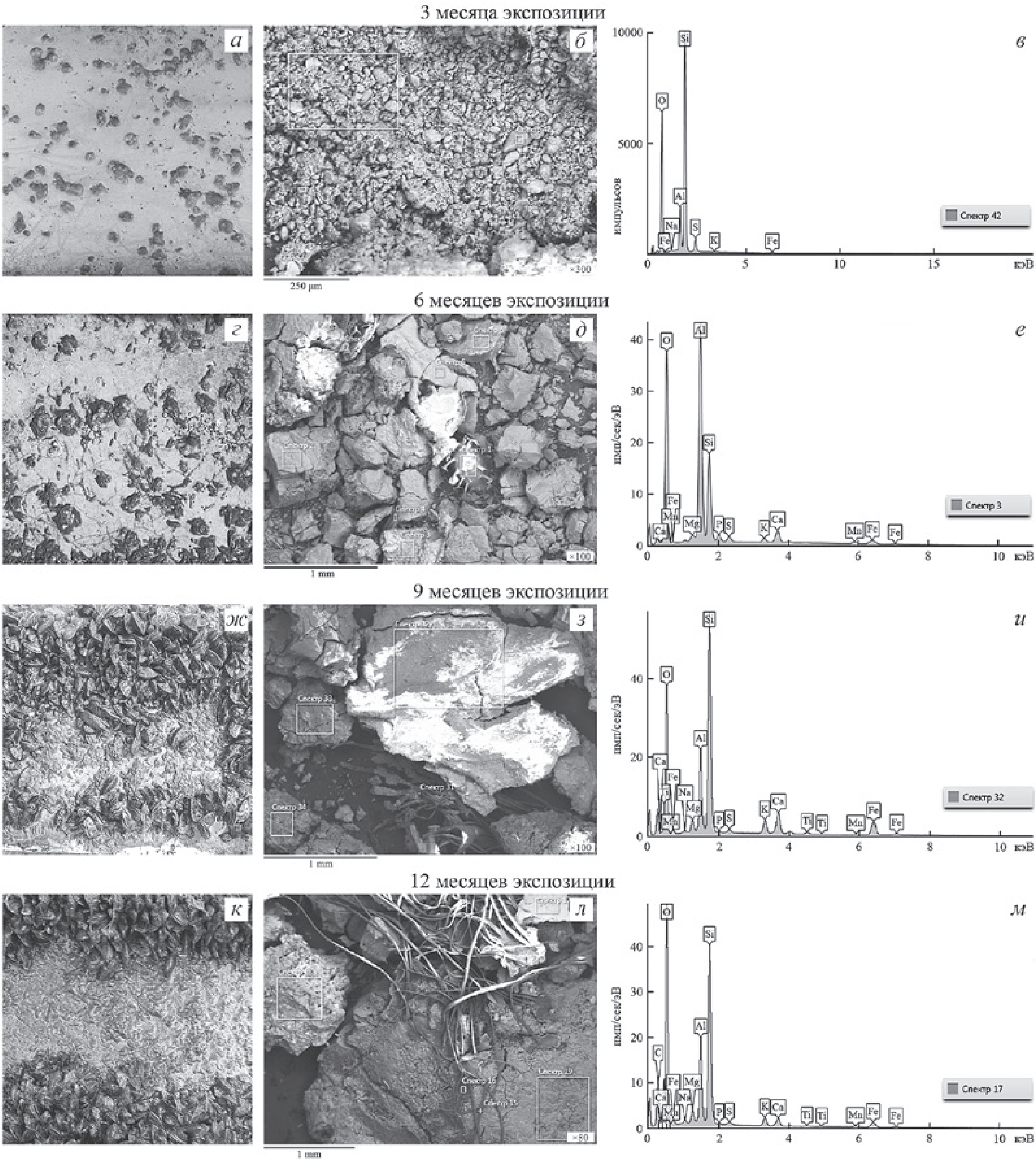


Рис. 6. Анализ состава продуктов коррозии образца Д16, ГМП «Донской»: *а, г, ж, к* – внешний вид образца; *б, д, з, л* – микроструктура; *в, е, и, м* – локальный химический состав.

Fig. 6. Analysis of the composition of corrosion products of sample D16, gauging station "Donskoy": *а, г, ж, к* – sample photo; *б, д, з, л* – microstructure; *в, е, и, м* – local chemical composition.

торого схожа с классической [15]: в начале наблюдений отмечали микрообрастания, состоящие из микробно-диатомовой пленки и цилиосообщества, затем появлялись пионерные макрообрастатели, которые позже замещались постоянными макроорганизмами-обрастателями.

Сукцессионный ход микрофитоперифитона на образцах Д16 в разных участках дельты р. Дон характеризуется двухпиковой кривой с максимумом на девятом месяце экспозиции. На протяжении всего исследования формирование альгоценозов на экспериментальных пластинах в обоих районах связано с доминированием диатомовой флоры. Для микрозоoперифитона также выявлено два пика численности и биомассы. Максимальные значения отмечены на станции 1 через 6, а на станции 2 – через 12 месяцев от начала эксперимента. Отмеченные количественные и качественные различия в развитии микрообрастаний связаны с гидролого-гидрохимическими особенностями сравниваемых акваторий.

Формирование сообществ макрообрастания начинается на образцах, находящихся в воде более 3 месяцев. На пластинах, находящихся в воде в течение 6 месяцев, отмечается высокая плотность поселения мшанок. Моллюски рода *Dreissena*, доминирующие на экспериментальных пластинах 9- и 12-месячного срока экспозиции, рассматриваются как наиболее опасные организмы-обрастатели в пресных водоемах. При этом согласно опубликованным данным [4] сплошное сообщество обрастания является основной причиной торможения коррозионного процесса алюминиевых сплавов на небольших глубинах.

В ходе исследований выявлено, что на протяжении всего периода экспозиции наибольшая глубина коррозионных поражений для сплава Д16 была отмечена уже в первые 3 месяца экспозиции, а после 6 месяцев испытаний носила сквозной характер.

По результатам определения состава продуктов коррозии, на всех пластинах превалируют продукты окисления поверхности образцов (кислород – алюминий), элементы, входящие в состав солей водной среды мест экспозиции (кальций, калий, натрий, магний), а также элементы органического происхождения: кремний, кислород, кальций и волокнистые структуры на углеродной основе.

Сложный состав природных вод и сформировавшееся обрастание не позволяют однозначно оценить влияние отдельных компонентов на скорость коррозии. Микро- и макрообрастания могут как повысить, так и снизить коррозионные процессы. Например, фитоперифитон способствует увеличению коррозии, как и мозаичное прикрепление макрообрастателей [13], а развитие сплошного слоя макрообрастателей и защитного карбонатного остатка способствует торможению коррозионного процесса. Помимо этого известно, что скорость коррозии снижается при формировании на поверхности слоя из продуктов коррозии. Возможно, наметившуюся тенденцию к торможению скорости коррозии, отмеченную для образцов, находившихся в воде в течение 12 месяцев, можно объяснить совокупностью ряда факторов: снижение концентрации растворенного кислорода, уменьшение численности фитоперифитона, формирование на поверхности слоя из продуктов коррозии, развитие сообщества макрообрастания.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 18-29-05078 мк и темы НИР ГЗ ЮНЦ РАН № АААА-А18-118122790121-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шаклеина В.А., Замятин В.М. 2010. Влияние коррозионной среды на неоднородность пластических деформаций в микроструктуре алюминиевого сплава Д16. *Металловедение и термическая обработка металлов.* 1: 37–45.
2. *ГОСТ 9.021-74. Единая система защиты от коррозии и старения. Алюминий и сплавы алюминиевые. Методы ускоренных испытаний на межкристаллитную коррозию.* 1993. М., Издательство стандартов: 6 с.
3. Синявский В.С., Вальков В.Д., Калинин В.Д. 1986. *Коррозия и защита алюминиевых сплавов.* М., Металлургия: 368 с.
4. Синявский В.С., Калинин В.Д. 2005. Коррозия и способы защиты алюминиевых сплавов в морской воде соответственно их составу и структуре. *Защита металлов.* 41(4): 347–359.
5. Варченко Е.А., Курс М.Г. 2018. Щелевая коррозия алюминиевых сплавов и нержавеющих сталей в морской воде. *Труды ВИАМ.* 7(67): 96–105. doi: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-96-105
6. Тагирли Г.М., Вердиев С.Ч., Агаларова Т.М., Велиева С.М., Ширинов Т.И., Джафарова С.З. 2017. Коррозионное поведение некоторых металлов и сплавов в пресных природных водах. *Kimya problemləri.* 1: 98–105.
7. *Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений.* 1983. Л., Гидрометеоиздат: 239 с.
8. Мамаев О.И. 1987. *Термохалинный анализ вод Мирового океана.* Л., Гидрометеоиздат: 296 с.
9. ASTM E2546-15. 2015. *Standard Practice for Instrumented Indentation Testing, ASTM International, West Conshohocken, PA.* URL: https://www.astm.org (дата обращения: 25.03.2020). doi: 10.1520/E2546-15

10. Матишов Г.Г., Григоренко К.С. 2017. Причины осолонения Таганрогского залива. *Доклады Академии наук*. 477(1): 92–96. doi: 10.7868/S086956521731019X

11. Матишов Г.Г., Григоренко К.С. 2018. Маловодье и роль грунтовых вод в осолонении авандельты Дона. *Доклады Академии наук*. 483(4): 444–448. doi: 10.31857/S086956520003284-5

12. Матишов Г.Г., Булышева Н.И., Клещенков А.В. 2020. Особенности динамики оседания макрообрастателей на экспериментальные пластины в зоне смешения речных и морских вод. В кн.: *КЛИМАТ-2020: Современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы (10–11 сентября 2020 г., Москва)*. М., изд-во ВИАМ: 285–295.

13. Карпов В.А., Ковальчук Ю.Л., Полтаруха О.П., Ильин И.Н. 2007. *Комплексный подход к защите от морского обрастания и коррозии*. М., Товарищество научных изданий КМК: 152 с.

14. Беляева П.Г. 2002. Фитоперифитон среднего течения р. Сылва (бассейн Камы). В кн.: *Материалы XII международной конференции молодых ученых «Биология внутренних вод: проблемы экологии и биоразнообразия» (Борок, 23–26 сентября 2002 г.)*. Борок, изд-во Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН: 3–10.

15. Scheer B.T. 1945. The development of marine fouling communities. *The Biological Bulletin*. 89(1): 103–121. doi: 10.2307/1538088

REFERENCES

1. Shakleina V.A., Zamyatin V.M. 2010. Effect of corrosion medium on the nonuniformity of plastic microstrains in the microstructure of D16 aluminum alloy. *Metal Science and Heat Treatment*. 52: 25–31. doi: 10.1007/s11041-010-9225-6

2. *GOST 9.021-74. Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Alyuminiy i splavy alyuminievye. Metody uskorennykh ispytaniy na mezhkristallitnuyu korroziyu*. [*Unified system of protection against corrosion and aging. Aluminum and aluminum alloys. Accelerated test methods for intergranular corrosion*]. 1993. Moscow, Izdatel'stvo standartov: 6 p. (In Russian).

3. Sinyavskiy V.S., Val'kov V.D., Kalinin V.D. 1986. *Korroziya i zashchita alyuminievykh splavov*. [*Corrosion and protection of aluminum alloys*]. Moscow, Metallurgiya: 368 p. (In Russian).

4. Sinyavskiy V.S., Kalinin V.D. 2005. Marine corrosion and protection of aluminum alloys according to their composition and structure. *Protection of Metals*. 41(4): 317–328.

5. Varchenko E.A., Kurs M.G. 2018. [Crevice corrosion of aluminum alloys and stainless steel in marine water]. *Trudy VIAM*. 7(67): 96–105. (In Russian). doi: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-96-105

6. Tagirli G.M., Verdiev S.Ch., Agalarova T.M., Valiyeva S.M., Shirinov T.I., Jafarova S.Z. 2017. [Corrosion behavior of some metals and alloys in fresh natural waters]. *Kimya problemləri*. 1: 98–105. (In Russain).

7. *Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza poverkhnostnykh vod i donnykh otlozheniy*. [*Guidance on methods of hydrobiological analysis of surface water and bottom sediments*]. 1983. Leningrad, Gidrometeoizdat: 239 p. (In Russian).

8. Mamaev O.I. 1987. *Termokhalinnyy analiz vod Mirovogo okeana*. [*Thermohaline analysis of the waters of the World Ocean*]. Leningrad, Gidrometeoizdat: 296 p. (In Russian).

9. ASTM E2546-15. 2015. *Standard Practice for Instrumented Indentation Testing, ASTM International, West Conshohocken, PA*. Available at: https://www.astm.org (accessed 25 March 2020). doi: 10.1520/E2546-15.

10. Matishov G.G., Grigorenko K.S. 2017. Causes of salinization of the Gulf of Taganrog. *Doklady Earth Sciences*. 477(1): 1311– 1315. doi: 10.1134/S1028334X17110034

11. Matishov G.G., Grigorenko K.S. 2018. Water scarcity and the role of groundwater in salinization of the Don Avandelta. *Doklady Earth Sciences*. 483(2): 1528–1533. doi: 10.1134/S1028334X18120073

12. Matishov G.G., Bulysheva N.I., Kleshchenkov A.V. 2020. [Features of the dynamics of settling of macro-fouling on experimental plates in the mixing zone of river and sea waters]. In: *KLIMAT-2020: Sovremennye podkhody k otsenke vozdeystviya vneshnikh faktorov na materialy i slozhnye tekhnicheskie sistemy*. [*CLIMATE-2020: Modern approaches to assessing the impact of external factors on materials and complex technical systems (Moscow, Russia, 10–11 September 2020)*]. Moscow, All-Russian Research Institute of Aviation Materials: 285–295. (In Russian).

13. Karpov V.A., Koval'chuk Yu.L., Poltarukha O.P., Il'in I.N. 2007. *Kompleksnyy podkhod k zashchite ot morskogo obrastaniya i korrozii*. [*A comprehensive approach to protection against marine fouling and corrosion*]. Moscow, KMK Scientific Press Ltd.: 152 p. (In Russian).

14. Belyaeva P.G. 2002. [Phytoperiphyton of the middle course of the river Sylva (Kama basin)]. In: *Materialy XII mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchenykh "Biologiya vnutrennikh vod: problemy ekologii i bioraznoobraziya"*. [*Proceedings of the XII International Conference of Young Scientists "Biology of Inland Waters: problems of ecology and biodiversity" (Borok, Russia, 23–26 September 2002)*]. Borok, I.D. Papanin Institute of Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences: 3–10. (In Russian).

15. Scheer B.T. 1945. The development of marine fouling communities. *The Biological Bulletin*. 89(1): 103–121. doi: 10.2307/1538088

Поступила 30.07.2021

УДК 551.582.3:551.46 (262.54)

НОВОЕ СОСТОЯНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА АЗОВСКОГО МОРЯ В XXI ВЕКЕ[1]

© 2022 г. С. В. Бердников[1,*], Л. В. Дашкевич[1], В. В. Кулыгин[1]

Представлено академиком РАН Г.Г. Матишовым 15.10.2021 г.
Поступило 20.10.2021 г.
После доработки 08.11.2021 г.
Принято к публикации 11.11.2021 г.

В статье рассмотрена динамика состояния Азовского моря на протяжении XX–начала XXI вв. Представлены основные факторы, формировавшие гидрологический режим водоема. Выявлено, что текущее состояние Азовского моря: значительная положительная аномалия температуры и солености вод, не отмечалось ранее в истории исследования данного водоема. Отмечено увеличение среднего квадратичного отклонения рядов среднегодовых значений, как по солености, так и по температуре воды, что может говорить об увеличении изменчивости этих характеристик в современный период.

Ключевые слова: Азовское море, климатические изменения, температура воды, соленость воды

DOI: 10.31857/S2686739722030057

ВВЕДЕНИЕ

Азовское море замыкает цепь средиземноморских морей, связанных с Атлантическим океаном и опоясывающих южные берега Европы. Его небольшие размеры (площадь 39 тыс. км^2, максимальная глубина 13 м (средняя – 7 м) [1]) обусловливают существенную зависимость гидрологического режима и биологической продуктивности от внешнего влияния. На рубеже XX и XXI веков в бассейне Азовского моря произошли существенные изменения, обусловленные колебаниями климата и возросшей антропогенной нагрузкой на регион [2–4].

В данной статье для Азовского моря выполнено сопоставление двух важных гидрологических (и экосистемных) параметров его вод: среднегодовых осредненных в пределах акватории значений солености и температуры между собой и с температурой воздуха, ледовитостью и суммарным речным стоком. Именно эти характеристики определяют жизнедеятельность гидробионтов и хозяйственную деятельность человека в акватории. Рассмотрен почти 100-летний ряд инструментальных наблюдений и показано, что экосистема Азовского моря на рубеже XX и XXI веков перешла в новое состояние, не наблюдавшееся ранее.

[1]*Федеральный исследовательский центр “Южный научный центр Российской академии наук”, Ростов-на-Дону, Россия*
**E-mail: berdnikov@ssc-ras.ru*

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основным источником была общедоступная океанографическая база данных по Азовскому морю [5, 6], которая содержит более 47000 станций с данными по солености за 1924–2012 гг. (рис. 1 а). Для периода 2013–2019 гг. использованы более 1500 станций морских наблюдений ЮНЦ РАН [7, 8] (рис. 1б). Среднегодовые осредненные по акватории моря значения солености рассчитаны согласно [9].

Средняя годовая температура воды и воздуха для моря в целом рассчитывалась по данным 6 гидрометеорологических станций (ГМС): Таганрог, Ейск, Приморско-Ахтарск, Кубанская устьевая, Геническ, Бердянск по информации из общедоступной базы данных ВНИИГМИ-МЦД [10] в соответствии с подходом, предложенным в [11].

Средняя сезонная ледовитость моря за 1950–1977 гг. по данным наблюдений приведена согласно [1]. За 2001–2019 гг. ледовитость рассчитана по данным Международного Центра Данных – Морской Лед [12]. Пропуски за 1924–1949 и 1978–1999 гг. заполнены расчетным методом с помощью гидрологической модели, апробация которой в части расчета ледовитости и сравнимость полученных результатов с оценками по данным натурных наблюдений и космоснимкам представлены в [13].

Анализ рядов солености и температуры воды Азовского моря и их аномалий относительно среднемноголетних значений 1924–2019 гг. позволил с применением кластерного анализа выде-

[1] **Оригинальный текст:** *Бердников С.В., Дашкевич Л.В., Кулыгин В.В.* Новое состояние гидрологического режима Азовского моря в XXI веке // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 503. № 1. С. 65–70.

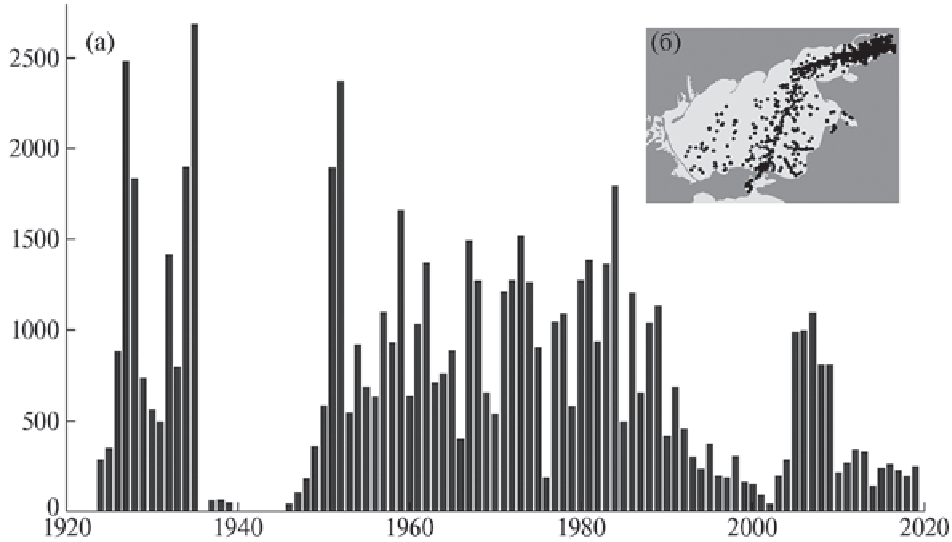


Рис. 1. Морские станции с измерениями солености: (а) распределение количества станций по годам; (б) пространственное распределение станций за 2013–2019 гг.

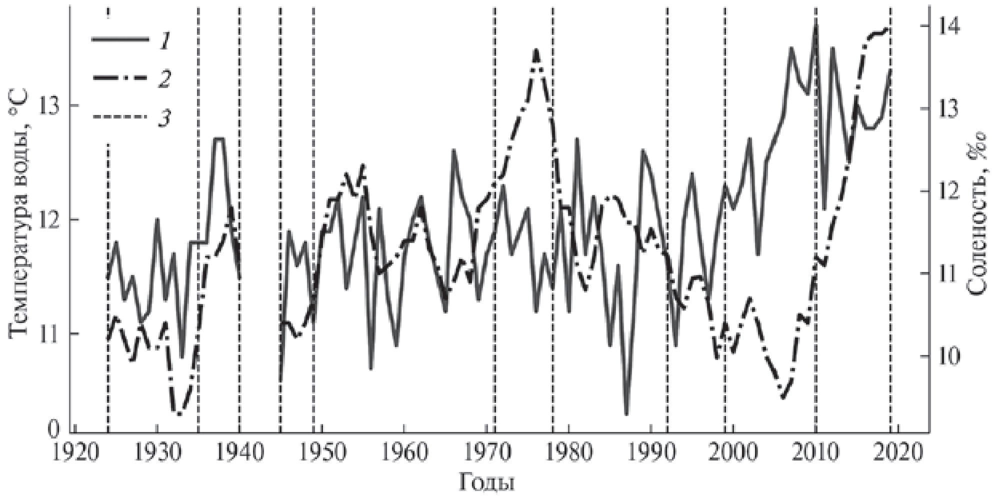


Рис. 2. Динамика среднегодовых осредненных по морю значений температуры *1* и солености *2* вод Азовского моря, границы периодов *3*.

лить следующие периоды: 1924–1935, 1936–1940, 1945–1949, 1950–1971, 1972–1978, 1979–1992, 1993–1999, 2000–2010 и 2011–2019 гг. (рис. 2). Из-за отсутствия большей части данных наблюдений в период Великой Отечественной войны интервал 1941–1944 гг. отсутствует.

Для выделенных периодов и рассматриваемых переменных состояния (температуры воздуха и воды, солености вод, ледовитости, суммарного речного стока) построены эллипсы рассеяния (ЭР), главные оси которых определяются собственными векторами ковариационной матрицы этих величин, а большой и малый полудиаметры эллипса равны среднеквадратичным отклонениям значений рассматриваемых факторов. Построение ЭР позволило рассмотреть изменения во времени взаимосвязи между факторами и разброс их значений, влиявших на Азовское море на протяжении XX–XXI вв.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Построение ЭР для среднегодовых значений температур воздуха и воды ожидаемо показало их высокую взаимозависимость (рис. 3а), при этом отчетливо виден рост температур для двух послед-

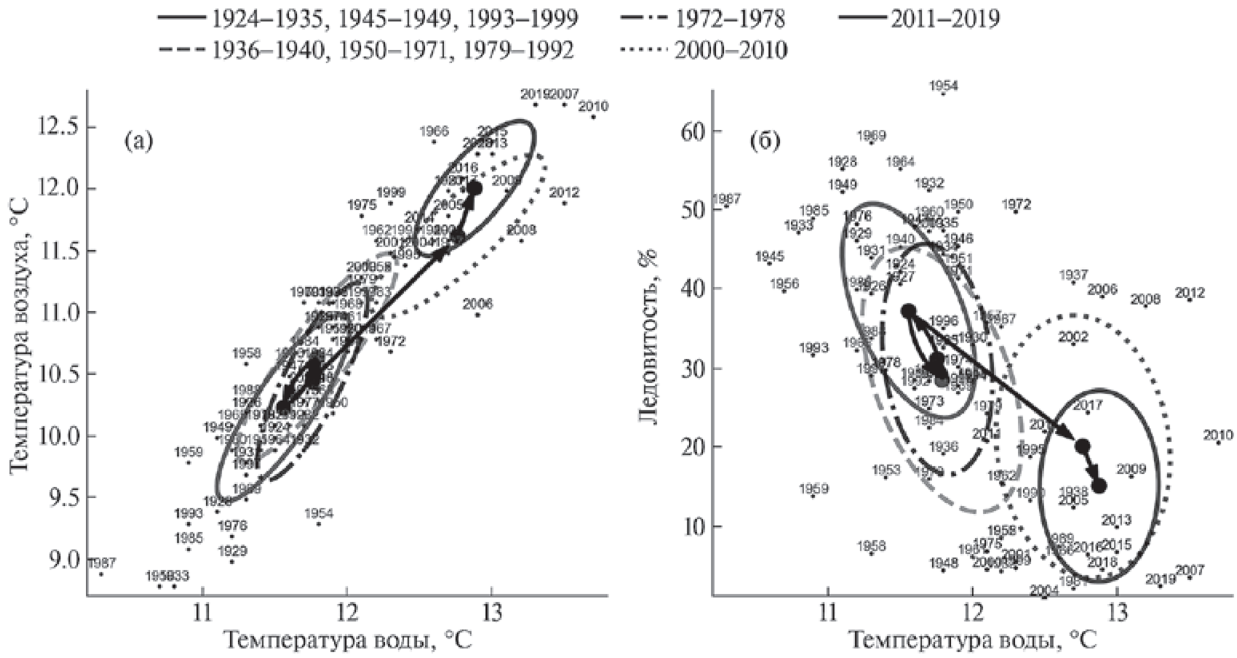


Рис. 3. Взаимосвязи температуры воздуха (а) и ледовитости (б) с температурой вод Азовского моря. Стрелками показано направление смещения центров ЭР при переходе от одного периода к другому.

них периодов при незначительных колебаниях между ними ранее.

Столь же ожидаема полученная взаимосвязь сокращения ледовитости с ростом средней температуры воды (рис. 3б). Возвратно-колебательные движения от периода к периоду на протяжении XX в. сменились однонаправленным снижением ледовитости в XXI в.

Наиболее интересно изменение во времени взаимосвязи главных характеристик состояния морской воды: солености и температуры (рис. 4а), являющихся ведущими факторами для экосистемы. На основе ЭР можно выделить пять достаточно самостоятельных состояний Азовского моря за период 1924–2019 гг. На протяжении XX в. среднегодовая температура вод находилась в коридоре значений от 10.3 (1987 г.) до 13.2°С (1966 г.), при этом можно наблюдать три состояния в вариациях солености: низкая (периоды 1924–1935, 1945–1949, 1993–1999 гг.), средняя (1936–1940, 1950–1971, 1979–1992 гг.) и высокая (1972–1978 гг.). Начальный период XXI в. характеризовался низкой соленостью и высокой температурой, во втором десятилетии при сохранении высоких температур воды мы наблюдаем очень высокую соленость моря. Подобное состояние гидрологического режима моря не наблюдалось ранее за рассматриваемую историю инструментальных наблюдений.

Изменения взаимосвязи ледовитости и средней солености моря (рис. 4б) повторяют характер изменений для солености и температуры вод в перевернутом виде. Но следует отметить гораздо большую величину среднего квадратичного отклонения и разброс значений для средней ледовитости.

Сопоставление межгодовых флуктуаций притока речной воды и среднегодовой солености Азовского моря за весь период наблюдений указывает на высокую степень их взаимосвязи (рис. 5), которая вместе с тем зависит от таких компонентов водного баланса моря, как осадки, испарение и водообмен через Керченский пролив. При довольно значительной межгодовой вариабельности речного стока разброс значений солености моря в пределах 1‰.

В период повышения увлажненности бассейна (1924–1932 гг.) средняя соленость моря снижалась от 10.5 до 9.1‰, а в фазу, относящуюся к началу 1940-х – от 11.8 до 9.2‰. В периоды недостаточного увлажнения (1933–1939, 1945–1954 гг.) средняя соленость моря достигала 11.8–12.1‰. Периоды осолонения (1912–1915, 1938–1940, 1950–1951 гг.) при незарегулированном стоке были кратковременны и разделялись продолжительными пресными фазами. С 1952 г. водность рек выше нормы и фаза повышенной увлажненности бассейна продолжались до 1968 г. Начавшаяся далее очередная фаза пониженной увлажненности привела к экстремальным значениям солености Азовского моря в 1972–1978 гг. (до 13.8‰ в 1976 г.) [14]. В 1980-х гг. водосбор моря находился в условиях пониженного увлажнения.

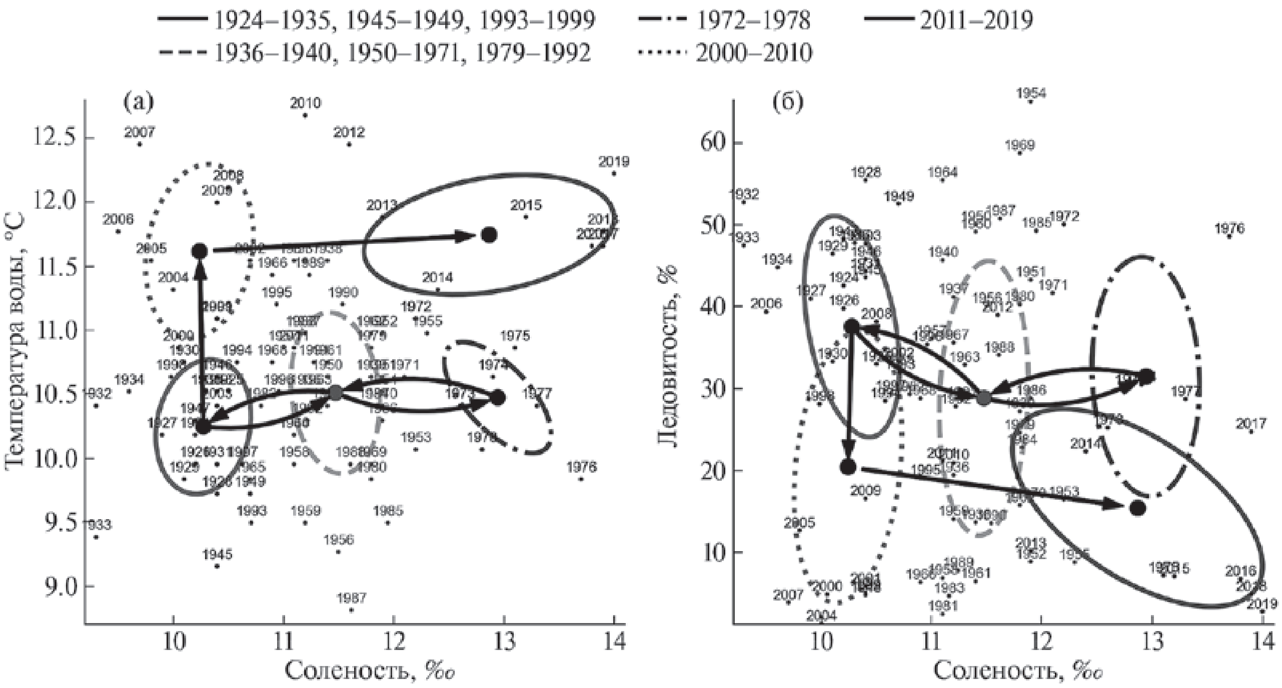


Рис. 4. Взаимосвязи температуры воды (а) и ледовитости (б) со средней соленостью моря; пояснение к рис. 2.

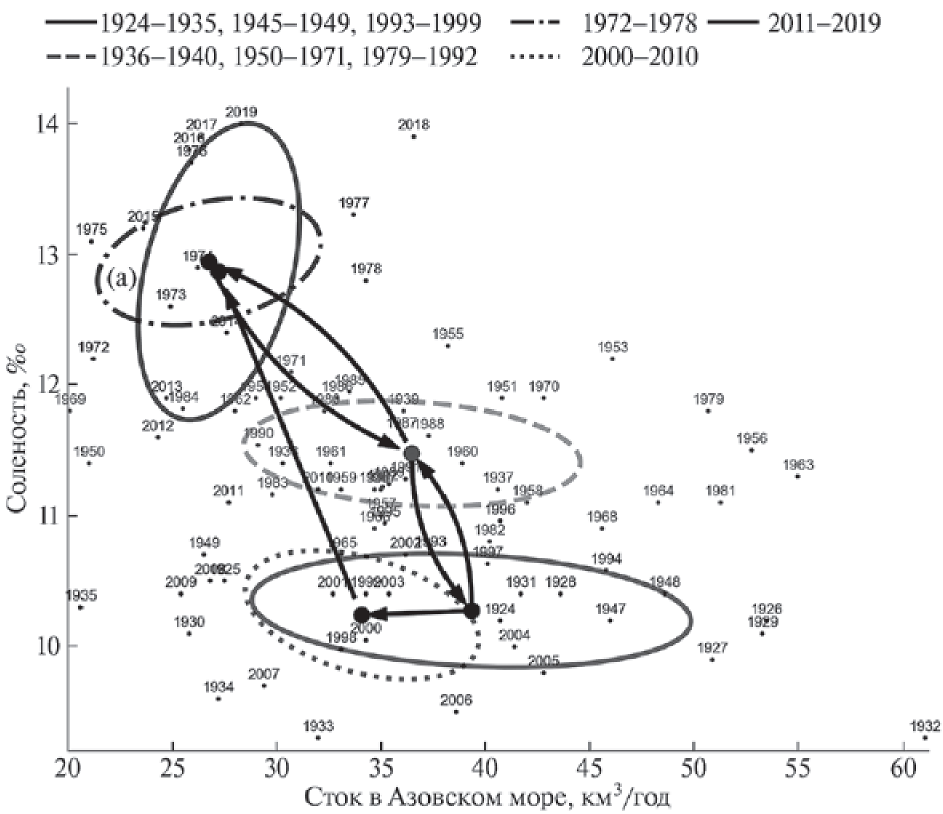


Рис. 5. Взаимосвязь суммарного речного стока в Азовское море и солености; пояснение к рис. 2.

Если рассматривать периоды сильного осолонения (1970-х гг. и начавшийся с 2007 г. маловодный период на Дону), то можно отметить наличие некоторого критического объема годового пресного стока (примерно 25–27 км^3), ниже которого Азовское море испытывает дефицит речных вод. Есть мнение, что в современных условиях низкий речной сток не оказывает влияние на водообмен через Керченский пролив, а приток черноморских вод регулируется ветровой деятельностью и может быть более интенсивным, чем в XX в. [15]. Видны различия в переходе к режимам осолонения. В 1970-х годах даже при большом стоке 1970 и 1971 г. уже была достаточно высокая соленость (около 12‰), а после первого же маловодного 1972 г. соленость перешла в критическую уже в 1973 г. В современный период "старт" был очень низкий (2007 г. — меньше 10‰, и даже в 2011 г. около 11‰), а затем соленость непрерывно росла до 14.0‰ в 2019 г. (немного снизившись в Таганрогском заливе в многоводном 2018 г.). Есть оценки, что среднегодовая средняя по морю соленость в 2020 г. достигла исторического максимума — 14.83‰ [16].

Речной сток в настоящее время не является единственным фактором, уменьшение которого приводит к росту солености в море. Вклад климатически обусловленных изменений атмосферных процессов в такие компоненты водного баланса, как испарение и водообмен с Черным морем (на фоне наблюдаемого роста уровня моря [17]), не оценен в полной мере и возможны каскадные эффекты, вызванные аномальным ростом температуры водных масс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На протяжении почти всего XX века Азовское море пребывало в одном из двух состояний: распресненном или осолоненном. В первой декаде XXI в. увеличилась средняя по морю средняя годовая температура воды при относительно низкой солености вод; затем в условиях маловодья на Дону (а потом и Кубани) начался стремительный рост солености. В течение 2000–2019 гг. экосистема Азовского моря по комплексу гидрологических показателей перешла в состояние, которое не наблюдалось в период инструментальных наблюдений (1924–1999 гг.).

Закономерным следствием процесса потепления вод Азовского моря и роста солености стало существенное (в 2 раза) снижение ледовитости моря, несмотря на наблюдаемые аномальные ледовые условия в отдельные зимы (2006, 2012 г.).

Следует обратить внимание на увеличение среднеквадратичного отклонения рядов среднегодовых значений для новых состояний, как по солености, так и по температуре воды (особенно выражено при сравнении начала XX и XXI в.), что можно интерпретировать как увеличение изменчивости этих характеристик в современный период.

При оценке происходящих изменений для биологических ресурсов экосистемы Азовского моря прежде всего делается акцент на росте солености и его прямой связи с дефицитом пресного стока [16]. Рост температуры воды пока остается за скобками обсуждений. Вместе с тем есть оценки, что согласованный рост температуры и солености среды может негативно повлиять на предпринимаемые меры по восстановлению запаса популяции азовского судака [18].

Необходимость всесторонних оценок происходящих изменений и поиск оптимальных условий эксплуатации истощенных биологических ресурсов моря обусловливают развитие системы мониторинга и технологий моделирования для понимания происходящих процессов.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Публикация подготовлена в рамках ГЗ ЮНЦ РАН на 2022 г. "Геоинформационный анализ и моделирование морских и наземных экосистем Юга России".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 3. Азовское море. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 218 с.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории РФ. М.: Росгидромет, 2014. 58 с.
3. Доклад об особенностях климата на территории РФ за 2020 г. М.: Росгидромет, 2021. 104 с.
4. *Матишов Г.Г., Дашкевич Л.В., Кириллова Е.Э.* Цикличность климата в Приазовье: голоцен и современный период (XIX–XXI вв.) // ДАН. Науки о Земле. 2021. Т. 498. № 5. С. 96–100. https://doi.org/10.31857/S2686739721050091
5. Climatic Atlas of the Sea of Azov 2008 / NOAA Atlas NESDIS 65. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 2008. 148 p.
6. Atlas of Climatic Changes in Nine Large Marine Ecosystems of the Northern Hemisphere (1827–2013) / NOAA Atlas NESDIS 78. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 2014. 131 p.
7. *Матишов Г.Г., Степаньян О.В.* НИС "Денеб": 10 лет морских научных исследований // Морской гидрофиз. журн. 2018. Т. 34. № 6. С. 548–555.
8. *Матишов Г.Г., Григоренко К.С.* Динамический режим Азовского моря в условиях осолонения // ДАН. 2020. Т. 492. № 1. С. 107–112. https://doi.org/10.31857/S268673972005014X
9. *Дашкевич Л.В., Бердников С.В., Кулыгин В.В.* Многолетнее изменение средней солености Азовского моря // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 5. С. 563–572. https://doi.org/10.7868/S0321059617040046

10. http://meteo.ru

11. *Дашкевич Л.В., Кулыгин В.В.* Оценка средней температуры поверхностного слоя Азовского моря на основе данных спутниковой съемки и наблюдений прибрежных гидрометеостанций // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2019. Т. 25. № 2. С. 112–120. https://doi.org/10.35595/2414-9179-2019-2-25-112-120

12. http://wdc.aari.ru

13. *Дашкевич Л.В., Немцева Л.Д., Бердников С.В.* Оценка ледовитости Азовского моря в XXI веке по спутниковым снимкам Terra/Aqua MODIS и результатам математического моделирования // Совр. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 91–100. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-5-91-100

14. *Бронфман А.М., Дубинина В.Г., Макарова Г.Д.* Гидрологические и гидрохимические основы продуктивности Азовского моря. М: Пищ. пром., 1979. 288 с.

15. *Завьялов И.Б., Осадчиев А.А., Завьялов П.О., Кременецкий В.В., Гончаренко И.В.*. Исследование водообмена в Керченском проливе по историческим данным и данным контактных измерений 2019 г. // Океанология. 2021. Т. 61. № 3. С. 377–386. https://doi.org/10.31857/S0030157421030199

16. *Жукова С.В., Шишкин В.М., Карманов В.Г., Бурлачко Д.С., Подмарева Т.И., Лутынская Л.А., Тарадина Е.А.* Водно-экологические проблемы Азовского моря как трансграничного водного объекта и пути их решения // Трансграничные водные объекты: использование, управление, охрана. Сб. мат. Всеросс. научно-практической конф. (Сочи, 20–25 сентября 2021 г.). Новочеркасск: Лик, 2021. С. 137–143.

17. *Михайлов В.Н., Михайлова М.В.* Влияние многолетних изменений морских факторов на устья рек // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 4. С. 367–379.

18. *Тютюнов Ю.В., Сенина И.Н., Титова Л.И., Дашкевич Л.В.* Оправдался ли долгосрочный прогноз риска вымирания азовского судака? // Биофизика. 2020. Т. 65. № 2. С. 390–401.

NEW STATE OF THE HYDROLOGICAL REGIME OF THE SEA OF AZOV IN THE XXI CENTURY

S. V. Berdnikov[a,#], L. V. Dashkevich[a], and V. V. Kulygin[a]

[a] *Federal Research Centre "The Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences", Rostov-on-Don, Russian Federation*

[#] *E-mail: berdnikov@ssc-ras.ru*

Presented by Academician of the RAS G.G. Matishov October 15, 2021

The article examines the dynamics of the Sea of Azov state during the XX–early XXI centuries. The main factors that form the sea hydrological regime are presented. It was revealed that the current state of the Sea of Azov, a significant positive anomaly of water temperature and salinity, was not previously noted in the history of the its study. An increase in the standard deviation of the mean annual series of water salinity and temperature was noted which may indicate an increase in the variability of these characteristics in the modern period.

Keywords: Sea of Azov, climatic changes, water temperature, water salinity

УДК 556.54
DOI: 10.7868/S25000640210304

ИНТРУЗИИ СОЛЕНЫХ ВОД В ДЕЛЬТУ ДОНА: ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ И ПОСЛЕДСТВИЯ [1]

© 2021 г. А.В. Клещенков[1], А.Ю. Московец[1]

Аннотация. Наблюдающиеся в настоящее время в регионе в целом и в устьевой области Дона в частности последствия изменения климата определяют комплекс негативных эффектов. Происходящие во взаимосвязи рост уровня Азовского моря и Таганрогского залива, увеличение высоты и повторяемости нагонов, сокращение твердого и жидкого стока Дона, осолонение Таганрогского залива, увеличение вклада морских факторов в развитие дельты Дона приводят к интенсификации интрузий соленых вод в дельту Дона. В таких условиях поступление соленых вод в водозаборы городов Азова и Таганрога может происходить в будущем все чаще. Это уже стало ощутимой проблемой для жителей Приазовья в сентябре 2014 г., декабре 2015 г. и феврале 2021 г.

Приведены данные о характеристиках интрузий, таких как длительность проникновения и тип перемешивания. Поступление соленых вод в дельту Дона носит, как правило, непродолжительный характер и связано преимущественно с нагонными явлениями. Интенсивное ветровое воздействие во время нагона во многом объясняет преобладание вертикального перемешивания, характеризующегося слабой стратификацией.

Представлены результаты расчета дальности проникновения соленых вод. Изменившиеся природные условия привели к тому, что в настоящее время наблюдается увеличение дальности проникновения соленых вод в 2–3 раза по сравнению со второй половиной прошлого века. Проведена оценка последствий осолонения для водоснабжения и качества поступающей воды. Приводятся рекомендации по преодолению негативных последствий поступления соленых вод в дельту Дона.

Ключевые слова: дельта Дона, Азовское море, интрузия морских вод, нагон.

SALT WATER INTRUSIONS INTO THE DON RIVER DELTA: DEVELOPMENT PATTERNS AND CONSEQUENCES

A.V. Kleshchenkov[1], A.Yu. Moskovets[1]

Abstract. The consequences of climate change, which are currently observed in the region as a whole and in the Don estuary area in particular, determine a complex of negative effects. The interconnected rise in the level of the Sea of Azov and the Taganrog Bay, an increase in the height and frequency of surges, a decrease in the solid and liquid runoff of the Don, salinization of the Taganrog Bay, an increase in the contribution of marine factors to the development of the Don delta lead to the intensification of salt water intrusions into the Don delta. Under such conditions, the inflow of saline water into the water intakes of the cities of Azov and Taganrog may occur more often in the future. This has already become a tangible problem for the inhabitants of the Azov region in September 2014, December 2015 and February 2021.

The article provides data on the characteristics of intrusions, such as the duration of penetration and the type of mixing. The inflow of salt water into the Don delta is usually short-lived and is mainly associated with surges. The intense wind action during the surge largely explains the prevalence of the first type of vertical mixing, characterized by weak stratification.

The results of calculating the penetration range of saline waters are presented. It is noted that the changed natural conditions have led to the fact that at present there is an increase in the penetration range of saline

[1] Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: geo@ssc-ras.ru

[1] **Оригинальный текст:** *Клещенков А.В., Московец А.Ю.* Интрузии соленых вод в дельту Дона: закономерности развития и последствия // Наука Юга России. 2021. Т. 17. № 3. С. 30–37.

waters by 2–3 times compared to the second half of the last century. An assessment of the consequences of salinization for water supply and the quality of incoming water was made. Recommendations for overcoming the negative consequences of the inflow of saline waters into the Don delta are given.

Keywords: Don River delta, Sea of Azov, sea water intrusion, surge.

ВВЕДЕНИЕ

Устьевые области рек, несмотря на свои относительно небольшие размеры, занимают особое и очень важное место как среди природных экосистем, так и среди территориально-хозяйственных комплексов. Они играют важнейшую роль в поддержании экологического равновесия в глобальном масштабе [1]. Благодаря выгодному географическому положению на выходе водных путей с материков в моря и океаны устья рек стали местом строительства портов, образования крупных промышленных и торговых центров. Исключительная биопродуктивность и широкое использование земельных, растительных, рыбных и других ресурсов устьев рек различными отраслями хозяйства привели к тому, что районы речных дельт стали густонаселенными. Вместе с тем использование устьев рек затруднено в связи с большой изменчивостью их морфологических, гидрологических, гидрохимических, экологических характеристик кратковременного (приливы, штормы, нагоны) и сезонного масштабов.

Устьевая область Дона – ключевой район бассейна Азовского моря, где происходят сложные процессы взаимодействия речных и морских вод [2; 3]. Она простирается на 291 км от условной линии, соединяющей Должанскую и Белосарайскую косы в Таганрогском заливе на западе и до ст. Раздорской на востоке [4]. Устьевая область Дона состоит из устьевого участка реки (от ст. Раздорской до вершины дельты в районе Ростова-на-Дону), собственно дельты и Таганрогского залива.

Район исследований хорошо освоен с точки зрения морехозяйственной деятельности, здесь развито судоходство. Через порты Приазовья (Ростов-на-Дону, Азов, Таганрог) ежегодно проходит значительная часть российского экспорта зерновых.

Общепризнанным к настоящему времени является широкий спектр опасных гидрологических процессов в устье Дона, к которым можно отнести стоковые наводнения, штормовые нагоны, ливневые затопления в городах, стоковые обмеления, ветровые сгоны, опасные ледовые и морфодинамические процессы, ухудшение качества речных вод.

Наблюдающиеся в настоящее время в регионе в целом и в устьевой области Дона в частности последствия изменения климата определяют комплекс негативных эффектов. Происходящие во взаимосвязи рост уровня Азовского моря и Таганрогского залива [5], увеличение высоты и повторяемости нагонов, сокращение твердого и жидкого стока Дона, осолонение Таганрогского залива, увеличение вклада морских факторов в развитие дельты Дона приводят к интенсификации еще одного опасного природного явления – интрузий соленых вод в дельту Дона.

Согласно классическим [6] и современным [7] представлениям интрузиями соленой воды называют поступление со стороны моря в реку воды с хлорностью >0,5 ‰ или соленостью >1 ‰. Для многих эстуариев мира характерно такое опасное гидрологическое явление, как проникновение соленых вод, что нередко приводит к попаданию этих вод в водозаборы, к осолонению поверхностных и подземных вод, к воздействию на пресноводную биоту. Зона подпора соленых вод может стать препятствием на пути перемещения наносов и вызвать заиление русловой сети, в том числе судоходных каналов [7; 8].

Цель представленной работы – установление закономерностей развития и последствий интрузий соленых вод в рукава дельты Дона. Для ее достижения решались задачи исследования формирования условий и механизмов, а также гидрохимических характеристик и пространственных границ опасных проникновений соленых вод.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В основу анализа поступления соленых вод в дельту Дона были положены литературные и фондовые данные, охватывающие период 1970–1990 гг., а также результаты собственных измерений температуры и электропроводности воды, выполненных с помощью океанологических зондов CTD-90, CTD-90M, SBE-19 (определение гидростатического давления, температуры воды, электропроводности, солености) и измерителем течений AANDERAA RCM 9LW в рамках специальных наблюдений за нагонами и в ходе экспедиционных работ на научно-исследовательском судне «Профессор Панов» в 2014–2020 гг. Кроме того, широко использовались данные, получаемые с гидропоста «Донской» Южного научного центра Российской академии наук (ЮНЦ РАН), на котором системой датчиков производится автоматическое измерение уровня, электропроводности и температуры воды (датчик СОЛИС СЛ15-10Т) и передача этих данных на сервер ЮНЦ РАН с дискретностью 10 мин. Также для расчета зоны выклинивания подпора и дальности проникновения соленых вод в дельту были проанализированы данные уровенного режима, полученные Росгидрометом по речным постам устьевой области Дона и опубликованные в гидрологических ежегодниках. Значения расходов воды в замыкающем створе – ст. Раздорской – были получены из открытых источников [9]. В отдельных случаях сильных нагонов производился отбор проб воды на различных участках р. Дон и водопроводной воды подающей сети Азова с последующим определением общей минерализации, хлоридов, сульфатов, гидрокарбонатов, общей жесткости, магния, кальция, натрия и калия в воде по стандартным методикам [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В современных условиях маловодья наблюдается рост минерализации речной воды в пределах речного участка устьевой области Дона до значений выше 1 г/л [11] даже при нормальном уровне без влияния нагонных явлений. Анализ данных муниципального предприятия «Азовводоканал» по минерализации воды в створе Азова за период 2015–2019 гг. (n = 60) показал, что наибольшая минерализация наблюдалась в период зимне-весенней межени 2018 и 2019 гг. и составила 1,09 и 1,01 г/л соответственно при среднемноголетней минерализации за исследованный период 0,85 г/л. При сгонах в дельте Дона порою наблюдается интенсивное поступление подземных вод в отдельные рукава (Свиное гирло, Мертвый Донец) [12]. Принимая во внимание указанное, для целей данного исследования мы рассматриваем интрузии соленых вод в дельту Дона как увеличение солености и минерализации речной воды над исходным значением при изменении уровенного режима на устьевом участке больше чем на 0,5 м.

Важными характеристиками интрузий являются временной характер проникновения, тип перемешивания, а также дальность проникновения соленых вод. Согласно нашим исследованиям, в дельте Дона наблюдается кратковременное поступление соленых вод, связанное прежде всего с нагонными явлениями. Однако в последние несколько лет в условиях маловодья и наблюдающегося роста солености Таганрогского залива [13] длительность осолонения и дальность проникновения соленых вод растет. Так, если в предыдущие периоды (1970–1990 гг.) были известны единичные случаи проникновения в дельту соленых вод, то в последние годы (2014–2021 гг.) их количество и абсолютные значения максимальной солености существенно увеличились. Отмечалось, что при нагоне в 1976 г. была достигнута соленость воды более 1 ‰ у Ростова-на-Дону, а в 1979, 1981 и 1990 гг. у Азова и х. Дугино ветровые нагоны обусловливали соленость воды до 2–3 ‰ [14; 15]. Однако уже в 2014 г., во время экстремального нагона, в Азове была зафиксирована соленость (по хлорности) 5,6 ‰, а во время сильного нагона в феврале 2021 г. – 6,9 ‰.

Что касается условий перемешивания, которые определяют тип проникновения осолоненных морских вод в реку, то для Дона это преимущественно первый тип, характеризующийся хорошим вертикальным перемешиванием и слабой стратификацией [16]. Параметр стратификации n, рассчитанный по формуле (1) на основе данных вертикального зондирования зондами SBE-19 и CTD-90 водной толщи во время нагонов в сентябре 2014, декабре 2015, июле 2019 и апреле 2021 г., имел значения 0,19, 0,028, 0,002 и 0,011 соответственно. То есть в большинстве случаев преобладал первый тип вертикального перемешивания, стратификации и проникновения осолоненных вод, что обусловлено интенсивным ветровым перемешиванием во время нагона, и лишь в сентябре 2014 г. отмечался второй тип, для которого характерны частичное вертикальное перемешивание и умеренная стратификация [16].

$$n = \Delta S / S_{ср}, \qquad (1)$$

где ΔS – вертикальный градиент солености, $S_{ср}$ – средняя соленость по вертикальному профилю.

Как отмечалось выше, еще одним важным параметром является дальность проникновения соленых вод в реку. Впервые подобная оценка была приведена В.М. Михайловым в 1971 г. [17] и не менялась до сих пор [16]. Согласно ей предельная дальность проникновения осолоненных вод в устье Дона составляет 15 км (Азов). Вместе с тем наши наблюдения свидетельствуют о том, что в настоящее время это расстояние может быть больше.

Таблица 1. Результаты расчета дальности проникновения соленых вод при разной водности Дона и высоте нагона
Table 1. The results of calculating the penetration range of saline waters at different water content of the Don and the height of the surge

№	Дата Date	Q_p, м³/с / m³/s	$\Delta H_м$, м / m	l, км / km	l_v, км / km	l_S, км / km
1	24.09.2014	434	3,6	263,3	84,9	69,1
2	27.12.2015	352	1,3	215,6	85,8	20,7
3	13.02.2021	192	1,7	265,3	119,7	33,9

Таблица 2. Данные исследования проникновения соленых вод в дельту Дона 13–14.02.2021
Table 2. Field data from the study of the penetration of salty waters into the Don delta on 13–14 February 2021

Пункт отбора проб / Sampling point	Координаты Coordinates N	Координаты Coordinates E	Дата Date	Расстояние от устья, км Distance from the mouth, km	Соленость по хлорности, ‰ Clorine salinity, ‰	Соленость по зонду, PSU CTD salinity, PSU	Общая минерализация, г/л Total mineralization, g/l	Жесткость воды, мг-экв/л Water hardness, mg-eg/l
Ростов-на-Дону (Нахичеванская протока) Rostov-on-Don(Nakhichevan channel)	47.22051°	39.77271°	13.02.2021	52,3	0,58	0,79	1,2	9,6
Ростов-на-Дону (Ростов-Арена) Rostov-on-Don (Rostov-Arena)	47.21402°	39.73684°	13.02.2021	49,4	0,58	0,79	1,2	9,4
Ростов-на-Дону (Ростов-Арена) Rostov-on-Don (Rostov-Arena)	47.21402°	39.73684°	14.02.2021	49,4	0,61	0,83	1,3	9,6
Колузаево / Koluzaevo	47.16770°	39.55202°	13.02.2021	34,5	0,62	0,85	1,3	9,8
Дугино / Dugino	47.15602°	39.43719°	13.02.2021	22,3	2,96	3,24	3,9	18,4
Рогожкино / Rogozhkino	47.17626°	39.34048°	13.02.2021	11,7	3,71	3,97	4,7	21
Азов (порт) / Port of Azov	47.11825°	39.42313°	13.02.2021	15	2,56	–	3,4	16,8
Азов (порт) / Port of Azov	47.11825°	39.42313°	14.02.2021	15	5,28	–	6,3	28

Рассмотрим данное утверждение на примерах трех нагонов: 23–25.09.2014, 27.12.2015, 13–15.02.2021 г. Согласно подходам, изложенным в работах [17; 18], расчет проводился по формулам (2–5). Полученные результаты приведены в таблице 1.

$$l_S = l(1+\frac{h_0}{\Delta H_м}) - \sqrt{l^2(1+\frac{h_0}{\Delta H_м})^2 - l_v(2l - l_v)}, \quad (2)$$

$$l_v = l - \sqrt{\frac{2Q_p l \Delta t}{B\Delta H_м}}, \quad (3)$$

$$l = ln\frac{\Delta H_м}{0,05} / k, \quad (4)$$

$$k = 1,21 \cdot 10^{-5} \cdot Q_р + 0,011, \quad (5)$$

где l_s – дальность проникновения соленых вод, h_0 – средняя глубина в русле, l_v – расстояние от устьевого створа, на котором расход воды и скорость прямого течения равны нулю, $Q_р$ – расход на верхней границе устьевой области (для Дона принят створ ст. Раздорской), l – дальность распространения подпора при нагонах, Δt – время развития нагона, B – ширина русла, $\Delta H_м$ – подъем уровня в устье, k – декремент затухания.

Полученные результаты расчета были сопоставлены с экспедиционными данными определения солености воды во время нагона в феврале 2021 г. (табл. 2). Как можно заметить, они в значительной степени соответствуют расчетным, так как на интервале русла от порта Азов (15 км от устья) до х. Колузаево (34,5 км от устья) наблюдается резкое падение солености воды.

В условиях маловодья устьевая область Дона подвержена затокам солоноватых вод из Таганрогского залива Азовского моря. При этом именно здесь, главным образом в дельте, происходит водозабор питьевой воды для таких городов, как

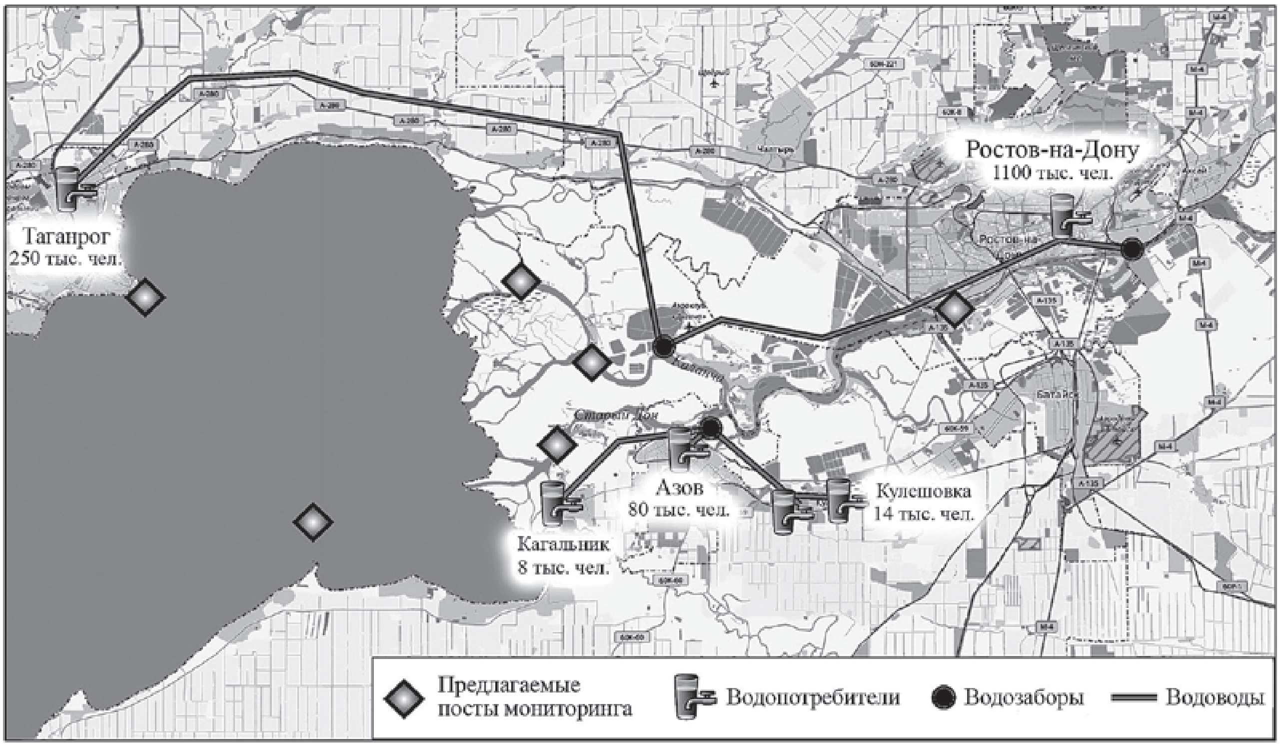


Рис. 1. Схема водозаборов в устьевой области Дона и предлагаемые участки размещения постов оперативного мониторинга проникновения соленых вод.
Fig. 1. Scheme of water intakes in the mouth area of the Don River and the proposed sites for the placement of posts for real-time monitoring of the sea water intrusion.

Азов, Таганрог, Ростов-на-Дону. Общее число жителей этих городов ростовской агломерации превышает 1400 тыс. человек. По-прежнему в планах значится ввод в эксплуатацию водозабора в районе х. Дугино мощностью 150 тыс. м^3 в сутки для обеспечения водой западной части Ростова-на-Дону (рис. 1), что в перспективе может привести к поступлению в водопроводную сеть соленой воды в случае повторения интрузий соленых вод в дельту.

Донская вода на участке от Ростова-на-Дону до устья относится к гидрокарбонатному классу кальциевой группы. Среднегодовая минерализация донской воды в створе Ростова-на-Дону составляет 0,6–0,8 г/л, в последние годы около 1 г/л [11]. Воды Таганрогского залива Азовского моря относятся к хлоридному классу натриевой группы. Минерализация изменяется в широких пределах от 3 до 13 г/л. Зона смешения морских и речных вод перемещается в результате действия сгонно-нагонных явлений в условиях маловодья в дельту Дона. Вода приобретает черты смешанного ионного состава. В ней повышается общая минерализация, жесткость и содержание хлоридов.

Согласно нормам качества питьевой воды, принятым в России (СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды» [19]), содержание хлоридов в воде не должно превышать 0,35 г/л, общая жесткость – 7(10) мг-экв/л, минерализация – 1(1,5) г/л. В целом донская вода в нормальных условиях соответствует этим нормативам, чего нельзя сказать о смешанной морской и речной воде, в которой данные параметры превышены в несколько раз.

Повышенные концентрации хлоридов и сульфатов в смешанной солоноватой воде придают ей соленый и горький вкус. Но при этом подобная минерализация не наносит значительного ущерба организму человека. При кратковременном употреблении воды соленостью до 5–6 ‰ не происходит патологических изменений водно-солевого баланса в организме человека. Так как соленость крови близка к 8–9 ‰, то клеточные мембраны продолжают работать практически так же, как и при употреблении пресной воды [20]. Наибольшую опасность представляет повышенная жесткость смешанных солоноватых вод. В результате продолжительного употребления такой воды возрастает риск нарушений в работе желудочно-кишечного тракта (пониженная моторика желудка, нарушение пищеварения, дисбактериоз), опорно-двигательного аппарата (отложение солей в суставах, артрит, полиартирит), сердечно-сосудистой системы (аритмия) [20].

ВЫВОДЫ

В продолжающийся период маловодья происходят изменения гидроклиматических условий в устьевой области Дона: сокращение жидкого стока Дона, сосредоточение стока в главных рукавах дельты Старом Дону и Каланче и прогрессирующее заиление малых рукавов, рост уровня и солености Азовского моря и Таганрогского залива. В таких условиях поступление соленых вод в водозаборы городов Азова и Таганрога может происходить в будущем все чаще. Это уже стало ощутимой проблемой для жителей Приазовья в феврале 2021 г., когда из кранов в Азове и окрестных селах текла вода с соленостью 7 ‰ (по хлорности) и жесткостью 33 мг-экв/л. Кроме того, изменившиеся природные условия привели к тому, что в настоящее время наблюдается увеличение дальности проникновения соленых вод в 2–3 раза по сравнению со второй половиной прошлого века.

Одним из путей решения подобной проблемы может стать развитие комплекса, включающего в себя систему оперативного оповещения и сеть наблюдательных постов за термохалинными характеристиками вод на взморье и в дельте Дона (в том числе на участках водозаборов) (рис. 1) с передачей данных в общедоступную информационную систему. Это следует делать с участием крупнейших компаний-водопотребителей («Ростовводоканал», «Азовводоканал», «Кока-Кола» и т.д.). Необходима модернизация системы водоочистки и водоподготовки на случаи повышения солености забираемой для водоснабжения воды. Кроме того, необходимо продолжать усилия по улучшению системы прогнозирования с целью заблаговременного предупреждения о повышении солености на участках водозаборов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Е.Г. Алёшиной за выполнение анализов в междисциплинарной аналитической лаборатории ЮНЦ РАН и Д.В. Магрицкому за информационную поддержку. Публикация подготовлена в части сбора и анализа данных об уровенном режиме и солености воды в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гр. проекта АААА-А18-118122790121-5, в части постановки задачи и анализа дальности проникновения соленых вод в рамках научного проекта РФФИ 18-05-80010 «Исследование и прогноз опасных гидрометеорологических и геолого-геоморфологических процессов в районах функционирования стратегических объектов на Азово-Черноморском побережье (исторические и современные аспекты)».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов В.Н. 1997. *Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее*. М., ГЕОС: 413 с.
2. Филиппов Ю.Г. 2015. О влиянии стока р. Дон на уровень воды в Таганрогском заливе. *Метеорология и гидрология*. 2: 76–80.
3. Чикин А.Л., Клещенков А.В., Чикина Л.Г. 2019. Численное исследование влияния расхода воды на уровенный режим в устьевой области Дона. *Морской гидрофизический журнал*. 35(4): 355–366. doi: 10.22449/0233-7584-2019-4-355-366
4. Симов В.Г. 1989. *Гидрология устьев рек Азовского моря*. М., Гидрометеоиздат: 328 с.
5. Беспалова Л.А., Цыганкова А.Е., Беспалова Е.В., Мисиров С.А. 2020. Штормовые нагоны в Азовском море и их влияние на абразионные процессы. В кн.: *Труды Южного научного центра Российской академии наук. Том VIII: Моделирование и анализ опасных природных явлений в Азовском регионе*. Ростов-на-Дону, изд-во ЮНЦ РАН: 111–121. doi: 10.23885/1993-6621-2020-8-111-121
6. *Руководство по расчету элементов гидрологического режима в прибрежной зоне морей и в устьях рек при инженерных изысканиях*. 1973. М., Гидрометеоиздат: 535 с.
7. Магрицкий Д.В. 2016. Опасные гидрологические явления и процессы в устьях рек: вопросы терминологии и классификации. *Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник)*. 2: 35–61.
8. Зырянов В.Н., Чебанова М.К., Филатов Н.Н. 2015. Интрузия морских вод в устья рек. *Водные ресурсы*. 42(5): 492–503. doi: 10.7868/S032105961505020X
9. Оперативные данные измеренных расходов воды на гидропостах (КН-15, Раздел 6). Период 7 дней. *ЕСИМО*. URL: http://esimo.ru/portal/portal/esimo-user/data/default-roles-userWindow?anyword=%D0%BA%D0%BD-15 (дата обращения: 05.04.2021).
10. *Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Часть 1*. 2009. Ростов н/Д, изд-во ЮФУ: 1150 с.
11. Матишов Г.Г., Клещенков А.В., Булышева Н.И., Кренёва К.В., Семин В.Л., Глущенко Г.Ю. 2019. Современные проблемы развития природно-территориальных систем

Цимлянского водохранилища и Нижнего Дона. В кн.: *Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения. Сборник научных трудов. Всероссийская научная конференция с международным участием (Нижний Новгород, 8–14 сентября 2019 г.).* М., Студия Ф1: 30–35.

12. Матишов Г.Г., Клещенков А.В., Григоренко К.С., Московец А.Ю., Кириллова Е.Э. 2018. Изменение водного баланса в бассейне Нижнего Дона в условиях маловодья. *Наука Юга России*. 14(3): 45–55. doi: 10.7868/S25000640180306

13. Матишов Г.Г., Григоренко К.С. 2017. Причины осолонения Таганрогского залива. *Доклады Академии наук*. 477(1): 92–96. doi: 10.7868/S086956521731019X

14. *Цимлянское водохранилище: состояние водных и прибрежных экосистем, проблемы и пути их решения*. 2011. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 216 с.

15. Магрицкий Д.В. 2016. Опасные гидрологические процессы в устье Дона и многолетние тенденции в изменении их параметров. В кн.: *Актуальные вопросы гидрологии и геоэкологии. Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию Пермского государственного национального исследовательского университета (Пермь, 17–18 октября 2016 г.).* Пермь, Пермский государственный национальный исследовательский университет: 35–41.

16. Михайлова М.В. 2013. Процессы проникновения морских вод в устья рек. *Водные ресурсы*. 40(5): 439–455. doi: 10.7868/S0321059613050052

17. Михайлов В.Н. 1971. *Динамика потока и русла в неприливных устьях рек*. М., Гидрометеоиздат: 260 с.

18. Михайлов В.Н. 1998. *Гидрология устьев рек: учебник*. М., изд-во МГУ: 176 с.

19. *Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы*. 2002. М., Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России: 103 с.

20. *Руководство по контролю качества питьевой воды. Том 2. Гигиенические критерии и другая релевантная информация*. 1987. М., Медицина: 326 с.

REFERENCES

1. Mikhaylov V.N. 1997. *Ust'ya rek Rossii i sopredel'nykh stran: proshloe, nastoyashchee i budushchee*. [*Mouths of rivers in Russia and neighboring countries: past, present and future*]. Moscow, GEOS: 413 p. (In Russian).

2. Filippov Yu.G. 2015. [The impact of the Don River runoff on the water level in the Taganrog Bay]. *Russian Meteorology and Hydrology*. 40(2): 127–130. doi: 10.3103/S1068373915020090

3. Chikin A.L., Kleshchenkov A.V., Chikina L.G. 2019. Numerical study of the water flow effect on the water level in the Don mouth. *Physical Oceanography*. 26(4): 316–325. doi: 10.22449/1573-160X-2019-4-316-325

4. Simov V.G. 1989. *Gidrologiya ust'ev rek Azovskogo morya*. [*Hydrology of the river mouths of the Sea of Azov*]. Moscow, Gidrometeoizdat: 328 p. (In Russian).

5. Bespalova L.A, Tsygankova A.E., Bespalova E.V. Misirov S.A. 2020. [Storm surges in the Sea of Azov and their impact on abrasion processes]. In: *Trudy Yuzhnogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. Tom VIII: Modelirovanie i analiz opasnykh prirodnykh yavleniy v Azovskom regione*. [*Studies of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences. Issue VIII: Modelling and analysis of natural hazards in the Sea of Azov Region*]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 111–121. (In Russian). doi: 10.23885/1993-6621-2020-8-111-121

6. *Rukovodstvo po raschetu elementov gidrologicheskogo rezhima v pribrezhnoy zone morey i v ust'yakh rek pri inzhenernykh izyskaniyakh*. [*Guidelines for the calculation of the elements of the hydrological regime in the coastal zone of the seas and in the estuaries of the rivers during engineering surveys*]. Moscow, Gidrometeoizdat: 535 p. (In Russian).

7. Magritskiy D.V. 2016. [Dangerous hydrological phenomena and processes in river mouths: terminology and classification] *Nauka. Tekhnika. Tekhnologii (politekhnicheskiy vestnik)*. 2: 35–61. (In Russian).

8. Zyryanov V.N., Chebanova M.K., Filatov N.N. 2015. Seawater intrusion into river mouths. *Water Resources*. 42(5): 616–626. doi: 10.1134/S00978078150501

9. [Operational data of measured water flow rates at gauging stations (KN-15, Section 6). Period 7 days]. *ESIMO*. Available at: http://esimo.ru/portal/portal/esimo-user/data/default-roles-userWindow?anyword=%D0%BA%D0%BD-15 (accessed 5 April 2021). (In Russian).

10. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu poverkhnostnykh vod sushi. Chast' 1. [Guidelines for the chemical analysis of land surface waters. Part 1*]. 2009. Rostov-on-Don, Southern Federal University: 1150 p. (In Russian).

11. Matishov G.G., Kleshchenkov A.V., Bulysheva N.I., Kreneva K.V., Semin V.L., Glushenko G.Yu. 2019. [Modern problems of the development of natural-territorial systems of the Tsimlyansk reservoir and the Lower Don]. In: *Nauchnye problemy ozdorovleniya rossiyskikh rek i puti ikh resheniya. Sbornik nauchnykh trudov. Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem* [*Scientific problems of Russian rivers recovery and the ways of their solution. All-Russian Scientific Conference with international participation (Nizhny Novgorod, Russia, 8–14 September 2019)*]. Moscow, Studiya F1: 30–35. (In Russian).

12. Matishov G.G., Kleshchenkov A.V., Grigorenko K.S., Moskovets A.Yu., Kirillova E.E. 2018. [Water balance changes in the basin of the Lower Don under conditions of lack of water]. *Nauka Yuga Rossii*. 14(3): 45–55. (In Russian). doi: 10.7868/S25000640180306

13. Matishov G.G., Grigorenko K.S. 2017. Causes of salinization of the Gulf of Taganrog. *Doklady Earth Sciences*. 477(1): 1311–1315. doi: 10.1134/S1028334X17110034

14. *Tsimlyanskoe vodokhranilishche: sostoyanie vodnykh i pribrezhnykh ekosistem, problemy i puti ikh resheniya*. [*The Tsimlyansk water reservoir: conditions of water and costal ecosystems, the problems and the ways of their solutions*]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 216 p. (In Russian).

15. Magritskiy D.V. 2016. [Hazardous hydrological processes at the mouth of the Don and long-term tendencies in the change of their parameters]. In: *Aktual'nye voprosy gidrologii i geoekologii. Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu Permskogo gosudarstvennogo natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta.* [*Topical

issues of hydrology and geoecology. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 100th anniversary of the Perm State National Research University (Perm, Russia, 17–18 October 2016)]. Perm, Perm State National Research University: 35–41. (In Russian).

16. Mikhailova M.V. 2013. Processes of seawater intrusion into river mouths. *Water Resources*. 40(5): 483–498. doi: 10.1134/S0097807813050059

17. Mikhaylov V.N. 1971. *Dinamika potoka i rusla v neprilivnykh ust'yakh rek*. [*Flow and channel dynamics in non-tidal estuaries*]. Moscow, Gidrometeoizdat: 260 p. (In Russian).

18. Mikhaylov V.N. 1998. *Gidrologiya ust'ev rek: uchebnik*. [*Hydrology of river mouths: textbook*]. Moscow, Moscow State University: 176 p. (In Russian).

19. *Pit'evaya voda. Gigienicheskie trebovaniya k kachestvu vody tsentralizovannykh sistem pit'evogo vodosnabzheniya. Kontrol' kachestva. Sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normativy*. [*Drinking water. Hygienic requirements for water quality of centralized drinking water supply systems. Quality control. Sanitary and epidemiological rules and regulations*]. Moscow, Federal Center for State Sanitary and Epidemiological Supervision of the Ministry of Health of Russia: 103 p. (In Russian).

20. *Rukovodstvo po kontrolyu kachestva pit'evoy vody. Tom 2. Gigienicheskie kriterii i drugaya relevantnaya informatsiya*. [*Guidelines for drinking water quality control. Vol. 2. Hygiene criteria and other relevant information*]. Moscow, Meditsina: 326 p. (In Russian).

Поступила 19.04.2021

УДК 551.463.8

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СКОРОСТИ ОСАЖДЕНИЯ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА ВОД В УСТЬЕ ДОНА И ТАГАНРОГСКОМ ЗАЛИВЕ [1]

© 2021 г. В. С. Герасюк[1], С. В. Бердников[1, *]

[1]Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия

**e-mail: berdnikovsv@yandex.ru*

Поступила в редакцию 09.06.2020 г.
После доработки 12.10.2020 г.
Принята к публикации 18.03.2021 г.

Выполнено экспериментальное определение влияния солености и других контролирующих факторов (концентрация взвеси, органический материал) на скорость оседания частиц пелитовой и алевритовой размерности в устьевой области р. Дон и Таганрогском заливе. В лабораторных условиях изучалось изменение концентрации взвеси в пресной и соленой воде после внесения в нее суспензии частиц из проб донных отложений, отобранных в дельте р. Дон. Свежеотобранные пробы содержали частицы алевритовой (0.1–0.01 мм), пелитовой (0.01–0.001 мм) размерности, также субколлоидной фракции (<0.001 мм). Для объяснения наблюдаемой в эксперименте динамики осветления воды в результате осаждения взвеси предложено три модели: 1) взвесь однородна по размерам, скорость оседания не изменяется со временем; 2) взвесь неоднородна по размерам и состоит из двух размерных групп частиц, имеющих разную скорость оседания (в частности, предполагается, что процесс укрупнения взвеси (аналог коагуляции, флоккуляции) происходит “мгновенно” в первые минуты эксперимента); 3) процесс укрупнения взвеси происходит не мгновенно, а в течение первых 20 мин после поступления взвеси в среду, потом взвесь начинает оседать. Показано, что экспериментальным данным удовлетворяют вторая и третья модели. При этом скорость оседания увеличивается с ростом концентрации взвешенного вещества после внесения суспензии, как в пресную, так и в морскую среду. Максимальная скорость осаждения частиц пелитовой размерности наблюдается в диапазоне солености 2–4 г/л. После удаления органического материала из суспензии взвеси скорость оседания уменьшилась более чем в 2 раза в диапазоне солености 0–9 г/л.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, взвешенное вещество, скорость осаждения, эстуарий, соленость, Таганрогский залив, устье Дона

DOI: 10.31857/S0030157421040055

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы осадконакопления в переходных зонах системы река–море (маргинальных фильтрах (МФ) по терминологии А.П. Лисицына [8]) остаются актуальными по сей день во всем мире [5–7, 10, 11, 24–26, 28]. Отмечается, что “главное значение для крупных (алевритовых и песчаных) зерен взвеси играет резкое снижение скорости несущего потока, что приводит к уменьшению вертикальной составляющей турбулентного потока и осаждению частиц. Для более мелких частиц пелитовой размерности, обладающих свойствами природных коллоидов, главное значение имеет другой процесс – смешение пресной воды с морской – электролитом. Это приводит к коагуляции и массовому выпадению тонкой части взвеси. ... Главные процессы в МФ идут в его второй, солоноватоводной части, причем особенно в ее начале, в интервале солености 1–5‰. Здесь возникают уникальные участки, где концентрация взвеси выше, чем в конечных членах смешения – в речных и морских водах. Это связано с процессами коагуляции и флоккуляции, когда под влиянием электролита растворенная органика, железо, алюминий и ряд других элементов переходят из раствора во взвесь” [8].

Устьевая область р. Дон и Таганрогский залив отнесены к областям лавинной седиментации со скоростью осадконакопления 100 мм/1000 лет [9]. Это довольно высокие скорости. Оценки, выполненные для периода 1987–2000 гг., дают скорость накопления сухого терригенного материала в донных отложениях Таганрогского залива на уровне 500–1000 г/м^2 в год, что примерно на два порядка ниже – 1 мм/1000 лет [18].

[1] **Оригинальный текст:** *Герасюк В.С., Бердников С.В.* Экспериментальная оценка скорости осаждения взвешенного вещества вод в устье Дона и Таганрогском заливе // Океанология. 2021 Т. 61. № 5. С. 780–790.

В связи с гидротехническим строительством на Нижнем Дону годовой твердый сток сократился до 400 тыс. т [16–18]. С 2007 г. на Нижнем Дону наблюдается маловодный период. Имеются оценки, что в 2010–2014 гг. в створе станицы Раздорская годовой твердый сток уменьшился до 150 тыс. т [4]. В условиях экстремально низкого донского стока наблюдается проникновение соленых вод глубоко в дельту [12]. После создания Цимлянского водохранилища и ряда низконапорных гидроузлов ниже по течению существенно трансформировался гранулометрический состав речной взвеси, выносимой на морской край дельты [2, 13, 17, 20]. Эти изменения не могли не отразиться на процессах переноса и седиментации взвешенных наносов в устьевой области Дона и в Таганрогском заливе.

В период 2006–2018 гг. выполнялись экспедиционные исследования гидрологического и гидрохимического режима на Нижнем Дону и в Таганрогском заливе. Результаты измерений в дельте Дона (за период 2007–2014 гг.) показывают, что содержание взвеси в донской воде в среднем колеблется в интервале 20–30 мг/л. Минимальные (3 мг/л) значения концентрации взвеси характерны для зимнего сезона, когда река покрыта льдом, максимальные (до 50–70 мг/л) – для весеннего и летнего сезонов [19]. В устьях рукавов концентрация взвеси увеличивается, причинами этому могут быть сгонно-нагонные колебания вод, вызывающие взмучивание донных осадков мелководного взморья. Концентрация взвешенного органического углерода изменялась в диапазоне 0.05–3.72 мгС/л, а медиана всех измеренных значений составила 0.53 мгС/л, среднее содержание органического углерода в общей взвеси составляло 4–5%. Несмотря на большое половодье в 2018 г., ситуация в целом сохраняется.

В работе [11] при изучении геохимии взвешенного вещества в устьевой области Волги авторы выделяют три этапа МФ – гравитационный (зона с соленостью 0–2 г/л), коагуляционно-сорбционный (зона с соленостью 2–7 г/л) и биологический (соленость >7 г/л). Отмечается, что во второй зоне происходят основные процессы трансформации состава взвешенного вещества, для нее характерно увеличение концентрации взвеси за счет физико-химических процессов (коагуляции и флоккуляции органических и металлорганических коллоидов) с максимальными значениями при солености 5.5–6 г/л.

Наблюдения в Таганрогском заливе, выполненные практически во все сезоны 2006–2018 гг. (в интервале изменения солености 0–10 г/л), показывают, что рассмотренная выше "классическая" схема с максимумом концентрации взвеси при солености 5.5–6 г/л наблюдается крайне редко (рис. 1). Увеличение концентрации взвеси наблюдается при разных значениях солености. Это может быть связано с продукционными процессами, результатом взмучивания донных отложений при штормах, а также с физико-химическими процессами (коагуляция, флоккуляция), но степень детальности проводимых геохимических исследований не позволяет делать здесь однозначные выводы. Более того, проникновение при штормовых нагонах соленых вод в дельту приводит к тому, что зона с соленостью вод 0–5 г/л располагается уже не на устьевом взморье, а непосредственно в рукавах и на затопляемых участках. Так, при экстремальном нагоне в сентябре 2014 г. вода с соленостью 5 г/л достигла водозабора г. Азов (20 км от устья Дона, середина дельты) [12].

Таким образом, механизмы процессов, происходящих на границе "река–море", сложны, а влияние основных контролирующих параметров на скорость оседания природных частиц неоднозначно и является предметом дискуссий.

В ранних работах особое внимание уделялось исследованиям взаимосвязи скоростей осаждения и минерального состава взвешенного вещества, а также проводились подробные микроскопические исследования самих флоккул [21–23]. В ходе полевых и лабораторных измерений было установлено, что даже в случае одинаковой концентрации взвеси в пределах одного и того же района могут происходить большие изменения в скоростях оседания, вплоть до двух порядков по величине [27].

Проведение экспериментальных исследований не прекращаются. Так, в работе [24] выявлено усиление флоккуляционных процессов с увеличением концентрации взвеси, но не с увеличением солености. Наибольшая скорость наблюдалась при высокой концентрации взвеси и солености ниже 2.5 г/л, а при солености выше 20 г/л – чем ниже концентрация взвеси, тем выше скорость осаждения.

При разработке математической модели переноса и седиментации взвешенного вещества в Азовском море [18] выделено 5 размерных фракций взвеси, также был предусмотрен переход частиц из одной фракции в другую с изменением солености (аналог механизма коагуляции). Однако из-за отсутствия количественных данных о скорости осаждения (при разной солености) частиц взвеси основных размерных фракций, присутствующих в устьевой области р. Дон и Таганрогском заливе (пелит и мелкий алеврит), этот механизм фактически не был применен.

Цель настоящей работы – экспериментально оценить влияние солености, концентрации взвеси и ее органической составляющей для понимания того, что следует ожидать в области смешения донских вод с водами Азовского моря.

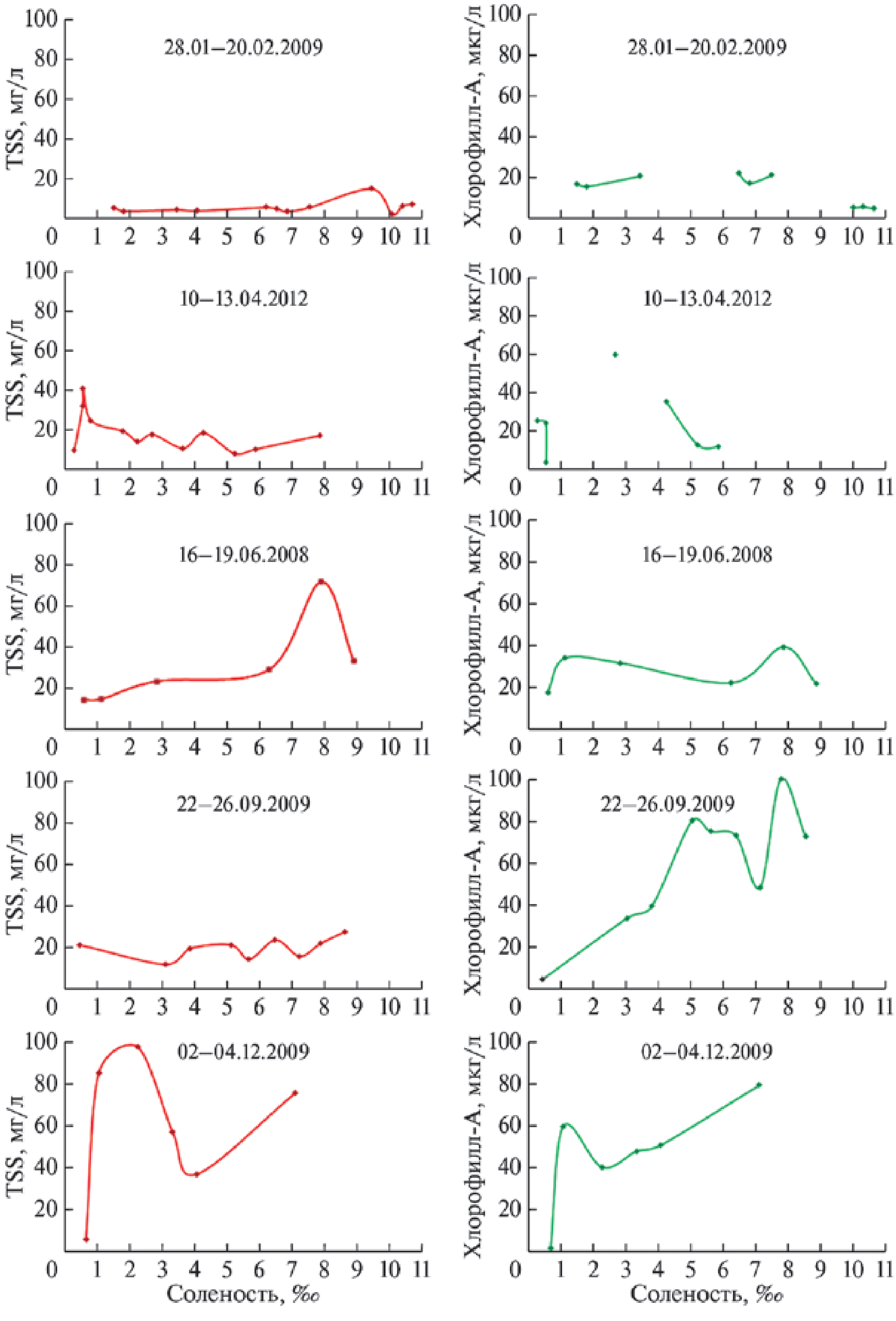


Рис. 1. Примеры зависимости концентрации взвеси (мг/л) и хлорофилла-А от солености в экспедиционных исследованиях в Таганрогском заливе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалом для работы послужили пробы донных отложений, отобранные при помощи дночерпателя Петерсена в дельте р. Дон на расстоянии 30 м от уреза воды (47°06.607′ с.ш., 39°18.733′ в.д.). Первоначальный гранулометрический анализ показал, что свежеотобранные пробы содержат в себе два основных размерных класса частиц: алеврит (0.1–0.01 мм) и пелит

(0.01–0.001 мм), также среди пелита выделяется субколлоидная фракция (<0.001 мм).

Предварительная обработка проб и подготовка материала для экспериментов. Обработка проб производилась по методу [1]. На подготовительном этапе эксперимента навеску пробы естественной влажности помещали в стакан с водопроводной водой, кипятили и подвергали ультразвуковой обработке в течение 3 мин. Этого времени достаточно, чтобы разрушить глинистые агрегаты, но не затронуть минералы. Далее суспензию из стакана переливали в мерный цилиндр (объем 1000 мл, диаметр 60 мм), доводили объем воды до 1000 мл и взбалтывали полученную суспензию. Предварительно перед сбором пелитовой фракции в сосуды производилось 2–3 слива воды для очистки суспензии от частиц органического вещества алевритовой размерности. После каждого слива объем воды в сосуде снова доводили до 1000 мл и взмучивали. Через 28 мин, в соответствии с таблицей времени осаждения частиц различного диаметра по [14], производили слив примерно 500–600 мл воды, содержащей взвесь, из средней части мерного цилиндра. Слив производили несколько раз в предварительно подготовленные пластиковые сосуды объемом 1500 мл до их полного заполнения. Затем заполненные сосуды оставляли до максимального осаждения частиц, далее избавлялись от лишнего объема воды и получали густой объем взвеси.

Размерный состав частиц полученной взвеси был установлен с использованием лазерных анализаторов Shimadzu (марка SALD-201V) и ЛАСКА-Т (Д).

Содержание органического вещества в пробе донных отложений анализировали по методу Тюрина в модификации ЦИНАО [3]. Оставшуюся терригенную взвесь после сожжения в ней органического вещества использовали на следующем этапе эксперимента для установления роли органической составляющей в процессе осаждения.

С использованием фильтрованной через стекловолокнистый фильтр марки GF/F (диаметр пор 0.7 мкм) воды Черного моря (с содержанием солей 19 г/л) и водопроводной воды с минерализацией 0.7 г/л были приготовлены серии растворов различной солености (1–9 г/л). Раствор воды соленостью 35 г/л был приготовлен с добавлением морской соли в нужной пропорции.

Ход проведения эксперимента. При помощи пипетки Мора в каждый пластиковый сосуд объемом 1500 мл с водой определенного содержания солей добавляли одинаковое количество густой водной суспензии и тщательно перемешивали. Через равные промежутки времени из каждого сосуда с глубины 1.5 см от поверхности мерной пипеткой (объем 20 мл) отбирали пробы для измерения оптической плотности полученных суспензий, при этом избегали взмучивания образовавшегося осадка. Первый час измерения проводились каждые 10 мин, следующие 2–3 ч – примерно раз в 30 мин до тех пор, пока значения оптической плотности стабилизировались. Оптическая плотность частиц в воде регистрировалась при помощи фотометра “Эксперт-003” на длине волны 880 нм в 5-см кювете. Предварительно была проведена процедура калибровки фотометра во время экспедиции в район Нижний Дон—восточная часть Таганрогского залива, в результате чего была получена калибровочная кривая ($R = 0.96$) зависимости оптической плотности от концентрации взвешенного вещества, измеренного гравиметрическим методом [15], что позволило получить абсолютные значения содержания взвеси в мг/л (рис. 2).

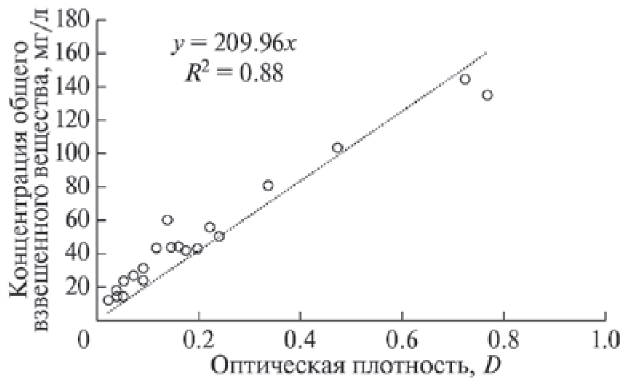


Рис. 2. Результат калибровки фотометра “Эксперт-003” для определения содержания общего взвешенного вещества.

Обработка результатов экспериментов. Результаты определения оптической плотности отобранных из сосудов суспензий заносили в таблицу с указанием времени отбора пробы в минутах относительно начала эксперимента.

По формуле (1) выполняли оценку концентрации взвеси (C, г/м^3), соответствующей оптической плотности (D, у.е.) раствора, измеренной фотометром “Эксперт-003” на длине волны 880 нм в 5-сантиметровой кювете:

$$C = 209.86D. \quad (1)$$

Для оценки динамики концентрации взвеси в верхней части пластикового сосуда рассматривалось три модели (М1, М2 и М3).

В модели М1 (рис. 3) предполагалось, что скорость оседания частиц не изменяется. Тогда нормированная кривая изменения концентрации взвеси со временем аппроксимируется следующей формулой (2):

$$\delta C(t) = D(t)/D(0) = C(t)/C(0) = \exp(-mt), \quad (2)$$

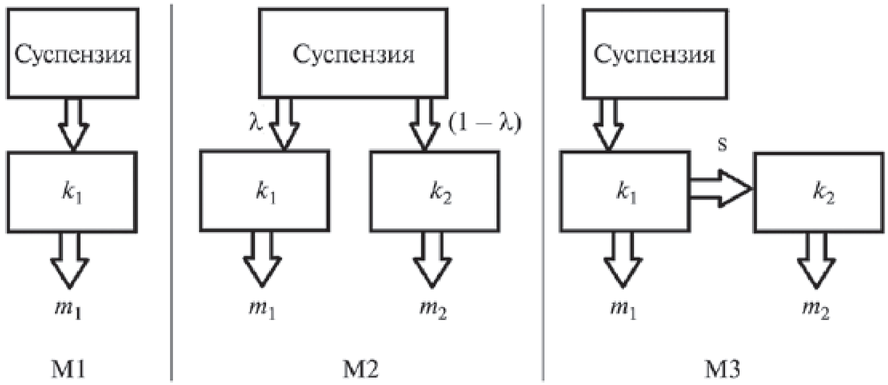


Рис. 3. Схематичное представление трех моделей (M1, M2 и M2) “поведения” частиц суспензии после переноса в экспериментальный сосуд с водой разной солености.

где:

$\delta C(t)$ – нормированная концентрация взвеси в момент времени t;

$D(t)$, $D(0)$ – измеренная оптическая плотность раствора в момент времени t и в начальный момент времени;

$C(t)$, $C(0)$ – концентрация взвеси, рассчитанная по формуле (1) в момент времени t и в начальный момент времени, мг/л;

t – время от начала эксперимента, мин;

m – интенсивность осветления воды в результате оседания взвешенных частиц, 1/мин.

Скорость оседания частиц (гидравлическая крупность, ω) связана с величиной m соотношением (3):

$$\omega \cong mH, \tag{3}$$

где H – высота слоя воды, из которого осаждается взвесь, в нашем случае – 1.5 см.

В модели M2 (рис. 3) мы предполагаем две возможности. Во-первых, экспериментальная суспензия может состоять из частиц разного размера, поэтому у них будет разная скорость оседания. Во-вторых, можно предположить, что после попадания суспензии в водную среду в результате процессов коагуляции (флоккуляции) формируется две группы частиц, имеющих разный размер и соответственно разные скорости осаждения. Тогда нормированная кривая изменения концентрации взвеси со временем аппроксимируется следующей формулой (4):

$$\begin{aligned} \delta C(t) &= D(t)/D(0) = C(t)/C(0) = \\ &= \gamma \exp(-m_1 t) + (1-\gamma)\exp(-m_2 t), \end{aligned} \tag{4}$$

где:

γ – доля частиц, имеющих более низкую скорость осаждения;

m_1, m_2 – интенсивность осветления воды в результате оседания менее крупных и более крупных взвешенных частиц, соответственно, 1/мин.

При этом в качестве оценки средней интенсивности осветления воды можно использовать следующее соотношение (5):

$$m = \gamma m_1 + (1-\gamma) m_2. \tag{5}$$

В модели M3 (рис. 3) реализована другая возможность. Частицы суспензии меньшего размера, попадая в воду, начинают укрупняться от размера k_1 до размера k_2.

Динамические уравнения имеют вид (6):

$$\begin{aligned} dC_1/dt = -(m_1 + s)C_1, \quad dC_2/dt = sC_1 - m_2 C_2, \\ C(t) = C_1(t) + C_2(t), \quad C(0) = C_1(0), \quad C_2(0) = 0, \end{aligned} \tag{6}$$

где:

$C(t)$ – общее содержание взвеси в момент времени t, мг/л;

$C_1(t)$ – концентрация взвеси размера k_1, мг/л;

$C_2(t)$ – концентрация взвеси размера k_2, мг/л;

s – интенсивность укрупнения взвеси, 1/мин;

m_1, m_2 – интенсивность осветления воды в результате оседания менее крупных и более крупных взвешенных частиц, соответственно, 1/мин.

Здесь предполагается, что в начальный момент времени в суспензии нет частиц размера k_2, т.е. $C_2(0) = 0$.

Тогда нормированная кривая изменения концентрации взвеси со временем аппроксимируется следующей формулой (7):

Таблица 1. Гранулометрический состав экспериментальных суспензий, %

Этап проведения эксперимента		Алеврит (мм)		Пелит (мм)		
		0.1–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001
I		14	58	17	11	–
II	1 серия	3	32	29	33	3
	2 серия	–	4	31	60	5
III		1	28	37	33	1

Примечание: "–" не обнаружено.

$$\delta C(t) = D(t)/D(0) = C(t)/C_1(0) = \left| \begin{array}{l} = \exp(-(m_1+s)t) + st\exp(-m_2 t), \\ \text{если } m_2 = m_1 + s \\ = (1-r)\exp(-(m_1+s)t) + r\exp(-m_2 t), \\ \text{если } m_2 \neq m_1 + s, \\ r = s/(m_1 + s - m_2). \end{array} \right. \quad (7)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные работы состояли из 3 этапов. Проба донных отложений для формирования экспериментальной суспензии взвеси отбиралась непосредственно перед проведением каждого этапа. Гранулометрический состав частиц в экспериментальных суспензиях приведен в табл. 1.

Этап 1. Задача первого этапа заключалась в оценке влияния концентрации взвеси на скорость ее осаждения в пресных и "морских" водах. Для этого в три емкости с пресной (0.7 г/л) и в три емкости с соленой (35 г/л) водой добавили одинаковые порции (1.5, 7.5, 15 мл) высококонцентрированной суспензии с содержанием в ней как пелитовых, так и алевритовых фракций (табл. 1).

В первой серии природная взвесь состояла из частиц алевритовой (72%) и пелитовой (28%) размерности. В пересчете на концентрацию взвеси в воде ее значения после внесения в воду изменялись от 70 до 560 мг/л. Наиболее значительное снижение содержания частиц наблюдается в течение первых 30 мин (рис. 4). В сосудах с пресной водой примерно на 100 мин эксперимента концентрация взвеси стабилизировалась. В сосудах с соленой водой взвесь продолжала оседать. В качестве оценки скорости оседания рассчитана доля осевшей (из верхнего слоя 1.5 см) взвеси за первые 30 мин эксперимента.

Первый этап экспериментов позволил сделать следующие выводы:

– в соленой воде взвесь начинает осаждаться быстрее, чем в пресной;

– на скорость осаждения взвеси влияет начальная концентрация взвеси (после внесения высококонцентрированной суспензии в воду и перемешивания), но больше в соленой воде, чем в пресной;

– динамика изменения концентрации взвеси не аппроксимируется моделью М1.

Результаты этого эксперимента привели к необходимости изменить подход к дальнейшему проведению работ. Было принято решение максимально устранить из суспензии частицы алевритовой размерности, проводить эксперименты в сосудах с водой, где соленость изменялась от 0.7 до 10 г/л с шагом 1 г/л, и добиться, чтобы начальная концентрация взвеси была близка к наблюдаемой в устьевой области Дона – порядка 100 мг/л.

Этап 2. На втором этапе выполнено 2 серии экспериментальных работ. В первой серии не удалось существенно снизить долю частиц алевритовой размерности, во второй серии их доля уже не превышала 4% (табл. 1).

Типичный график эксперимента представлен на рис. 5. Здесь показана динамика $\delta C(t)$ и ее аппроксимация моделями М1–М3. Справа представлены диаграммы соответствия между экспериментальными данными и оценками с применением модели М2 и М3.

Оценка параметра m модели М1 выполняется методом наименьших квадратов. Для модели М2 и М3 параметры s, γ, m_1 и m_2 подбирались "вручную" так, чтобы разница между экспериментальными и расчетными значениями была минимальной (рис. 5).

Всего на втором этапе было выполнено 6 экспериментов (два в первой серии и четыре во второй). Содержание вносимой взвеси подбиралось таким образом, чтобы начальная концентрация взвешенного вещества в сосуде была максимально приближена к реальным условиям исследуемой области (среднее значение составило 90 мг/л). Для второй серии на этом этапе удалось после предварительной обработки пробы (см. раздел "Материалы и методы исследований") получить взвесь с преобладанием пелитовой фракции (табл. 1). Итоговый результат представлен в виде графика, на котором изображены средние (и разброс) по всем экспериментам значения доли осевшей взвеси из верхнего слоя толщиной 1.5 см после 30 мин после его начала (рис. 6).

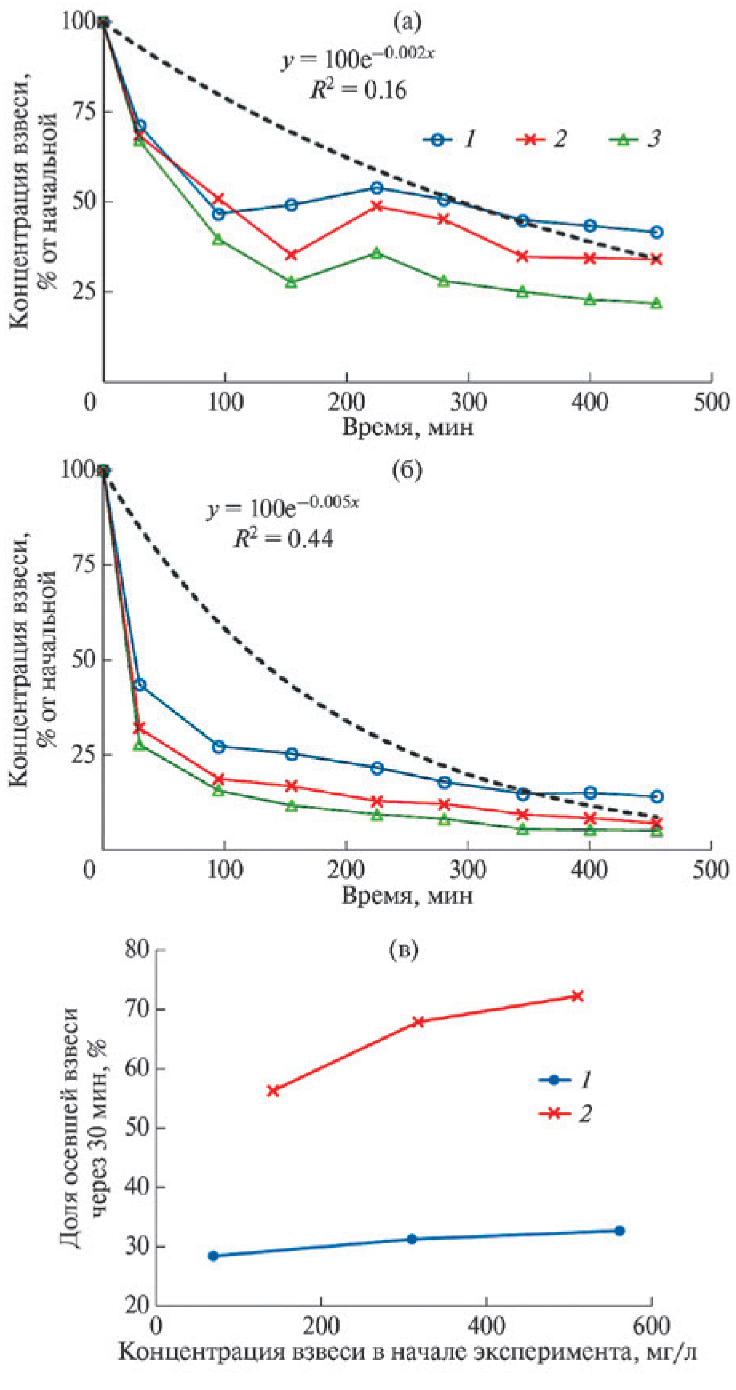


Рис. 4. Динамика взвеси на первом этапе экспериментов. (а) – Водопроводная вода, (б) – вода с содержанием солей 35 г/л, *1* – объем вносимой суспензии 1.5 мл; *2* – 7.5 мл, *3* – 15 мл. Пунктирная линия – аппроксимация эксперимента моделью М1 с внесением 1.5 мл суспензии. (в) – Доля осевшей взвеси после 30 мин. от начала эксперимента. *1* – в водопроводной воде, *2* – в воде с содержанием солей 35 г/л.

Экспериментальные данные позволяют сделать вывод об увеличении скорости осаждения взвеси в интервале солености 2–3 г/л с последующим спадом в воде с соленостью более 5 г/л.

Одной из возможных причин этого может быть увеличение размера оседающих частиц (с пелитовой до мелко- и крупноалевритовой размерности). При этом укрупняется примерно 70%

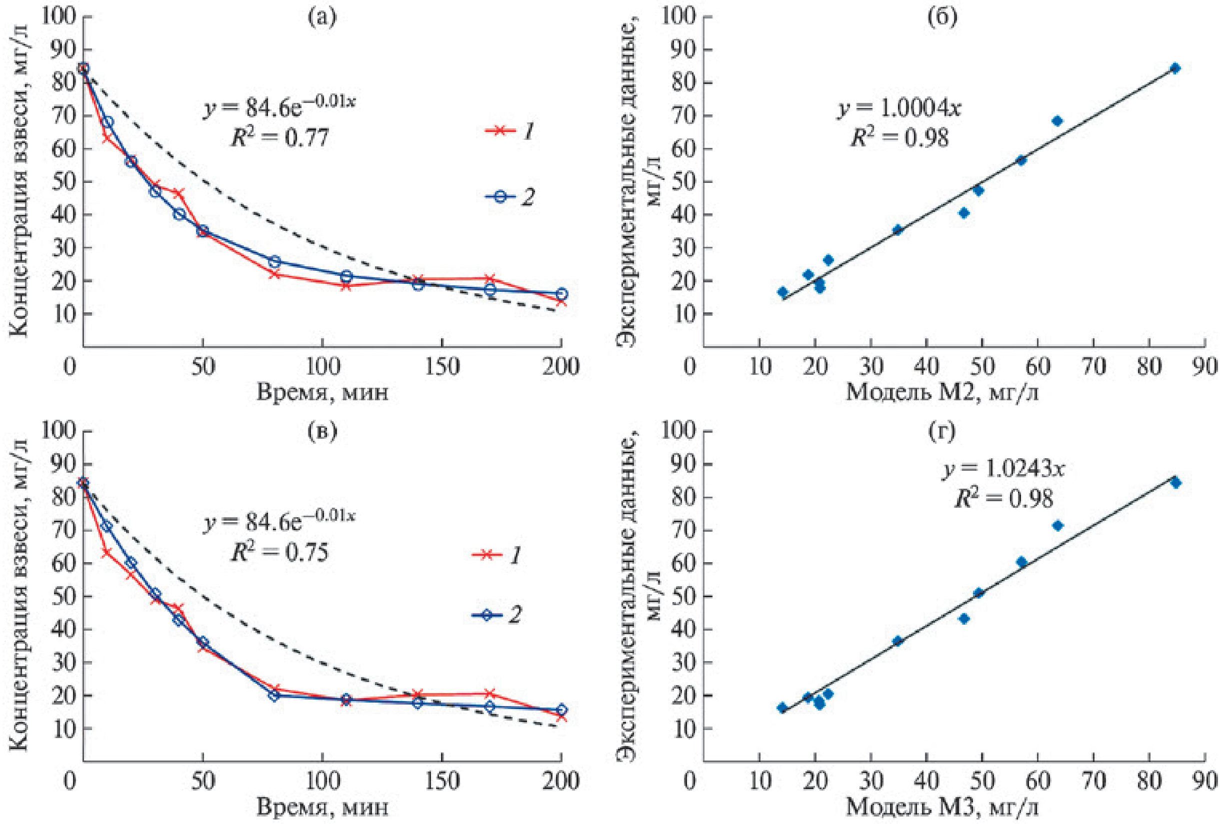


Рис. 5. Иллюстрация приближения экспериментальных данных с помощью трех моделей. (а, в) – Изменение концентрации взвеси (*1*) в верхнем (1.5 см) слое экспериментального сосуда со временем при внесении суспензии в воду соленостью 3 г/л и ее приближение: моделью М1 (пунктирная линия), *2* – с помощью модели М2, при $\gamma = 29\%$, $m_1 = 2$ 1/тыс. мин, $m_2 = 30$ 1/тыс. мин, *3* – с помощью модели М3, при $s = 187$ 1/тыс. мин, $m_1 = 2$ 1/тыс. мин; $m_2 = 30$ 1/тыс. мин. (б, г) – Диаграммы соответствия между экспериментальными данными и моделями М2 и М3 соответственно.

внесенной в воду взвеси, а скорость осаждения увеличивается примерно в 10–15 раз.

Осаждение частиц, как с однородным гранулометрическим составом, так и со смешанным, имеет схожий характер, даже при условии трехкратной разницы в концентрациях взвеси. Полученные результаты дают основание полагать, что размерный состав частиц является важным, но не определяющим фактором, который влияет на скорость осветления.

Этап 3. Для определения роли биогенного материала в осаждении взвеси нами был проведен третий этап эксперимента (рис. 7), в котором использовалось взвешенное вещество, состоящее преимущественно из частиц пелитовой размерности (табл. 1).

Содержание органического вещества в суспензии составило 4.16%. Эксперимент проводился дважды: до сожжения органики и после, используя оставшуюся взвесь. Ход проведения

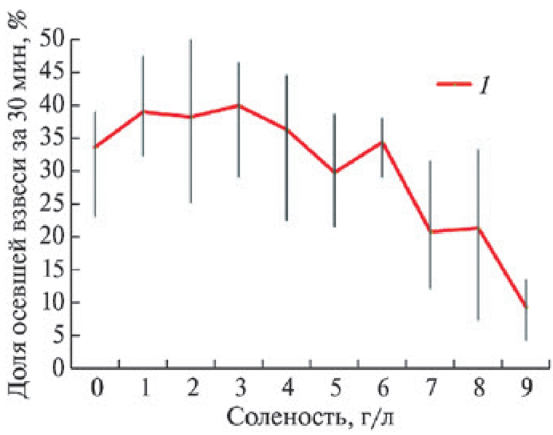


Рис. 6. Доля осевшей взвеси (после первых 30 мин эксперимента) при разной солености, характерной для устьевой области р. Дон и Таганрогского залива. *1* – среднее значение из всех экспериментов, вертикальная линия – размах от максимального до минимального значения.

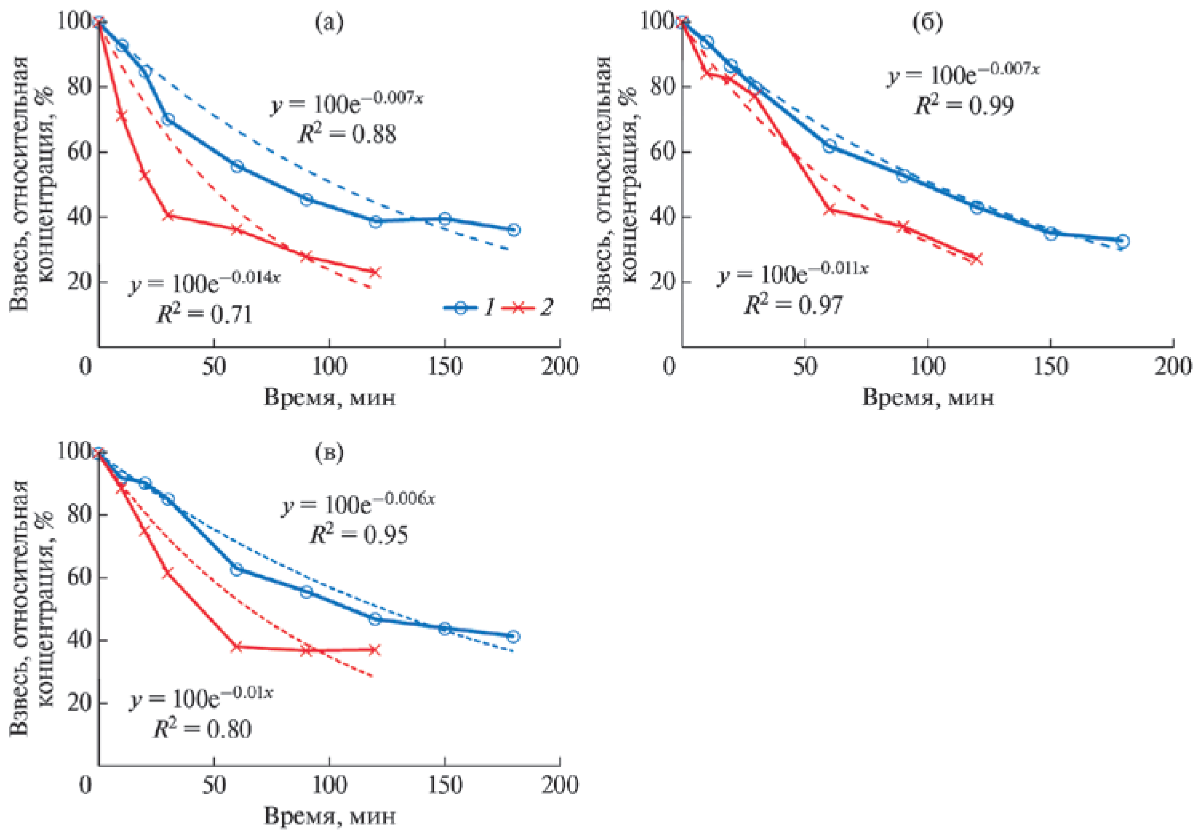


Рис. 7. Изменение концентрации взвеси со временем в эксперименте с наличием органического вещества в суспензии (*2*) и без, после сожжения (*1*). Пунктиром обозначено приближение моделью М1. (а) – Водопроводная вода, (б) – вода с содержанием солей 5 г/л, (в) – вода с содержанием солей 9 г/л.

эксперимента оставался таким же, как и на предыдущих этапах для трех сред – водопроводной воды и воды с соленостью 5 и 9 г/л. В целом, для серии экспериментов с минеральной взвесью (после сожжения органического вещества) эмпирические данные были наиболее приближены к теоретической кривой, соответствующей модели М1 (рис. 7), что говорит о практически неизменной скорости оседания частиц в период эксперимента. Это, в свою очередь, может указывать на отсутствие каких-либо еще дополнительных процессов, влияющих на простое механическое оседание. В частности, для минеральной (без органической компоненты) взвеси также наблюдается отсутствие влияния солености на скорость осаждения. Взвесь с органическим веществом оседает быстрее (рис. 7), чем частицы без органического вещества, а также скорость оседания выше для всех сред более чем в 2 раза.

ВЫВОДЫ

1. Лабораторные эксперименты показали явное влияние солености на скорость осаждения частиц. Максимальная скорость осаждения наблюдалась в диапазоне 1–4‰, довольно резко уменьшаясь после 5‰. При этом основным процессом увеличения скорости осаждения взвеси является укрупнение частиц пелитовой размерности (однако это явным образом не доказано из-за отсутствия в нашем распоряжении оборудования для контроля гранулометрического состава взвеси в ходе эксперимента).

2. Мы убедились, что концентрация взвеси определяет скорость осаждения как в пресной, так и в соленой воде, при этом в соленой воде скорость осаждения выше.

3. И наконец, мы показали, что ускоренное осаждение взвеси может быть связано напрямую с наличием органического вещества в пробе.

4. Необходимо учитывать многие присущие эксперименту ограничения. Они связаны как с простотой используемого оборудования для оценки мутности воды в ходе экспериментов, так и с неизбежными погрешностями из-за большого числа манипуляций.

Вместе с тем мы получили количественные оценки скоростей осаждения природной взвеси при ее перемещении от устья Дона к морю в Таганрогском заливе.

Источники финансирования. Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гр. проекта 01201363188 и АААА-А19-119040390084-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреева И.А., Лапина Н.Н.* Методика гранулометрического анализа донных осадков Мирового океана и геологическая интерпретация результатов лабораторного изучения вещественного состава осадков. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1998. 45 с.
2. *Бронфман А.М., Хлебников Е.П.* Азовское море: основы реконструкции. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 271 с.
3. ГОСТ 26213-91 Почвы. Методы определения органического вещества. М.: Издательство стандартов, 1992.
4. *Клещенков А.В.* Особенности твердого стока р. Дон в современный маловодный период // Сб. докл. междунар. науч. конф. “Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии”. Санкт-Петербург, 28–30 марта 2018 г. / Под ред. Макарьева О.М. СПб.: Наукоемкие технологии, 2018. С. 591–594.
5. *Коченкова А.И., Новигатский А.Н., Гордеев В.В.* Распределение взвеси в маргинальном фильтре Северной Двины в конце лета // Успехи современного естествознания. 2018. № 2. С. 106–112.
6. *Кравчишина М.Д., Клювиткин А.А., Паутова Л.А. и др.* Хлорофилл “а” во взвеси Каспийского моря как показатель условий биогенной седиментации // Докл. РАН. 2015. Т. 465. № 3. С. 357–362.
7. *Купцов В.М., Лисицын А.П.* Влажность, объемный вес и потоки осадочного вещества в донных отложениях моря Лаптевых // Океанология. 2003. Т. 43. № 1. С. 127–133.
8. *Лисицын А. П.* Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
9. *Лисицын А.П.* Лавинная седиментация // Лавинная седиментация в океане. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 1982. С. 3–59.
10. *Лисицын А.П., Клювиткин А.А., Буренков В.И. и др.* Распределение и состав взвешенного осадочного вещества на меридиональных разрезах в Атлантическом океане: прямые определения и спутниковые данные // Докл. РАН. 2016. Т. 466. № 2. С. 221–224.
11. *Лукашин В.Н., Кравчишина М.Д., Клювиткин А.А. и др.* Геохимия взвешенного вещества в маргинальном фильтре реки Волги // Океанология. 2019. Т. 59. № 3. С. 424–432.
12. *Матишов Г.Г., Григоренко К.С., Московец А.Ю.* Механизмы осолонения Таганрогского залива в условиях экстремально низкого стока Дона // Наука Юга России. 2017. Т. 13. № 1. С. 35–43.
13. *Матишов Д.Г., Пряхина Г.В., Федорова И.В., Сорокина В.В.* Современный сток воды и наносов в дельте реки Дон (по результатам экспедиционных исследований) // Вестник ЮНЦ. 2008. Т. 4. № 3. С. 72–77.
14. *Петелин В.П.* Гранулометрический анализ морских донных осадков: монография. М.: Наука, 1967. 265 с.
15. РД 52.24.468-2005 Взвешенные вещества и общее содержание примесей в водах. Методика выполнения измерений массовой концентрации гравиметрическим методом.
16. *Сорокина В.В.* Особенности терригенного осадконакопления в Азовском море во второй половине XX века. Дис. ... канд. географ. наук: 25.00.28. Ростов-на-Дону, 2006. 216 с.
17. *Сорокина В.В., Ивлиева О.В, Лурье П.М.* Динамика стока на устьевых участках рек Дон и Кубань во второй половине XX века // Вестник ЮНЦ. 2006. Т. 2. № 2. С. 58–67.
18. *Сорокина В.В., Бердников С.В.* Математическое моделирование терригенного осадконакопления в Азовском море // Океанология. 2008. Т. 48. № 3. С. 456–466.
19. *Сорокина В.В., Бердников С.В.* Биогенная нагрузка Дона и Кубани на экосистему Азовского моря // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 6. С. 670–684.
20. *Хрусталев Ю.П.* Основные проблемы геохимии седиментогенеза в Азовском море. Апатиты: Кольский научный центр, 1999. 247 с.
21. *Eisma D.* Flocculation and de-flocculation of suspended matter in estuaries // Neth. J. Sea Res. 1986. V. 20. P. 183–199.
22. *Gibbs R.J., Tshudy D.M., Konwar L., Martin J-M.* Coagulation and transport of sediments in the Gironde Estuary // Sedimentology. 1989. V. 36. P. 987–999.
23. *Kranck K.* Particulate matter grain-size characteristics and flocculation in a partially mixed estuary // Sedimentology. 1981. V. 28. P. 107–114.
24. *Mhashhas A., Bettina B-E, Shunqi P.* Effect of hydrodynamics factors on sediment flocculation processes in estuaries // J. Soils Sediments. 2018. V. 18(10). P. 3094–3103.
25. *Portela L.I., Ramos S., Trigo-Teixeira A.* Effect of salinity on the settling velocity of fine sediments of a harbour basin // J. Coastal Res., Spec. Issue. 2013. № 65. P. 1188–1193.
26. *Schwarzer K., Nguyen C.Th., Ricklefs K.* Sediment redeposition in the mangrove environment of Can Gio, Saigon River estuary (Vietnam) // J. Coastal Res., Spec. Issue. 2016. № 75. P. 138–142.
27. *Van Leussen W.* The variability of settling velocities of suspended fine-grained sediment in the Ems estuary // J. Sea Res. 1999. V. 41. P. 109–118.
28. *Verney R., Lafite R., Brun-Cottan J.* Flocculation Potential of Estuarine Particles: The Importance of Environmental Factors and of the Spatial and Seasonal Variability of Suspended Particulate Matter. Estuaries and coasts // J. of the Estuarine Research Federation. 2009. V. 32. № 4. P. 678–693.

Experimental Estimation of the Deposition Rate of Water Suspended Matter in the Mouth of the Don River and in Taganrog Bay

V. S. Gerasyuk[a], S. V. Berdnikov[a, #]

[a]Federal Research Centre the Southern Scientific Centre RAS, Rostov-on-Don, Russia

[#]e-mail: berdnikovsv@yandex.ru

An experimental determination was carried out concerning the influence of salinity and other controlling factors (concentration of suspended matter, organic material) on the sedimentation rate of particles of pelitic and aleuritic size in the mouth area of the Don River and in Taganrog Bay. In laboratory setting, the change in the concentration of suspended matter in fresh and salt water was studied after adding of suspension of particles from bottom sediment samples taken in the Don River delta. Live samples contained particles of aleuritic size (0.1–0.01 mm), pelitic size (0.01–0.001 mm) as well as subcolloidal fraction (<0.001 mm). For explanation of experimentally observed dynamics of water clarification as a result of suspension sedimentation, three models were proposed: 1) the suspension is uniform-size, sedimentation rate does not change eventually; 2) the suspension is inhomogeneous in size and consists of two size groups of particles with different sedimentation rates (in particular, it is assumed that the process of suspension coarsening (analogue to coagulation, flocculation) occurs “instantly” during the first minutes of the experiment); 3) the process of suspension coarsening occurs not instantly, but within the first 20 minutes after the suspension enters the environment, then the suspension begins to settle. It is shown that the second and third models satisfy the experimental data. In this case, the sedimentation rate increases with the growth of suspended matter concentration after the introduction of the suspension, both in fresh and in the marine environment. The maximum sedimentation rate of pelitic particles is observed in the salinity range of 2–4 g/L. After removal of organic material from the suspension, the sedimentation rate reduced by more than 2 times in the salinity range of 0–9 g/L.

Keywords: experimental research, suspended matter, sedimentation rate, estuary, salinity, Taganrog Bay, the mouth of the Don River

УДК 550.461/556.54 **DOI**: 10.22449/0233-7584-2020-5-582-594

Выявление вклада нагонных явлений в поступление тяжелых металлов в дельту Дона[1]

И. В. Шевердяев*, А. В. Клещенков

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия
**E-mail: ig71089@yandex.ru*

Поступила в редакцию 20.03.2020 г., после доработки – 12.05.2020 г.

Цель. На основе анализа архивных и собственных экспедиционных данных, а также с помощью математического моделирования выполнить оценку вклада нагонных явлений в поступление тяжелых металлов в дельту Дона – цель данной работы.
Методы и результаты. Были использованы математическая гидродинамическая модель *Hydrologic Engineering Center River Analysis System* (*HEC-RAS*) и оригинальная модель переноса и трансформации соединений тяжелых металлов в дельте Дона С. В. Бердникова. В моделях применялась нерегулярная расчетная сетка для дельты Доны со средним разрешением 100 × × 100 м. Ячейки сетки были сгруппированы в компартменты по гидрологическому принципу. Рассчитаны 12 сценариев динамики взвешенного вещества, растворенных и взвешенных форм Ni, Cu, Pb, Cd при нагонах различной интенсивности в условиях переменной водности и сезонной динамики развития околоводной растительности. Построены графики изменения содержания и накопления взвешенного вещества, а также картосхемы распределения осажденного вещества после нагонов в дельте по сценариям. За расчетные двое суток нагонов различной повторяемости в условиях переменной водности Дона оседает порядка 0,3–3 т соединений никеля, 0,1–1,8 т соединений меди, 0,2–1,8 т соединений свинца и 0,01–0,04 т соединений кадмия. Полученные результаты позволили выявить в качестве районов повышенного накопления осажденной взвеси и повышенной концентрации растворенных форм тяжелых металлов междуречье судоходного рукава Дона и системы рукавов Каланчи и Кутерьмы.
Выводы. Нагонные явления по своему влиянию на формирование поступления взвешенных форм тяжелых металлов превосходят речной сток. Определяющим для поступления тяжелых металлов в дельту Дона является концентрация взвешенного вещества в водах Таганрогского залива при нагонах. При этом областями наибольшего осаждения взвешенного вещества и повышенных концентраций растворенных форм тяжелых металлов являются ближайшие к Таганрогскому заливу участки, покрытые тростниковыми зарослями.

Ключевые слова: тяжелые металлы, дельта Дона, устьевая область, нагон, гидродинамическое моделирование.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №18-35-00441 мол_а и в рамках реализации государственного задания ЮНЦ РАН, № госрегистрации проекта АААА-А18-118122790121-5.

Для цитирования: *Шевердяев И. В., Клещенков А. В.* Выявление вклада нагонных явлений в поступление тяжелых металлов в дельту Дона // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 5. С. 582–594. doi:10.22449/0233-7584-2020-5-582-594

[1] **Оригинальный текст:** *Шевердяев И.В., Клещенков А.В.* Выявление вклада нагонных явлений в поступление тяжелых металлов в дельту Дона // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36. №5. С. 582–594.

Revealing the Surge Phenomena Contribution of the Heavy Metals Inflow to the River Don Delta

I. V. Sheverdyaev*, A. V. Kleschenkov

Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia
**e-mail: ig71089@yandex.ru*

Purpose. The aim of the investigation is to evaluate the surge phenomena effect upon the heavy metals inflow to the Don Delta based on analysis of the archival and expedition data, as well as using mathematical modeling.
Methods and Results. To achieve the purpose, the *Hydrologic Engineering Center River Analysis System* (*HEC-RAS*) mathematical hydrodynamic model and the original model of the heavy metal compounds' transfer and transformation in the Don Delta, developed by S. V. Berdnikov were applied. The models included the irregular grid for the Don Delta region with the average resolution 100 × 100 m. The grid cells were grouped into the compartments according to the hydrological principle. Twelve scenarios of dynamics of the suspended solids, and the dissolved and suspended forms of Ni, Cu, Pb and Cd were calculated for the surges of various intensity under the conditions of variable water content and seasonal dynamics of near-water vegetation. In accordance with the scenarios, the graphs showing the changes in the suspended matter content and accumulation, and the maps of the deposited substance distribution resulted from the surges in the delta were constructed. During two days the calculations for which include the surges of varying repeatability and the variable water content, about 0.3–3 t of nickel compounds, 0.1–1.8 t of copper compounds, 0.2–1.8 t of lead compounds and 0.01–0.04 t of cadmium ones deposit in Don. The obtained results made it possible to reveal two regions where the increased accumulation of the precipitated suspended matter and the heightened concentrations of the heavy metal dissolved forms were observed: the interfluve of the Don shipping channel, and the systems of the rivers Kalancha and Kuterma branches.
Conclusions. As for their influence upon formation of the flow of the heavy metal suspended forms, the surge phenomena surpass the river flow. The suspended matter concentration in the Taganrog Bay waters during the surges is the governing factor for the heavy metals inflow to the Don Delta. At the same time, the regions characterized by the highest suspended solids sedimentation and the increased concentrations of the heavy metal dissolved forms are the closest to the Taganrog Bay areas covered by reed vegetation.

Keywords: heavy metals, Don Delta, mouth area, surge, hydrodynamic modeling.

Acknowledgements: the investigation was funded by RFBR grant No. 18-35-00441 мол_а and carried out within the framework of the state task of SSC, RAS, project state registration is № AAAA-A18-118122790121-5.

For citation: Sheverdyaev, I.V. and Kleschenkov, A.V., 2020. Revealing the Surge Phenomena Contribution of the Heavy Metals Inflow to the River Don Delta. *Physical Oceanography*, [e-journal] 27(5), pp. 535-546. doi:10.22449/1573-160X-2020-5-535-546

Введение

Устьевые области рек, как зоны контакта морских и речных вод, уязвимы по отношению к естественным и антропогенным колебаниям режима речного стока, уровня моря и качества вод. Дельта Дона является одной из важнейших в хозяйственном и социально-экономическом отношении устьевых областей России. Здесь взаимодействие морских и речных вод происходит под усиленным антропогенным воздействием агломерации Ростова-на-Дону. К значимым изменениям в системе устьевой области Дона в последнее десятилетие можно отнести нижеследующее.

В настоящее время (2007–2020 гг.) водный сток Дона снижен (до 13–16 км^3/год [1] при норме 22 км^3/год [2]), что обусловлено климатическими причинами его формирования. В текущий маловодный период в районах интенсивной хозяйственной деятельности в бассейне Дона наблюдается дефицит водных ресурсов, что создает серьезные проблемы для водоснабжения населения, сельскохозяйственного производства, рыбного хозяйства и сохранения уникальной экосистемы дельты р. Дон. Кроме того, в современный период наблюдается значительное снижение твердого стока р. Дон.

Поверхностные воды Нижнего Дона характеризуются высокой степенью загрязненности, являясь одним из источников тяжелых металлов для дельты Дона [1]. Другим источником загрязнения являются морские воды Таганрогского залива [3], поступающие при нагонных явлениях, характерных для региона. В наблюдаемых условиях пониженного стока Дона влияние этих источников на содержание тяжелых металлов в воде и в почве может измениться.

Естественные колебания характеристик гидрологического режима Дона и Азовского моря приводят к возникновению рисков негативного воздействия вод на население и объекты экономики. Как отмечено в Водной стратегии РФ (URL: http://www.mnr.gov.ru/docs/strategii_i_doktriny/128717/), риск наводнений и иного негативного воздействия вод будет сохраняться и усиливаться в будущем в связи с учащением опасных гидрологических явлений в новых климатических условиях. Для устьевого участка Дона, в особенности его дельты, это риски затопления в результате нагонов воды со стороны Таганрогского залива, увеличения случаев проникновения вод с относительно более высокой соленостью (на фоне низкого водного стока Дона), ухудшения качества вод, используемых для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения г. Азов и других населенных пунктов. В Южном научном центре РАН (Ростов-на-Дону) с 2007 г. проводятся наблюдения за уровнем в х. Донской (дельта Дона), на посту Взморье (Таганрогский залив) и в с. Кагальник (дельта Дона). С 2013 г. наблюдения уровня воды на гидропостах проводятся с помощью автоматических уровнемеров с временным шагом 10 мин. Кроме этого, ежегодно проводятся регулярные комплексные экспедиции в Азовское море и р. Дон. В результате в ЮНЦ РАН накоплен архив гидрологических и гидрохимических наблюдений в р. Дон, в дельте (по рукавам, ерикам и на островах) и в придельтовой части Таганрогского залива Азовского моря. На основе накопленных материалов в 2018 г. были проанализированы сгонно-нагонные процессы за период 2007–2018 гг. [4], адаптирована двумерная гидрологическая модель *HEC-RAS* [5], оценено распределение шероховатости в дельте Дона по сезонам и проведено зонирование дельты Дона по степени воздействия нагонов [6].

В настоящей работе приводятся результаты моделирования поступления тяжелых металлов в дельту Дона при нагонах различной повторяемости в условиях средней и высокой водности этой реки.

Материалы и методы

Для решения задачи исследования роли нагонных явлений в поступлении тяжелых металлов в дельту Дона в современных гидролого-геохимических условиях нами были собраны и проанализированы результаты измерений концентраций тяжелых металлов (Cu, Pb, Cd, Ni) в воде и взвеси Таганрогского залива и больших и малых рукавов дельты Дона и руслового участка Дона от ст. Старочеркасская до г. Ростов-на-Дону в период 2006–2019 гг. В базу данных вошли результаты как собственных специальных геохимических исследований ЮНЦ РАН, так и совместных с МГУ работ по изучению геохимии аквальных ландшафтов дельты Дона [7], а также фондовые данные. Сводные сведения о концентрациях тяжелых металлов в воде и взвеси в устьевой области Дона приведены в табл. 1. Стоит отметить, что концентрации тяжелых металлов в воде и взвеси подвержены сезонным изменениям, что видно при сравнении данных за летне-осеннюю межень 2013–2014 гг. [8, 9] и среднемноголетних значений. Кроме того, согласно оценкам [8], поток взвешенных форм Ni, Cu, Cd и Pb с речными водами сокращается при движении от вершины дельты к нижележащим створам, т. е. происходит осаждение взвешенных форм тяжелых металлов.

Таблица 1
Table 1

Средние значения содержания тяжелых металлов в воде (мкг/л) и взвешенном веществе (мкг/г) в дельте Дона и Таганрогском заливе в 2006–2019 гг.
Average values of the heavy metal contents in water (mkg/l) and in the suspended solids (mkg/g) in the Don Delta and the Taganrog Bay in 2006–2019

Объекты / Objects	Cu	Cd	Pb	Ni
	Растворенные формы металлов / Metal dissolved forms			
Дон (n = 80) / Don (n = 80)	3,1	0,63	1,60	8,2
Дон (n = 25) (по [8]) / Don (n = 25) (by [8])	1,4	0,05	0,10	2,3
Таганрогский залив (n = 93) / Taganrog Bay (n = 93)	5,4	0,33	3,22	11,4
	Взвешенные формы металлов / Metal suspended forms			
Дон (n = 80) / Don (n = 80)	48,7	0,96	29,5	42,7
Дон (n = 11) (по [9]) / Don (n = 11) (by [9])	22,9	0,40	23,4	38,3
Таганрогский залив (n = 93) / Taganrog Bay (n = 93)	35,9	0,73	38,6	30,9

По оценкам [10], в России ежегодно в водные объекты поступает около 2450 т свинца, из которых 1000 т – в почвы и воды от разрушения аккумуляторов, 1400 тонн – в результате охоты и только 50 т – от стационарных источников. Сопоставление этих оценок с поступлением форм тяжелых металлов с нагонами в дельту Дона представляет интерес для понимания роли антропогенного влияния на окружающую среду.

Использованные данные для сценариев моделирования нагонов представлены в табл. 2, 3. Для дальнейшей работы из базы данных нами были выбраны концентрации тяжелых металлов, относящиеся к периодам со средней водностью Дона (500 м^3/с) и осредненные за многолетний период. Для моделирования миграции тяжелых металлов при повышенной водности Дона, характеризующейся значениями расходов воды порядка 2000 м^3/с, что в XXI в. наблюдалось всего два раза – в 2003 и в 2018 гг., нами были использованы данные собственных натурных наблюдений и фондовые данные Азовводоканала.

Анализ табл. 2 и 3 показывает, что наибольшее значение для массопереноса тяжелых металлов между Таганрогским заливом и дельтой Дона имеет взвешенная форма, так как количество взвеси в Таганрогском заливе вследствие ветрового взмучивания и поступления с речным стоком выше, чем в реке.

Таблица 2
Table 2

Концентрации взвеси и соединений металлов в водах, поступающих в дельту Дона при расходе 500 м^3/с
Concentrations of suspended matter and metal compounds in the water inflowing to the Don Delta at the 500 m^3/s discharge

Компонент / Component		Дон (начало дельты) / Don (delta mouth)	Приустьевое взморье Таганрогского залива (в период нагона) / Mouth of the Taganrog Bay (during a surge)
Взвесь, мг/дм^3 / Suspended matter, mg/dm^3		17,00	60,00
Ni	растворенная форма, мкг/дм^3 / dissilved form, mkg/dm^3	2,80	3,10
	взвешенная форма, мкг/г / suspended form, mkg/g	38,00	40,00
Cu	растворенная форма, мкг/дм^3 / dissilved form, mkg/dm^3	9,40	2,10
	взвешенная форма, мкг/г / suspended form, mkg/g	29,00	25,00
Pb	растворенная форма, мкг/дм^3 / dissilved form, mkg/dm^3	0,10	0,08
	взвешенная форма, мкг/г / suspended form, mkg/g	31,00	25,00
Cd	растворенная форма, мкг/дм^3 / dissilved form, mkg/dm^3	0,14	0,16
	взвешенная форма, мкг/г / suspended form, mkg/g	0,30	0,50

Для оценки поступления тяжелых металлов и осаждения взвеси в пределах дельты Дона использовался комплекс гидрологических моделей, состоящий из гидродинамической модели *HEC-RAS* и оригинальной модели переноса и трансформации соединений тяжелых металлов в дельте Дона С. В. Бердникова [11]. Модели использовались последовательно – полученные с помощью *HEC-RAS* результаты гидрологических расчетов динамики вод, поступающих в дельту Дона с нагоном и речным стоком, были входными данными для расчетов поступления тяжелых металлов и осаждения взвеси по модели С. В. Бердникова. Двумерные расчеты в модели *HEC-RAS* основаны на решении уравнений Навье – Стокса в условиях мелкой воды, модель С. В. Бердникова основана на балансовых уравнениях поступления и осаждения веществ в выделенных районах (компартментах). Для использованного комплекса моделей были разработаны общая расчетная сетка (с выделенными компартментами), исходные данные, граничные условия.

Таблица 3
Table 3

Концентрации взвеси и соединений металлов в водах, поступающих в дельту Дона при расходе 2000 м^3/с
Concentrations of suspended matter and metal compounds in the water inflowing to the Don Delta at the 2000 m^3/s discharge

Компонент / Component		Дон (начало дельты) / Don (delta mouth)	Приустьевое взморье Таганрогского залива (в период нагона) / Mouth of the Taganrog Bay (during a surge)
Взвесь, мг/дм^3 / Suspended matter, mg/dm^3		19,00	71,00
Ni	растворенная форма, мкг/дм^3 / dissilved form, mkg/dm^3	2,80	5,60
	взвешенная форма, мкг/г / suspended form, mkg/g	11,60	14,30
Cu	растворенная форма, мкг/дм^3 / dissilved form, mkg/dm^3	1,80	1,70
	взвешенная форма, мкг/г / suspended form, mkg/g	5,20	4,80
Pb	растворенная форма, мкг/дм^3 / dissilved form, mkg/dm^3	0,10	1,20
	взвешенная форма, мкг/г / suspended form, mkg/g	14,60	11,40
Cd	растворенная форма, мкг/дм^3 / dissilved form, mkg/dm^3	0,11	0,14
	взвешенная форма, мкг/г / suspended form, mkg/g	0,26	0,40

Для параметризации комплекса гидрологических моделей была построена расчетная область: регулярная сетка ячеек 100 × 100 м осложнена границами компартментов с учетом строгих гидрологических критериев. Выделили акваторию Таганрогского залива и акваторию основных русел рек в дельте Дона; акваторию основных русел рек поделили на участки отдельных рек и рукавов, которые были затем разделены на более короткие участки (до 10 км), охватывающие однородный элемент русла (колено, поворот и др.); территория суши была разделена между выделенными руслами на правые и левые водосборы, а также отдельно выделены водосборы Таганрогского залива. Стоит отметить, что некоторая часть выделенных водосборов может обмениваться водой с различными выделенными руслами (напр., из-за густой сети каналов или ериков), такие территории распределялись между соответствующими руслами равномерно. Всего было выделено 95 компартментов (рис. 1).

Р и с. 1. Гидрологические районы дельты Дона
F i g. 1. Hydrological areas of the Don Delta

В использованной расчетной области предусмотрены две границы: по акватории Таганрогского залива и в вершине дельты по руслу Дона. В модели *HEC-RAS* через выделенные границы задаются динамика уровня воды в х. Донском при нагоне и расходы в р. Дон соответственно. В модели С. В. Бердникова для поступающей через границы воды задаются концентрации веществ. Также для расчетной области задавалось распределение шероховатости, использованное в [6]. Оно играет ключевую роль в расчетах по *HEC-RAS*. В модели же С. В. Бердникова принято предположение, что для районов, которые находятся под водой, скорость осаждения взвешенных веществ зависит от шероховатости поверхности, причем для русловых участков открытой воды она снижена до нуля. Для заросших растительностью затопленных областей, в том числе рукавов и протоков с водной растительностью, скорость осаждения максимально возрастает до 10 раз по сравнению со свободным руслом.

Результаты и обсуждение

Аналогично подходам, изложенным в [6], для анализа поступления взвешенных форм тяжелых металлов в дельту Дона нами были рассмотрены различные сочетания водности Дона, уровней нагонов и коэффициентов шероховатости тростниковых зарослей, занимающих 46,4% дельты Дона. Сочетания указанных параметров были сгруппированы в 12 сценариев (табл. 4).

Таблица 4
Table 4

Гидрологические параметры модельных сценариев
Hydrological parameters of the model scenarios

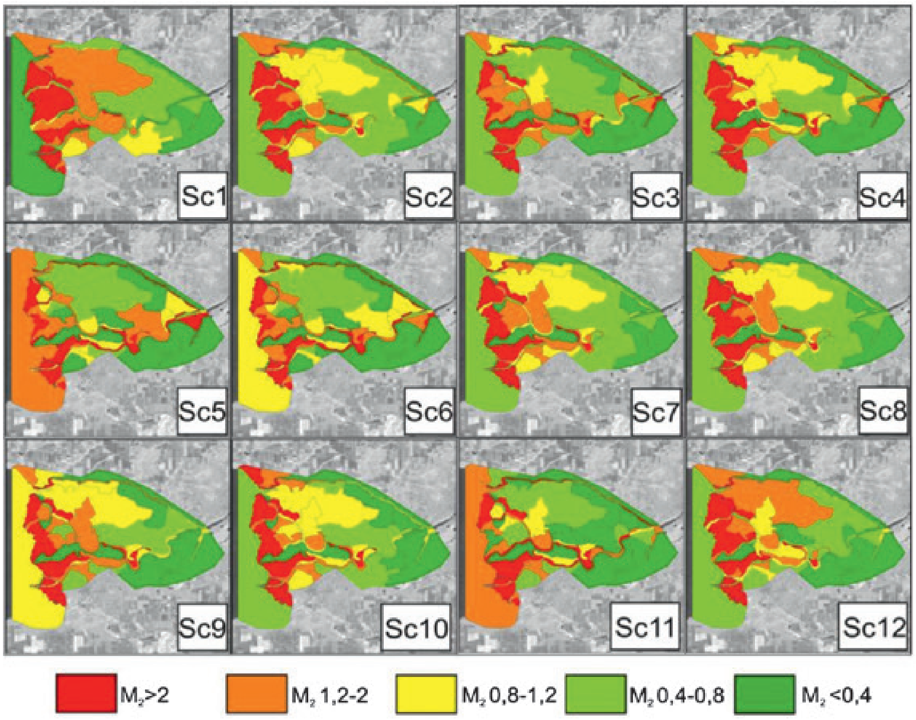
Сценарий / Scenario	Расход воды в вершине дельты, м^3/с / Water discharge at the delta mouth, m^3/s	Подъем уровня воды во время нагона на пике, м / Water level rise during the maximum surge, m	Шероховатость тростниковых зарослей / Reed surface roughness
Sc1	2000	3,7	0,12
Sc2	2000	3,7	0,04
Sc3	2000	2,5	0,12
Sc4	2000	2,5	0,04
Sc5	2000	1,5	0,12
Sc6	2000	1,5	0,04
Sc7	500	3,7	0,12
Sc8	500	3,7	0,04
Sc9	500	2,5	0,12
Sc10	500	2,5	0,04
Sc11	500	1,5	0,12
Sc12	500	1,5	0,04

Для каждого сценария было оценено распределение накопленной осажденной взвеси по компартментам на конец вторых суток расчета. В пределах каждого района накапливался осадок взвеси. Чтобы оценить, какую роль играет каждый конкретный район в осаждении взвеси при смешении поступившей во время нагона в дельту морской воды и речной воды, было выполнено сравнение доли накопленного осадка от общего в дельте с долей площади района в дельте. Для каждого района был рассчитан индекс накопления осажденного вещества за двое суток расчета (M_2):

$$\mathrm{M}_2 = \frac{\mathrm{M_r} / \sum \mathrm{M_r}}{S_\mathrm{r} / \sum S_\mathrm{r}}, \tag{1}$$

где M_2 – индекс накопления осажденного вещества за двое суток расчета; $\mathrm{M_r}$ – масса накопленного осажденного вещества в районе, кг; $\Sigma \mathrm{M_r}$ – масса накопленного осажденного вещества в дельте, кг; S_r – площадь района, км^2; ΣS_r – площадь дельты, км^2 (723,3 км^2).

В результате было получено пространственное распределение индекса M_2 по пространству дельты (рис. 2). Для всех рассмотренных сценариев индекс M_2 изменялся в диапазоне 0–8,5. При этом, как следует из формулы (1), индекс принимает высокие значения при интенсивном осадконакоплении в исследуемом районе.



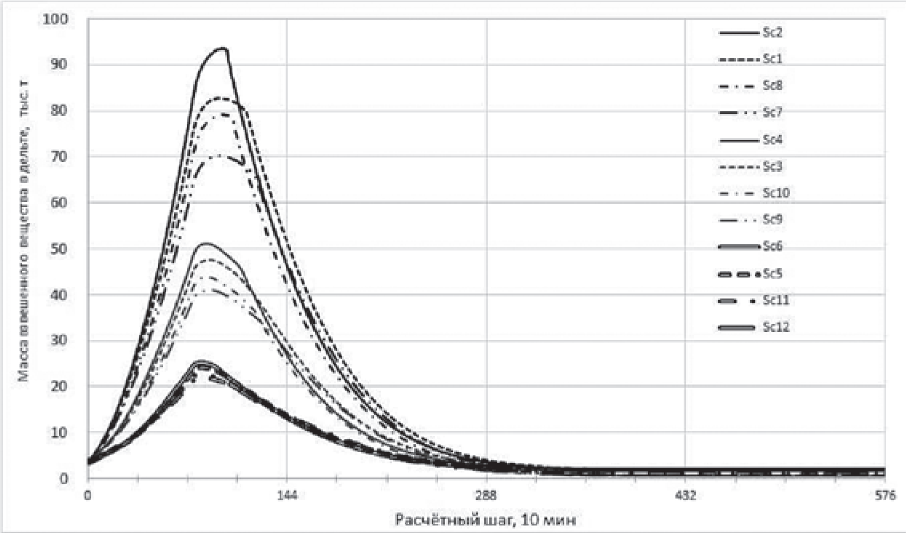
Р и с. 2. Пространственное распределение индекса накопления осажденного вещества за двое суток расчета (M_2) при различных сочетаниях водности Дона, шероховатости тростниковых зарослей и высоты нагонов

F i g. 2. Spatial distribution of the sediment accumulation index over 2 days of calculations (M_2) at various combinations of the Don water flow content, reed surface roughness and surge heights

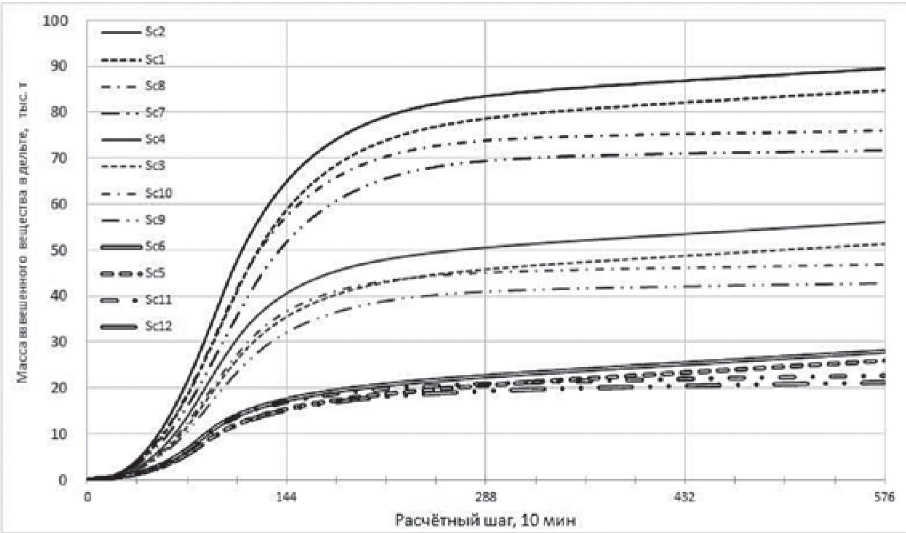
В рамках реализации сценарного подхода с помощью компартментальной модели нами были рассчитаны объемы поступления взвешенного вещества в дельту (рис. 3) и его осаждения (рис. 4).

На представленном графике поступления взвешенного вещества в дельту сценарии группируются по величине нагона. Показано, что при нагоне с максимумом 1,5 м (по Балтийской системе высот – БС) масса взвешенного вещества в дельте в пике увеличивается в 4–5 раз по сравнению с начальной, при нагоне 2,5 м (БС) – в 8 –10 раз, при нагоне 3,7 м (БС) – в 16–20 раз. При этом при низкой шероховатости пики выше и немного раньше начинают спадать. Повышенная водность также усиливает пики.

Из рис. 4 следует, что масса осажденного вещества в дельте в результате нагона может достигать 85 тыс. т за двое суток нагона при высокой водности Дона в условиях низкой шероховатости (при обычном половодье ранней весной). Кроме этого, обычные сильные нагоны, наблюдающиеся каждый год по несколько раз (высота подъема уровня до 1,5 м (БС)), приводят к осаждению около 20 тыс. т вещества за двое суток, в то время как экстремальные нагоны (2,5 м (БС)) – 40–50 тыс. т (рис. 4).



Р и с. 3. Динамика поступления взвешенного вещества в дельте Дона по сценариям
F i g. 3. Dynamics of the suspended matter inflow to the Don Delta according to the scenarios



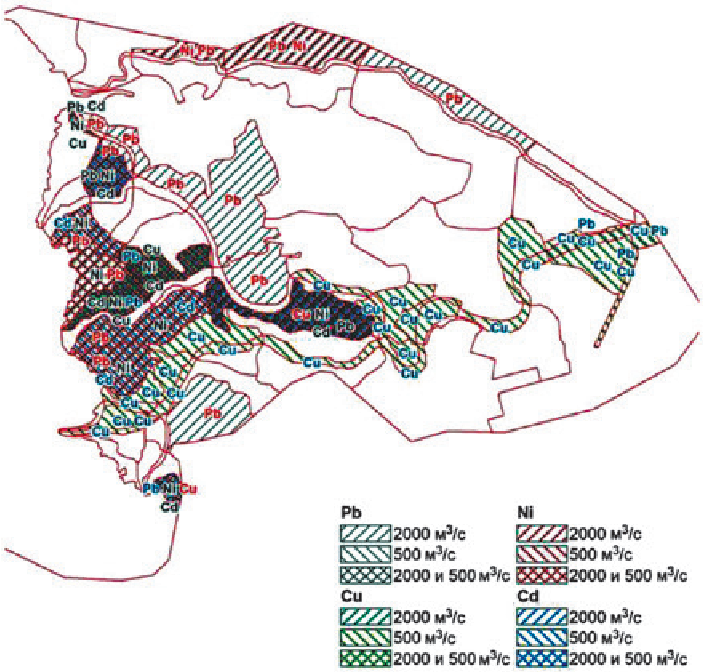
Р и с. 4. Динамика накопления осадка в дельте Дона по сценариям
F i g. 4. Dynamics of sediment accumulation in the Don Delta according to the scenarios

В пересчете на средние концентрации исследуемых тяжелых металлов во взвеси Таганрогского залива получаем оценки поступления, которые приведены в табл. 5.

Таблица 5
Table 5

Накопление взвешенных форм тяжелых металлов (т) в дельте Дона к концу вторых суток расчета в результате нагона
Surge-resulted accumulation of the heavy metal suspended forms (t) in the Don Delta by the end of the second day of calculation

Сценарий / Scenario	Ni	Cu	Pb	Cd
Sc1	1,1	0,4	0,9	0,03
Sc2	1,2	0,4	1,0	0,03
Sc3	0,7	0,2	0,5	0,02
Sc4	0,7	0,2	0,6	0,02
Sc5	0,3	0,1	0,2	0,01
Sc6	0,3	0,1	0,3	0,01
Sc7	2,8	1,7	1,7	0,03
Sc8	3,0	1,8	1,8	0,04
Sc9	1,6	1,0	1,0	0,02
Sc10	1,8	1,1	1,1	0,02
Sc11	0,8	0,5	0,5	0,01
Sc12	0,8	0,5	0,5	0,01



Р и с. 5. Районы с повышенными концентрациями растворенных форм тяжелых металлов (Ni, Cu, Pb, Cd) после двух суток нагона для сценариев повышенной и пониженной водности Дона. Синим цветом обозначены элементы с повышенной концентрацией при водности Дона 500 м³/с, красным – при водности Дона 2000 м³/с, черным – при водности Дона 500 и 2000 м³/с

F i g. 5. Areas with the heightened concentrations of the dissolved forms of heavy metals (Ni, Cu, Pb, Cd) after the 2-day surge for the scenarios of the increased and decreased water content in Don. Blue color indicates the elements with the increased concentration at the Don water content 500 m³/s, red and black colors show the same – at the Don water content 2000 m³/s and at both variants (500 and 2000 m³/s), respectively

Для каждого тяжелого металла в растворенной форме были выполнены расчеты поступления в дельту Дона по выделенным сценариям нагонов. В результате были получены области с повышенными относительно начального уровня значениями концентрации. Как показано на рис. 5, большей частью они расположены в центральной области дельты, в междуречье Старого Дона и Каланчи. В качестве основных участков концентрации тяжелых металлов выделяются пойменные участки Каланчи и Мокрой Каланчи, устье Кагальника, а также участок разветвления Большой Кутерьмы. Обращают на себя внимание повышенные концентрации меди (вдоль основного судоходного пути при нагонах в условиях малой водности Дона, что, вероятно, связано с поступлением морских вод по наиболее глубокому судоходному рукаву дельты – Старому Дону), а также свинца (на правых берегах Каланчи, Кутерьмы и Мёртвого Донца) в условиях высокой водности Дона.

Выводы

Вариации гидрологического режима в дельте Дона, обусловленные сгонно-нагонными явлениями и изменением его стока, прежде всего определяют изменчивость наблюдаемых здесь концентраций соединений тяжелых металлов как в растворенной, так и во взвешенной форме.

С учетом того, что скорость осаждения взвешенного вещества при движении между створами от вершины дельты до х. Узяк (рукав Старый Дон) составляет 201, 64, 99 и 1,5 мг/с для Ni, Cu, Cd и Pb соответственно, за двое суток внешний поток взвешенных форм тяжелых металлов с речным стоком составит от 0,13 кг для Cd до 17,4 кг для Ni для рассмотренного участка, а для всей русловой сети дельты 47 кг Ni, 15 кг Cu, 23 кг Pb и 0,35 кг Cd. Сравнивая эти показатели со значениями, приведенными в табл. 5, легко заметить, что даже во время обычного сильного нагона при пониженной водности летом (сценарий Sc11) в дельту поступает в 17–33 раза больше взвешенных форм тяжелых металлов, чем с речным стоком.

С учетом вышеизложенного следует признать, что влияние антропогенного загрязнения соединениями металлов представляется менее значимым и имеющим сугубо локальный характер. За двое суток нагона в дельту Дона из Таганрогского залива может переноситься и оседает порядка 0,2–1,8 т соединений свинца, 0,3–3 т соединений никеля, 0,1–1,8 т соединений меди и 0,01–0,04 т соединений кадмия. Причем основные районы интенсивного оседания взвешенного вещества и повышенных концентраций растворенных тяжелых металлов после нагона расположены в междуречье судоходного рукава Дона и системы рукавов Каланчи и Кутерьмы, отличающемся широким распространением по берегам тростниковых зарослей и усиленным по сравнению с другими районами дельты влиянием нагонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник. 2018. / Главн. ред. М. М. Трофимчук. Ростов-на-Дону, 2019. 561 с. URL:http://gidrohim.com/sites/default/files/Ежегодник%02018_2.pdf (дата обращения: 12.03.2020).

2. *Сорокина В. В., Ивлиева О. В., Лурье П. М.* Динамика стока на устьевых участках рек Дон и Кубань во второй половине XX века // Вестник Южного научного центра РАН. 2006. Т. 2, № 2. С. 58–67.

3. Экосистема Азовского моря: антропогенное загрязнение / А. А. Клёнкин [и др.]. Краснодар : Просвещение-Юг, 2007. 324 с.

4. *Третьякова И. А.* Оценка повторяемости нагонов различной величины в дельте Дона по данным наблюдений // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2018. Т. 1, № 3. С. 258–261. doi:10.23885/2500-395x-2018-1-3-258-261

5. *Шевердяев И. В.* Исследование шероховатости русел дельты Дона на основе наблюдений колебаний уровня в мае 2018 года // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2018. Т. 1, № 3. С. 276–279. doi:10.23885/2500-395x-2018-1-3-276-279

6. *Шевердяев И. В., Клещенков А. В., Третьякова И. А.* Опыт гидрологического моделирования нагонов в дельте Дона // Наука Юга России. 2019. Т. 15, № 3. С. 54–62. doi:10.7868/S25000640190306

7. Интегральная оценка эколого-геохимического состояния аквальных систем устьевой области Дона / Г. Г. Матишов [и др.] // Моря России: методы, средства и результаты исследований : Тезисы докладов Всероссийской научной конференции (г. Севастополь, 24–28 сентября 2018 г.). Севастополь : ФГБУН ФИЦ МГИ, 2018. С. 172. URL: http://conf.mhi-ras.ru/archive/2018/morya_rossii-2018_tezisy.pdf (дата обращения: 10.05.2020).

8. *Ткаченко О. В., Ткаченко А. Н., Лычагин М. Ю.* Содержание тяжелых металлов в водных объектах дельты Дона: сезонная и пространственная динамика // Геология, география и глобальная энергия. 2016. № 2 (61). С. 76–84.

9. Потоки тяжелых металлов в аквальных системах дельт Дона и Кубани / А. Н. Ткаченко [и др.] // Доклады Академии наук. 2017. Т. 474, № 2. С. 234–237. doi:10.7868/S0869565217140201

10. *Snakin V. V., Prisyazhnaya A. A.* Lead contamination of the environment in Russia // Science of the Total Environment. 2000. Vol. 256, iss. 2–3. P. 95–101. doi:10.1016/S0048-9697(00)00452-6

11. *Бердников С. В., Шевердяев И. В., Клещенков А. В.* Анализ поступления взвешенных веществ в дельту Дона при нагонах на основе численного моделирования // Дельты рек России: закономерности формирования, биоресурсный потенциал, рациональное хозяйствование и прогнозы развития: Материалы Международной молодежной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д. Г. Матишова (г. Ростов-на-Дону, 4–6 сентября 2018 г.). Ростов-на-Дону : ЮНЦ РАН, 2018. С. 18–23.

Об авторах:

Шевердяев Игорь Викторович, научный сотрудник, лаборатория информационных технологий и математического моделирования, ФИЦ ЮНЦ РАН (344006, Россия, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, д. 41), кандидат географических наук, **ResearcherID: I-3184-2013, Scopus Author ID: 56223776200,** ig71089@yandex.ru

Клещенков Алексей Владимирович, ведущий научный сотрудник, лаборатория гидрологии и гидрохимии, ФИЦ ЮНЦ РАН (344006, Россия, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, д. 41), кандидат географических наук, **ResearcherID: E-6619-2014, ORCID ID: 0000-0002-7976-6951, Scopus Author ID: 57016697100,** geo@ssc-ras.ru

РАДИАЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ

Радиационная экологическая океанология[1]

Г.Г.Матишов, О.В.Степаньян
Южный научный центр РАН (Ростов-на-Дону, Россия)

Радиационную экологическую океанологию как научное направление в изучении Мирового океана основал член-корреспондент РАН Д.Г. Матишов. В статье рассказывается о становлении этого направления в 1990–2000-х годах и представлены основные результаты, полученные за 20 лет. Показано, что в настоящее время в воде и донных отложениях европейских морей России содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr невелико, однако в морской биоте (рыбах, птицах, млекопитающих) возможны локальные превышения уровня радионуклидов над фоновыми значениями морской среды.

Ключевые слова: радиационная экологическая океанология, радионуклиды, Баренцево море, Азовское море, радиоактивное загрязнение.

Посвящается памяти
член-корреспондента РАН Д.Г.Матишова

Геннадий Григорьевич Матишов, академик, председатель Южного научного центра РАН (Ростов-на-Дону). Область научных интересов — полярная океанология, экология моря, геоморфология и палеогеография океана, радиоэкология Арктики.
e-mail: matishov_ssc-ras@ssc-ras.ru

Олег Владимирович Степаньян, кандидат биологических наук, заведующий отделом изучения экстремальных природных явлений и техногенных катастроф того же научного центра. Занимается исследованием донной растительности южных морей России.
e-mail: step@ssc-ras.ru

Радиационная экологическая океанология — одно из самых новых научных направлений. Оно возникло всего около 20 лет назад на стыке океанографии, радиационной биологии, экологии, морской биологии, гидробиологии и геоэкологии. В то время было необходимо знать, каков на самом деле вклад нашей страны и ряда западных государств в радиоактивное загрязнение Северной Атлантики. Кроме того, требовалась объективная картина загрязнения после трагических аварий советских и российских атомных субмарин «Комсомолец» и «Курск». Расскажем об истории появления радиационной экологической океанологии и представим основные результаты, полученные учеными за последние годы.

Основателем этого направления стал член-корреспондент РАН Дмитрий Геннадьевич Матишов (1966–2015)*. Он собрал коллектив ученых из Мурманского морского биологического института Кольского научного центра (ММБИ КНЦ) РАН, Южного научного центра РАН и ряда других науч-

* Дмитрий Геннадьевич Матишов прожил короткую, но яркую жизнь. Он родился в Ростове-на-Дону, в академической семье, но большую часть жизни провел в Мурманске. Организовал Азовский филиал Мурманского морского биологического института Кольского научного центра РАН в Ростове, в течение семи лет возглавлял Институт аридных зон Южного научного центра РАН. Основал и возглавил кафедру океанологии в Ростовском государственном университете (ныне Южный федеральный университет), руководил отделом гидрохимии и радиоэкологии ММБИ КНЦ РАН. Входил в резерв управленческих кадров Президента РФ. Награжден золотой медалью Президиума РАН. В 2006 г. за особый вклад в науку награжден медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени.

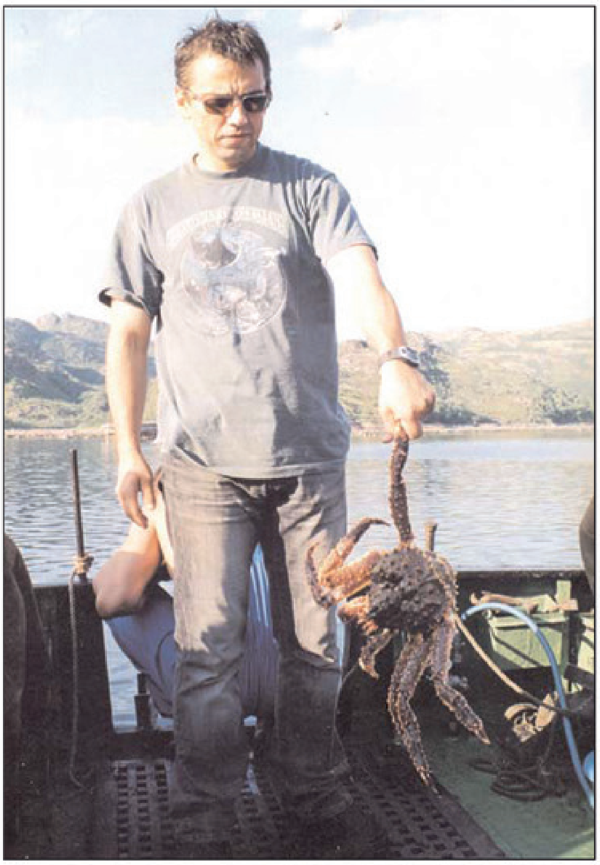
[1] **Оригинальный текст:** *Матишов Г.Г., Степаньян О.В.* Радиационная экология океана: 20 лет поиска и свершений // Природа. 2020. № 7. С. 37–45.

Первая экспедиция Мурманского морского биологического института на Новую Землю. Август 1990 г.
Здесь и далее фото из архива Г.Г.Матишова

У главного входа в здание Мурманского морского биологического института в пос.Дальние Зеленцы.

ных организаций. Многие специалисты под руководством Матишова увлеченно подключились к разработке новой тематики. Целая плеяда учеников и единомышленников сплотилась в уникальную научную школу, которая успешно работает и в настоящее время.

Интерес к океанологии и радиоэкологии появился у Дмитрия Геннадьевича очень рано, еще во время учебы в Ленинградском государственном университете, во время стажировок в ведущих океанологических лабораториях Европы (в Польше, Германии, Норвегии, Финляндии). Именно во время этих стажировок Матишов познакомился с передовыми исследованиями в области радиоэкологии и встретился с выдающимися западными учеными, которые проводили радиологические исследования не только в Арктическом регионе, но и по всему Мировому океану. В 1994 г. в Санкт-Петербургском государственном университете Матишов защитил кандидатскую диссертацию «Радионуклиды и биоокеанологические явления в экосистеме Баренцева моря», где обозначил основные тезисы нового научного направления. Однако ему потребовалось еще несколько лет, чтобы самому собрать в морских экспедициях материал и обобщить разрозненные данные. Только после этого контуры нового направления стали осязаемы.

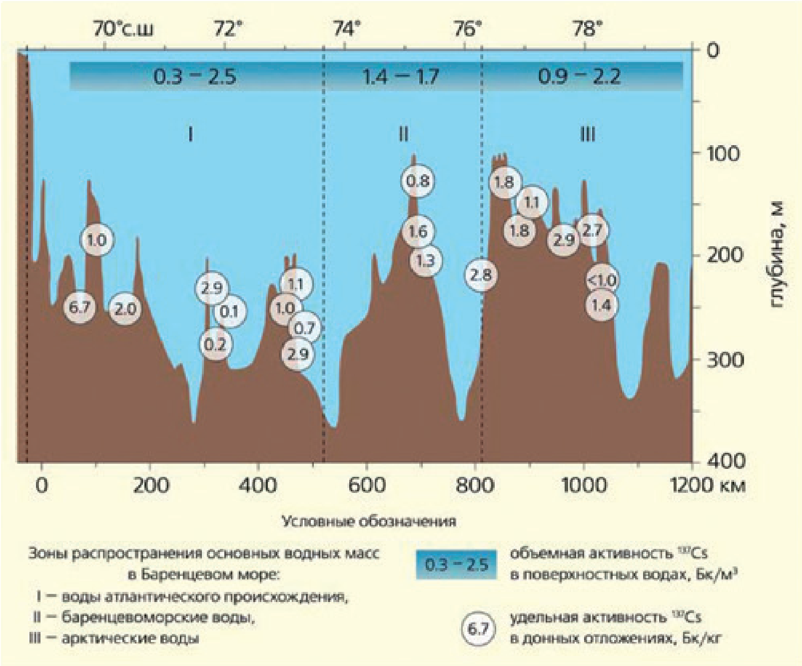


Д.Г.Матишов в Кольском заливе во время отбора биологических проб для радиоэкологических исследований.

Долгие годы в нашей стране радиоэкологические данные (тем более их морская часть) носили гриф «совершенно секретно», так как касались военных разработок ядерного оружия и ядерных испытаний в Баренцевом и Карском морях, на полигонах Новой Земли. Определенная (но все еще дозированная) открытость для ученых появилась только во времена перестройки, после трагической чернобыльской катастрофы в апреле 1986 г. Отметим, что эта трагедия породила массу слухов и дезинформации, причем как среди населения, так и в научном мире. Было неясно, каков на самом деле масштаб загрязнения окружающей среды и как действие радионуклидов отразится на человеке и природе. Одними из первых предавать гласности и вводить в научный оборот новые данные по уровню загрязнения северных и южных морей России стали Д.Г.Матишов и автор этой статьи академик Г.Г.Матишов. Это позволило в определенной степени снизить обеспокоенность мировой общественности и уменьшить международный «нажим» на руководство нашей страны в 1990-х и в начале 2000-х годов [1–5].

Первые работы были посвящены определению уровней загрязнения цезием и стронцием морской воды и донных отложений в различных районах Баренцева, Карского и Северного морей. Оказалось, что наибольшие концентрации радионуклидов приурочены к местам испытаний атомного оружия, базам атомного военного флота, а также к западной границе Баренцева моря [1–5]. Другой вектор исследования был связан с определением радиоактивных элементов в биоте. Ранее российские и зарубежные исследователи основное внимание уделяли только высшим звеньям арктической экосистемы (рыбам, птицам, морским млекопитающим), а специалисты под руководством Дмитрия Геннадьевича первыми стали изучать особенности накопления радиоэлементов в первичном и вторичном звеньях — в бентосе, планктоне и мелких непромысловых рыбах. В конечном итоге эти результаты увязывались с данными по загрязнению в высших организмах [1–8]. Именно такой подход позволил снять большинство вопросов, связанных с накоплением радиоактивных элементов и переносом их по арктическим пищевым цепям, ранее казавшихся неясными и туманными.

Опыт, полученный на севере, оказался применим и для южных морей России. В фокус исследований попало Азовское море, сходное с Коль-

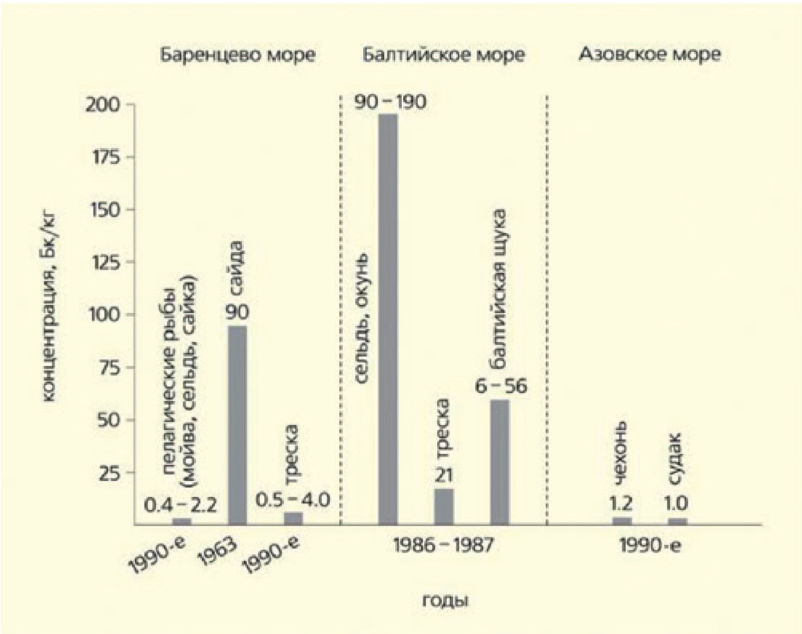


Распределение ^{137}Cs в воде и донных отложениях Баренцева моря вдоль известного океанографического разреза «Кольский меридиан» (33°30′в.д.) в 2010–2013 гг. [15].

ским заливом по организации эстуарной экосистемы [10–12], но обойденное вниманием специалистов со времен чернобыльской катастрофы. В конце 1980-х и начале 1990-х годов радиоэкологические исследования проводились также в северо-западной части Черного моря — в своеобразном эстуарии крупнейших рек Европы — Днепра и Дуная [13].

Двадцать лет назад, 12 августа 2000 г., случилась трагедия, потрясшая всю Россию. Во время проведения военных учений в Баренцевом море потерпел аварию и затонул российский атомный подводный ракетоносный крейсер «Курск». Никого из 118 членов экипажа не удалось спасти. По количеству погибших моряков эта катастрофа стала крупнейшей в современной истории российского подводного флота. Автор этой статьи О.В.Степаньян находился в то время на побережье Баренцева моря, в пос.Дальние Зеленцы. Днем накануне аварии на горизонте были хорошо видны десятки кораблей, включая флагманов Северного флота — тяжелый авианесущий крейсер «Адмирал Кузнецов» и атомный крейсер «Петр Великий». Особенно впечатляюще учения выглядели ночью, когда проводились стрельбы. Дорожки от трассирующих снарядов и сигнальных ракет уходили вдаль за горизонт. А наутро стало известно о гибели подлодки. Эта новость потрясла всех жителей поселка и военных, которые там базировались. Плакали и женщины, и даже взрослые мужчины. Такое общее горе объединяло людей, наверно, только во времена Великой Отечественной войны... Поначалу верилось, что хотя бы часть экипажа получится спасти. Но чуда не произошло. Траур в Мурманске и Североморске продолжался фактически до тех пор, пока на поверхность не подняли части подводной лодки и погибшую команду не предали земле.

Для определения экологических последствий этой страшной аварии Дмитрий Геннадьевич оперативно организовал экспедицию, и уже в сентябре 2000 г. научно-исследовательское судно «Дальние Зеленцы» отправилось к месту катастрофы. На тот момент было еще не ясно, есть ли утечка топлива из реакторов



Концентрация ^{137}Cs в промысловых рыбах в 1960–1990-е годы [15].

В командировке в Норвегии.

и какие уровни радиоактивного заражения будут установлены на морской поверхности. Участники экспедиции провели измерения радиоактивности в пробах воды, донных отложений и биоты. Баренцево море считается одним из самых продуктивных рыболовных районов в мире, поэтому очень важно было оценить, произошла ли утечка радиоактивного топлива, и если да, то как она повлияла на морскую экосистему. К счастью, уровень радиоактивности в поверхностных донных отложениях и в биоте не превысил значений, ранее измеренных в Баренцевом море. Исследователи установили, что источниками радиоактивного загрязнения в этом районе служат глобальные поступления с морскими течениями от прибрежных установок по переработке ядерного топлива в Великобритании, а также «след» чернобыльской аварии. На момент отбора проб существенных утечек из атомной субмарины «Курск» выявлено не было. Именно эти данные и выводы, полученные в экспедиции Матишова, позволили военным не проводить консервацию подлодки и уже летом следующего года приступить к ее подъему.

Все эти работы как в северных, так и в южных морях позволили сформировать обширную базу данных по содержанию ^{137}Cs и ^{90}Sr в морской среде и биоте [14]. Исследователи визуализировали «скучные» цифровые данные базы с помощью ГИС-методов и атласных технологий, а также построили многочисленные карты и математические модели, позволяющие понять пространственное распределение радиоэлементов [15].

Использование инновационных для того времени технологий пробоотбора и лабораторной обработки проб, измерение радиоактивности, накопление в базах данных и визуализация полученного материала позволили Дмитрию Геннадьевичу и его коллективу проследить ранее не отмечавшиеся явления и закономерности в миграции радионуклидов по пищевым цепям в системах «вода — донные отложения» и «вода—лед» [14]. Вместе с коллегами Матишов разработал нетривиальные математические модели для оценки потоков искусственных радионуклидов в экосистеме Азовского моря [15].

Итогом этой кропотливой многолетней работы стало издание двух крупных трудов. В 2002 г. за книгу «Радиационная экологическая океанология» [14] Матишов был награжден золотой медалью Президиума РАН, а англоязычная монография «Radioecology in Northern European Seas» [9], опубликованная в 2003 г. в ведущем научном издательстве «Springer», стала признанием весомого вклада российских ученых в данную область науки.

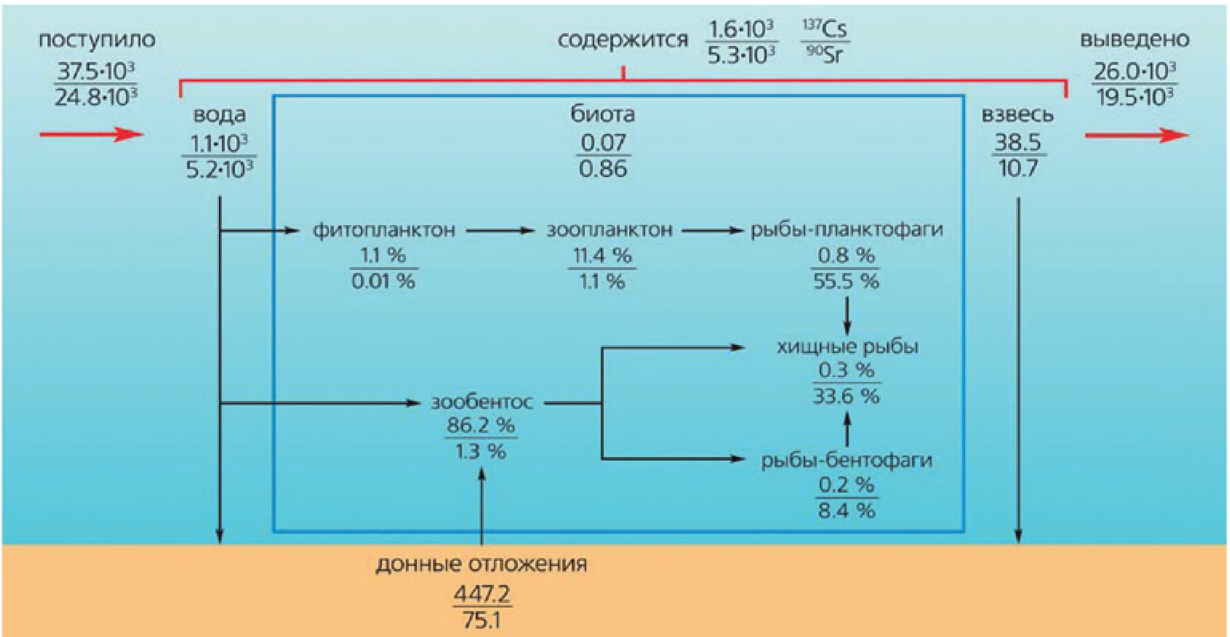
В 2001 г. Дмитрий Геннадьевич защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора географических наук «Антропогенные радионуклиды в морских экосистемах», а еще через два года он был избран в состав Российской академии наук, став при этом одним из самых молодых членов-корреспондентов в ее истории (по Отделению наук о Земле).

Экспедиционные работы в Азовском море. Июль 2003 г.

Концепция, разработанная Матишовым, продолжает совершенствоваться. Например, недавно был проведен сравнительный анализ многолетней динамики содержания и спектра техногенных радионуклидов в донных отложениях арктического шельфа [16]. По архивным и современным данным оценено радиоактивное загрязнение губ и заливов арктических морей, показан низкий современный уровень удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в поверхностном слое донных отложений. Максимальное накопление изотопов установлено в глубоководных частях желобов, где в составе осадков преобладает глинистая фракция. В 2012–2018 гг. радиоактивность осадков в прибрежье Баренцева моря была выше, чем в открытых районах, где региональные отличия несущественны. Наиболее заражены расположенные близко к источникам загрязнения заливы Кольский (губа Пала, район ФГУП «Атомфлот») и Мотовский (губы Западная Лица, Андреева) в Баренцевом море и Енисейский залив в Карском море. В губах южной части Баренцева моря концентрация ^{137}Cs составляет 1.5–3.0 Бк/кг, а ^{90}Sr — 0.6–1.9 Бк/кг. В ледовитых фьордах Шпицбергена, где наблюдается разгрузка талых ледниковых вод и нередко сходят айсберги, содержание ^{137}Cs возрастает до 3.0–6.5 Бк/кг, а ^{90}Sr — до 2.6–3.0 Бк/кг.

Ученым удалось доказать, что перенос атмосферных радионуклидов, накопленных многолетним морским льдом в «ядерную» эпоху, может быть вторичным источником загрязнения моря. Значительное снижение уровня радиационной загрязненности донных отложений в Баренцево-Карском регионе в XXI в. и сглаживание пространственных градиентов концентрации техногенных радионуклидов не отменяют необходимости в современных исследованиях. Сегодня мы наблюдаем, что интерес к освоению арктических экосистем неизменно растет, а факторы и источники загрязнения меняются.

В арктической морской воде основу спектра техногенных радионуклидов составляют изотопы ^{137}Cs и ^{90}Sr [17]. Рассмотрим, как формируется фон этих радионуклидов в Баренцево-Карском регионе. Исследования, проведенные в 2017–2018 гг., показали, что в свободных от инфраструктуры атомного флота губах Мурманского побережья (Ивановской, Териберской, Зеленецкой, Ярнышной, Порчнихе), а также в Кольском заливе (в губах Тоне и Белокаменной, в районах мысов Ретинского, Мишуково и Абрам) концентрации ^{137}Cs соответствовали уровню загрязненности вод прибрежного течения Баренцева моря и варьировали от 1.3 до 2.5 Бк/м^3. В восточной части Баренцева моря, в районе Центральной впадины, Западно-Новоземельского, Гусиного, Новоземельского желобов и Северо-Восточного плато содержание ^{137}Cs в воде не превышало 1–2 Бк/м^3. Концентрация ^{90}Sr в водах Баренцева моря составляла 0.4–3.7 Бк/м^3. В Карском море наиболее загрязнены цезием и стронцием поверхностные воды прибрежной зоны южной и юго-западной частей, а в северной части загрязнение существенно ниже.

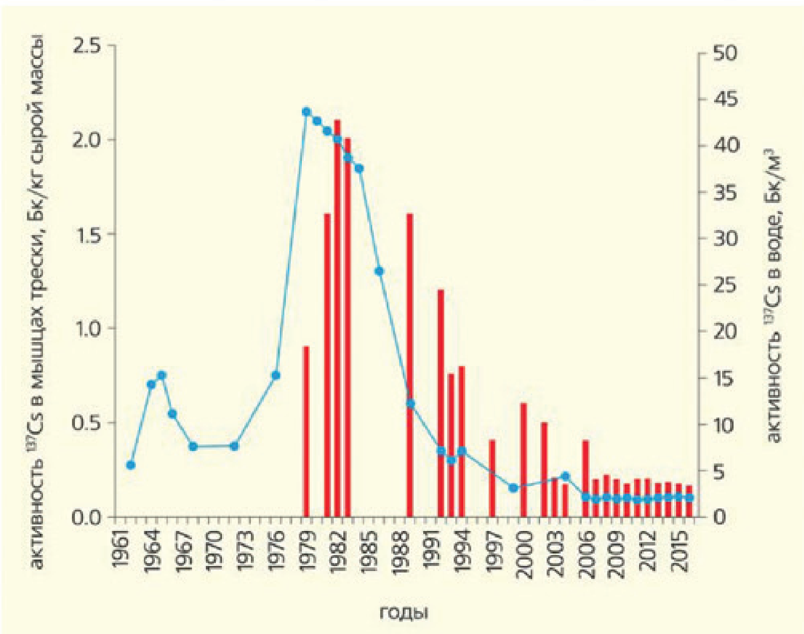


Содержание ^{137}Cs и ^{90}Cr (ТБк) в основных компонентах баренцевоморской экосистемы в начале 2000-х годов [15].

С представителями штаба Северного флота. Исследования морских радионуклидов ведутся в тесном сотрудничестве с российскими военными моряками.

Что касается рыб, водорослей-макрофитов и донных беспозвоночных Баренцева моря, то их загрязнение сегодня невелико. Концентрации техногенных изотопов ^{137}Cs и ^{90}Sr, начиная с периода максимального загрязнения в 1960-е и 1970-е годы, стабильно снижаются [17].

В 2017 г. нам удалось осуществить давнюю мечту Дмитрия Геннадьевича: организовать радиоэкологические исследования в районе Северного полюса [18]. В эту высокоширотную экспедицию отправилась группа ученых на ледоколе «50 лет Победы»*. Было выявлено, что современ-



Содержание ^{137}Cs в треске и морской воде Баренцева моря [15].

* Подробнее см.: *Матишов Г.Г.* К Северному полюсу на атомном ледоколе «50 лет Победы» // Природа. 2018. №11. С.54–59.

ная радиационная обстановка (по данным за 2013–2017 гг.) в Центральном полярном бассейне и в российских морях Северного Ледовитого океана в целом благополучна и отражает общее снижение влияния приоритетных ранее источников [19]. Установлены статистически значимые различия средней объемной активности ^{137}Cs в поверхностном слое вод. Оказалось, что загрязненность морской среды уменьшается в направлении с запада на восток. Максимальные концентрации ^{137}Cs характерны для Баренцева моря, в бассейне которого в XX в. разгружались трансграничные поступления западноевропейских радиохимических предприятий, а также проводились надводные и подводные ядерные взрывы, сбросы и захоронения ядерных отходов. Повышенный уровень загрязнения ^{137}Cs Карского моря сформировался преимущественно в результате поступления с речным стоком радиоактивных отходов с заводов Сибири. Меньше всего загрязнены воды морей Лаптевых и Восточно-Сибирского — наиболее удаленных от европейских источников техногенных радионуклидов [19].

В ММБИ КНЦ РАН продолжаются работы по радиоэкологическим исследованиям птиц Баренцева и Азовского морей. Например, были определены различия в накоплении цезия в организмах баренцевоморских птиц разных видов в зависимости от их экологических особенностей [20]. Наибольшие концентрации ^{137}Cs (10.5–17.3 Бк/кг сырой массы) в печени обнаружены у чаек, за исключением бургомистров. Содержание радиоцезия в птицах других видов было невысоким — 3.0–5.3 Бк/кг сырой массы. Сопоставление данных по аккумуляции инкорпорированного в печени птиц ^{137}Cs с результатами изучения содержимого их желудков показало, что концентрация ^{137}Cs у птиц, питающихся в море, ниже, чем у тех, которые кормятся на суше [20]. Изучение птиц Азовского моря показало, что уровни удельной активности радиоактивных элементов ^{137}Cs и ^{90}Sr в костях и мышцах хохотуньи (*Larus cachinnans*) и большого баклана (*Phalacrocorax carbo sinensis*) были низкими и не отличались от ранее измеренных показателей. Следовательно, радиоактивное загрязнение местообитаний и кормовых объектов рыбоядных птиц восточной части Приазовья может считаться незначительным [21].

Дмитрия Геннадьевича уже пять лет нет с нами. Но остались ученики, научное направление и научная школа. Работы по радиационной экологической океанологии продолжаются — как на севере, так и на юге нашей страны. Это наша дань памяти выдающемуся ученому, чье видение проблем науки во многом опередило свое время. ■

Исследование выполнено в рамках государственного задания №АААА-А18-118122790121-5.

Литература / References

1. *Smith J., Ellis K., Matishov G. et al.* Radioactivity levels in Barents Sea sediments off Novaya Zemlya. Proceedings of International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic and Antarctic. Kirkenes, 1993; 37–43.
2. *Matishov D., Szczypa E.* Gamma emitters in the Barents Sea area. Proceedings of XX Polar Symposium. Lublin, 1993; 211–228.
3. *Matishov G., Matishov D., Rissanen K.* Peculiarities of radionuclide accumulation in benthic and fish of Barents and Kara Seas. Proceedings of International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic. Oslo, 1995.
4. *Matishov G.G., Matishov D.G., Namjatov A.A. et al.* Discharges of nuclear waste into the Kola Bay and its impact on human radiological doses. Journal of Environmental Radioactivity. 2000; 48: 5–21. DOI:10.1016/S0265-931X(99)00049-1.
5. *Matishov G.G., Matishov D.G., Namjatov A.A. et al.* Radioactivity near the sunken submarine "Kursk" in the Southern Barents Sea. Environmental science and technology. 2002; 36(9): 1919–1922. DOI:10.1021/es0112487.
6. *Матишов Д.Г., Матишов Г.Г., Риссанен К.* Радиоактивное загрязнение Кольского залива Баренцева моря. Доклады Академии наук. 1996; 351(4): 571–573. [*Matishov D.G., Matishov G.G., Rissanen K.* Radioactive contamination of the Kola Bay (Barents Sea). Doklady Earth Sciences. 1996; 351(4): 571–573. (In Russ.).]
7. *Матишов Д.Г., Матишов Г.Г.* Новые данные о радиоактивном загрязнении Черной губы (Новая Земля). Доклады Академии наук. 2002; 383(5): 14–16. [*Matishov D.G., Matishov G.G.* New data on radioactive contamination of the Chernaya guba (Novaya Zemlya). Doklady Earth Sciences. 2002; 383(5): 14–16. (In Russ.).]
8. *Матишов Д.Г., Усягина И.С., Касаткина Н.Е., Павельская Е.В.* Особенности накопления искусственных радионуклидов в элементах прибрежных экосистем Кольского полуострова. Доклады Академии наук. 2007; 413(5): 683–686. [*Matishov D.G., Usyagina I.S., Kasatkina N.E., Pavelskaya E.V.* Accumulation peculiarities of artificial radionuclides in the elements of coastal ecosystems on the Kola Peninsula. Doklady Earth Sciences. 2007; 413(3): 448–451. DOI:10.1134/S1028334X07030294.]
9. *Matishov D.G., Matishov G.G.* Radioecology in Northern European Seas. Berlin, 2004.
10. *Матишов Д.Г., Матишов Г.Г.* Антропогенные радионуклиды в донных отложениях Азовского моря. Доклады Академии наук. 1998; 363(5): 673–677. [*Matishov D.G., Matishov G.G.* Anthropogenic radionuclides in bottom sediments of the Sea of Azov. Doklady Earth Sciences. 1998; 363A(9): 1283–1287.]

11. *Матишов Д.Г., Матишов Г.Г., Лебедева Н.В.* Содержание искусственных радионуклидов в птицах Баренцева и Азовского морей. Доклады Академии наук. 2003; 389(3): 424–426. [*Matishov D.G., Matishov G.G., Lebedeva N.V.* Content of artificial radionuclides in birds of the Barents and Azov seas. Doklady Earth Sciences. 2003; 389(3): 424–426. (In Russ.).]
12. *Матишов Д.Г., Матишов Г.Г., Касаткина Н.Е., Усягина И.С.* Динамика радиоактивного загрязнения донных отложений Баренцева, Белого и Азовского морей. Доклады Академии наук. 2004; 396(3): 394–396. [*Matishov D.G., Matishov G.G., Kasatkina N.E., Usyagina I.S.* Dynamics of the radioactive pollution of bottom sediments of the Barents, White, and Azov seas. Doklady Earth Sciences. 2004; 396(4): 560–562.]
13. *Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н.* Морская динамическая радиохемоэкология. М., 1986. [*Polikarpov G.G., Egorov V.N.* Marine Dynamic Radiochemoecology. Moscow, 1986. (In Russ.).]
14. *Матишов Д.Г., Матишов Г.Г.* Радиационная экологическая океанология. Апатиты, 2001. [*Matishov D.G., Matishov G.G.* Radiation ecological Oceanology. Apatity, 2001. (In Russ.).]
15. *Матишов Д.Г., Бердников С.В., Касаткина Н.Е.* Опыт применения математических моделей для оценки потоков искусственных радионуклидов в экосистеме Азовского моря. Современные информационные и биологические технологии в освоении ресурсов шельфовых морей. М., 2005; 184–197. [*Matishov D.G., Berdnikov S.V., Kasatkina N.E.* Experience in applying mathematical models for estimating artificial radionuclide flows in the Azov sea ecosystem. Modern Information and Biological Technologies in the Development of Resources of the Shelf Seas. Moscow, 2005; 184–197. (In Russ.).]
16. *Матишов Г.Г., Ильин Г.В., Усягина И.С., Кириллова Е.Э.* Динамика искусственных радионуклидов в экосистемах морей Северного Ледовитого океана на рубеже XX—XXI веков. Ч.2. Донные отложения. Наука Юга России. 2019; 15(4): 24–25. [*Matishov G.G., Ilyin G.V., Usyagina I.S., Kirillova E.E.* Dynamics of artificial radionuclides in the ecosystems of the Arctic ocean seas at the turn of XX—XXI centuries. Part 2. Bottom sediments. Science in the South of Russia. 2019; 15(4): 24–25. (In Russ.).]
17. *Матишов Г.Г., Ильин Г.В., Усягина И.С., Кириллова Е.Э.* Динамика искусственных радионуклидов в экосистемах морей Северного Ледовитого океана на рубеже XX—XXI веков. Ч.1. Морская вода и биота. Наука Юга России. 2019; 15(3): 12–23. [*Matishov G.G., Ilyin G.V., Usyagina I.S., Kirillova E.E.* Dynamics of artificial radionuclides in the ecosystems of the Arctic ocean seas at the turn of XX—XXI centuries. Part 1. Sea water and biota. Science in the South of Russia. 2019; 15(3): 12–23. (In Russ.).]
18. *Матишов Г.Г., Клещенков А.В., Кириллова Е.Э.* Результаты экспедиции на Северный полюс на ледоколе «50 лет Победы». Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2019; 5: 131–140. [*Matishov G.G., Kleshchenkov A.V., Kirillova E.E.* Results of the expedition to the North pole on the icebreaker "50 let Pobedy". Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya. 2019; 5: 131–140. (In Russ.).]
19. *Матишов Г.Г., Касаткина Н.Е., Усягина И.С.* Техногенная радиоактивность вод центрального полярного бассейна и смежных акваторий Арктики. Доклады Академии наук. 2019. 485(1): 93–98. [*Matishov G.G., Kasatkina N.E. Usyagina I.S.* Technogenic Radioactivity of Waters in the Central Arctic Basin and Adjacent Water Areas. Doklady Earth Sciences. 2019. 485(1): 288–292. DOI:10.1134/S1028334X19030073.]
20. *Усягина И.С., Куклин В.В., Куклина М.М.* Содержание искусственных радионуклидов в птицах Баренцева моря и их влияние на организм. Наука Юга России. 2019; 15(2): 59–69. [*Usyagina I.S., Kuklin V.V., Kuklina M.M.* The content of artificial radionuclides in birds of the Barents sea and their effect on the body. Science in the South of Russia. 2019; 15(2): 59–69. (In Russ.).]
21. *Куклин В.В., Куклина М.М., Усягина И.С., Матишов Д.Г.* Особенности физиолого-биохимического ответа рыбоядных птиц на паразитарное заражение и загрязнение местообитаний в Восточном Приазовье. Наука Юга России. 2016; 12(1): 51–60. [*Kuklin V.V., Kuklina M.M., Usyagina I.S., Matishov D.G.* Features of the physiological and biochemical response of fish-eating birds to parasitic infection and pollution of habitats in the Eastern Azov region. Science in the South of Russia. 2016; 12(1): 51–60. (In Russ.).]

Radiation Environmental Oceanology

G.G.Matishov, O.V.Stepanyan
Southern Scientific Center of RAS (Rostov-on-Don, Russia)

Radiation environmental oceanology as a scientific direction in the study of the World Ocean was founded by corresponding member of the Russian Academy of Sciences Dmitry Matishov. The article presents the way of formation of the scientific direction in the 1990-2000's and the main achievements obtained over 20 years. It is shown that currently the European seas of Russia (sea water, bottom sediments) are characterized by low levels of ^{137}Cs and ^{90}Sr, but in marine biota (fish, birds, mammals) local excess of the level of radionuclides over the background values of the marine environment is possible.

Keywords: radiation environmental oceanology, radionuclides, Barents Sea, Sea of Azov, radioactive contamination.

УДК 551.46:504.054
DOI: 10.7868/S25000640210202

РОЛЬ ИСТОЧНИКОВ РАДИАЦИОННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ДИНАМИКЕ ^{134}Cs В АТОМНУЮ ЭПОХУ [1]

© 2021 г. Академик Г.Г. Матишов[1, 2], Г.В Ильин[1], И.С. Усягина[1], В.В. Титов[2], Е.Э. Кириллова[2]

Аннотация. Дана оценка роли короткоживущих радиоизотопов в формировании радиоэкологического фона в морях Арктики и юга России. Проанализированы материалы многолетних наблюдений Мурманского морского биологического института Российской академии наук и открытых литературных источников по содержанию радиоизотопа ^{134}Cs в морской среде и биоте. Показаны уровни его концентрации в почве, лишайниках, водорослях, рыбе, морской воде и донных отложениях. Обсуждаются географические особенности его распространения в морской и прибрежной среде. Указаны очевидные и потенциальные источники поступления этого радиоизотопа в морские экосистемы полярных и южных морей России. Короткий период полураспада делает ^{134}Cs маркером недавних атмосферных выпадений. Его включения в спектр радиоактивного загрязнения редки, а концентрации незначительны. Однако жесткое гамма-излучение делает его одним из наиболее опасных элементов при радиационных авариях. Пример атмосферного трансграничного переноса ^{134}Cs в северном полушарии после аварий на Чернобыльской АЭС и на АЭС «Фукусима-1» определяет актуальность изучения современного фона этого радионуклида в морской среде и биоте.

В арктических морях сохраняется устойчивая тенденция к снижению техногенных изотопов. Однако на участках разгрузки выводных ледников материковых оледенений Новой Земли, Земли Франца-Иосифа, Шпицбергена, Северной Земли нельзя исключать локализацию слабого загрязнения морской среды этим изотопом.

Современные включения радиоизотопа в среду высокоширотной Арктики вызваны таянием ледников, аккумулировавших ранние атмосферные выпадения, и местными локальными источниками. В морях юга России включения ^{134}Cs в современные слои обусловлены переотложением донных осадков и эпизодическими смывами с территории водосбора.

В данном исследовании показан современный фон радиоактивного ^{134}Cs в экосистемах Азовского моря и морей арктического шельфа, превышение которого требует незамедлительных исследований и поиска источников эмиссии.

Ключевые слова: радиоактивность, морская среда, донные осадки, источники радиации.

THE SIGNIFICANCE OF RADIOACTIVE SOURCES IN THE LONG-TERM DYNAMICS OF ^{134}Cs IN THE ATOMIC EPOCH

Academician RAS G.G. Matishov[1, 2], G.V. Ilyin[1], I.S. Usyagina[1], V.V. Titov[2], E.E. Kirillova[2]

Abstract. The role of short-lived radioisotopes in the formation of the radioecological background in the seas of the Arctic and southern Russia is evaluated. The materials of long-term observations of the Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences and open literature sources on the content of the radioisotope ^{134}Cs in the marine environment and biota are analyzed. The levels of its concentration in soil,

[1] Мурманский морской биологический институт Российской академии наук (Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17

[2] Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: matishov_ssc-ras@ssc-ras.ru

[1] **Оригинальный текст:** *Матишов Г.Г., Ильин Г.В., Усягина И.С., Титов В.В., Кириллова Е.Э.* Роль источников радиационного загрязнения в динамике ^{134}Cs в атомную эпоху // Наука Юга России. 2021. Т. 17. № 2. С. 11–23.

lichens, algae, fish, seawater and bottom sediments are shown. The geographical features of its distribution in the marine and coastal environment are discussed. The obvious and potential sources of this radioisotope entering the marine ecosystems of the polar and southern seas of Russia are indicated. The short half-life makes ^{134}Cs a marker of recent atmospheric precipitation. Its inclusion in the spectrum of radioactive contamination is rare, and the concentrations are insignificant. However, the harsh gamma radiation makes it one of the most dangerous elements in radiation accidents. The example of atmospheric transboundary transport of ^{134}Cs in the northern hemisphere after the Chernobyl and Fukushima-1 accidents determines the relevance of studying the current background of this radionuclide in the marine environment and biota.

It is emphasized that in the Arctic seas there is a steady tendency to reduce man-made isotopes. However, in the areas of discharge of outflow glaciers of the continental glaciations of Novaya Zemlya, Franz Josef Land, Svalbard, and Severnaya Zemlya, it is impossible to exclude the localization of weak marine pollution with this isotope.

It is stated that the current radioisotope inclusions in the environment of the high-latitude Arctic are caused by the melting of glaciers that accumulated early atmospheric precipitation and local sources. In the seas of southern Russia, the inclusion of ^{134}Cs in modern layers is due to the re-deposition of bottom sediments and occasional washouts from the catchment area.

This study shows the current background of radioactive ^{134}Cs in the ecosystems of the Sea of Azov and the seas of the Arctic shelf, the excess of which requires immediate research and search for sources of emission.

Keywords: radioactivity, marine environment, bottom sediments, radiation sources.

ВВЕДЕНИЕ

В эпоху развития ядерного оружия, атомной энергетики, подводного флота северные и южные моря подвергались влиянию радиоактивного загрязнения. Однако экологические последствия, в частности вред морским и наземным животным, рыбным ресурсам, предпосылки для облучения населения, не стали очевидными. В спектре техногенной радиоактивности основной потенциал загрязнения и рисков закономерно связывается с относительно долгоживущими и наиболее распространенными радионуклидами ^{137}Cs, ^{90}Sr. В то же время роль короткоживущих изотопов (^{134}Cs, ^{133}Xe, ^{131}I, ^{132}I, ^{132}Te и т.д.) в жизнедеятельности экосистем арктических и южных морей остается не до конца ясной. В одних случаях изучение данного вопроса затрудняли относительно низкие концентрации и локальность распространения этих радиоизотопов. В других случаях с момента отбора образцов до проведения анализов проходит время, иногда равное периоду полураспада этих элементов. С 1989 г. Мурманский морской биологический институт Российской академии наук (ММБИ) проводит исследования по радиационной экологии океана в Баренцевом, Белом, Норвежском, Карском, Азовском и других морях [1–11].

^{134}Cs, период полураспада которого составляет около двух лет, другие короткоживущие радиоактивные элементы в среде и биоте арктических морей имеют ограниченное распространение, регистрируются эпизодически и привязаны к определенным отрезкам истории атомных испытаний или к инцидентам. Эмиссия радиоактивности от локальных и региональных источников прослеживается на расстоянии от нескольких до 60–70 км [1; 5; 11]. Вследствие быстрого полураспада концентрации короткоживущих радиоизотопов в грунтах, макрофитах и моллюсках вблизи мест сброса на порядок выше, чем в аккумулирующих желобах ближайших участков шельфа Баренцева и Карского морей.

Закономерно, что ^{137}Cs и ^{90}Sr, у которых период полураспада составляет около 30 лет, получили глобальное распространение и встречаются в постядерную эпоху повсеместно. Напротив, короткоживущий ^{134}Cs – крайне редкий элемент в морской и наземной среде Арктики. Его концентрации малы, и в наблюдениях 1978–2015 гг. чаще всего были ниже предела обнаружения при измерениях. Это обстоятельство затрудняет определение источников и объемов его эмиссии.

Цель работы – дать оценку роли короткоживущих радиоизотопов в формировании общего радиоэкологического фона в среде и биоте арктических и южных морей России, проанализировать географические особенности распространения ^{134}Cs, показать источники этого редко встречающегося в морской и прибрежной среде радиоизотопа.

Задачей исследования является обобщение материалов за 30-летний период экспедиций ММБИ на высокоширотные архипелаги Новой Земли, Зем-

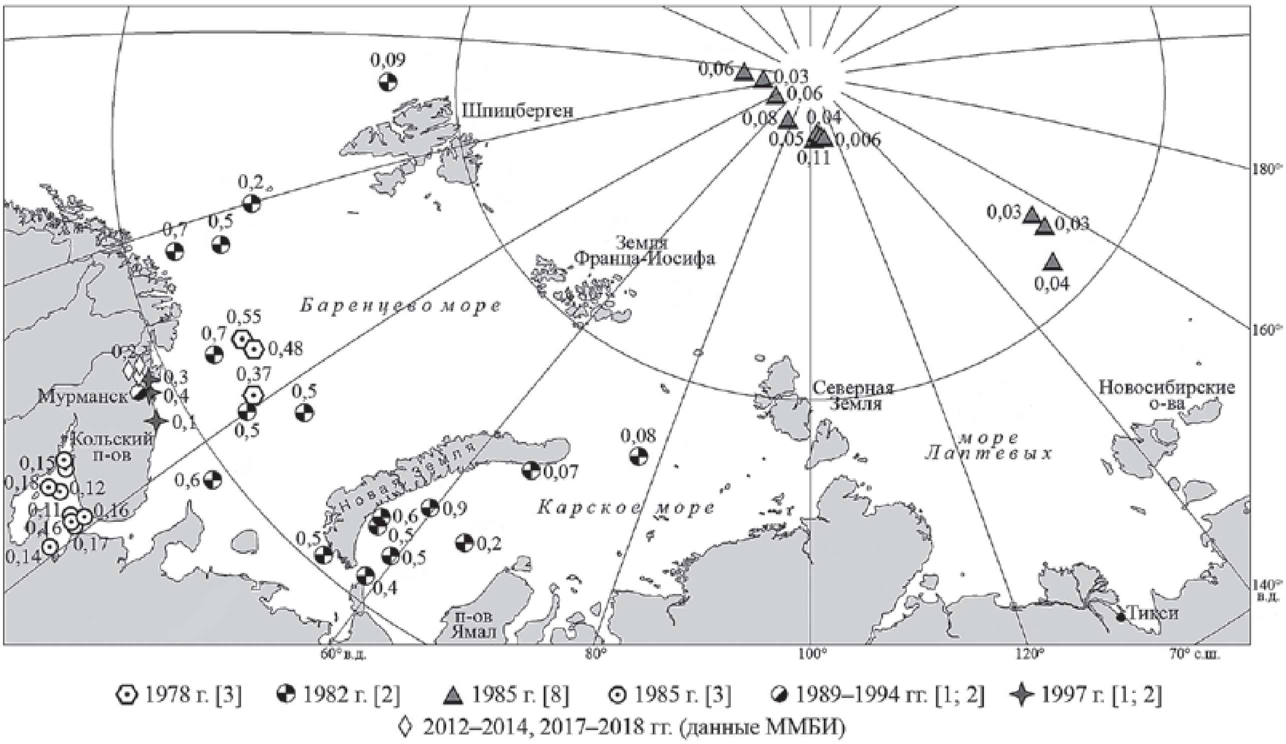


Рис. 1. Содержание ^{134}Cs в водах Баренцево-Карского региона (Бк/м^3), 1978–2018 гг.
Fig. 1. The ^{134}Cs activity in the water of the Barents-Kara seas region (Bq/m^3), 1978–2018.

ли Франца-Иосифа, Шпицбергена, заливов и губ Кольского полуострова и побережья Западной Сибири, во все ключевые районы шельфа Баренцева, Белого, Карского морей и Азовского моря (рис. 1–3; табл. 1). Другая задача исследования – понять и показать трансграничные миграции радиоактивного вещества, базируясь на результатах анализов образцов почвы, лишайников, водорослей, зообентоса, рыб, морской воды, донных отложений. Появление изотопов, типичных для выбросов при аварии на японской АЭС «Фукусима-1», в аэрозолях высокоширотных областей Европы (архипелаг Шпицберген, Кольский полуостров) определило актуальность изучения среды и биоты.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследование проведено на основе обширных наблюдений ММБИ (более 4 тыс. измерений за период с 1990-х гг. по 2020 г.) и литературных данных. Специфика местных источников ^{134}Cs исследована на пробах, отобранных в непосредственной близости от радиационно опасных объектов.

Радиометрический анализ проб выполнен в лаборатории ММБИ. Удельная (объемная) активность радиоактивных изотопов цезия измерена на спектрометрах γ-излучения «InSpector-2000», γ- и рентгеновского излучения «b13237» («Canberra», США). Спектры проанализированы с помощью программного обеспечения Genie-2000.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ядерные взрывы. Долгоживущие (30 лет и более) искусственные радионуклиды, такие как ^{137}Cs, ^{90}Sr , $^{139,\,240}$Pu, появились после ядерных испытаний в воздушной и морской среде, сбросов радиоактивных отходов в море, переноса их морскими течениями и стоками сибирских рек. Максимум испытаний приходился на 1954–1958 и 1961–1962 гг. [1; 6]. Часть радиоактивных частиц выпала недалеко от мест испытаний (в частности, на Новой Земле), другая часть задержалась в высоких слоях атмосферы. Затем ветром и морскими течениями этот материал переносился на большие расстояния.

В морские донные отложения радиоизотопы попадают из водной среды с задержкой, определяемой глубиной места и физическим состоянием водной массы [1; 2]. Трансграничный атмосферный перенос взвешенных частиц в высоких слоях атмосфе-

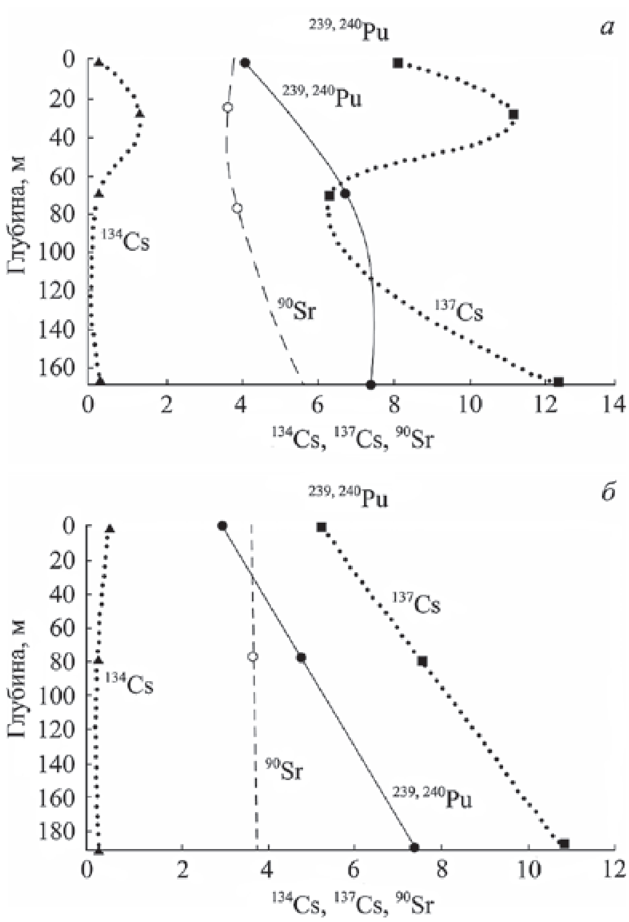


Рис. 2. Вертикальное распределение ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{90}Sr (Бк/м^3) и $^{239,\,240}$Pu (мБк/м^3) в воде Карского моря [19]: *а* – станция 1 (72°38′ с.ш., 58°45′ в.д.); *б* – станция 2 (76°08′ с.ш., 62°30′ в.д.).
Fig. 2. The ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{90}Sr (Bq/m^3) and $^{239,\,240}$Pu (mBq/m^3) activity profile in the water of the Kara Sea [19]: *a* – Station 1 (72°38′N, 58°45′E); *б* – Station 2 (76°08′N, 62°30′E).

ры осуществляется в короткий период. К примеру, уже через четыре дня после аварии на АЭС «Фукусима-1» на расстоянии более 7000 км от места эмиссии, в США, в воздухе был зарегистрирован ^{133}Xe. В Северном полушарии, где проводилась большая часть испытаний, выпала и большая часть радиоактивных осадков. Максимальные атмосферные выпадения искусственных радионуклидов на морской акватории Западной Арктики наблюдали в 1960-е гг. и в 1986 г. В 1980–1990-е гг. появилось множество публикаций, посвященных исследованию уровней концентрации и путей миграции изотопов ^{137}Cs, ^{134}Cs, ^{90}Sr, $^{239,\,240}$Pu, ^{241}Am, ^{60}Co в морях Евро-Арктического региона (рис. 1) [3–13]. После запрета в 1963 г. ядерных испытаний в атмосфере содержание радиоактивных веществ в Баренцевом и Карском морях приобрело тенденцию к снижению. Однако и в 1991 г. в донных отложениях губы Черной после испытания ядерного оружия в 1955–1961 гг. концентрации $^{239,\,240}$Pu, ^{241}Am, ^{60}Co, ^{137}Cs сохранялись на высоком уровне – 11,148; 3000, 618 и 1450 Бк/кг соответственно [1; 2].

Стоки западноевропейских и сибирских радиохимических заводов. Следующий после ограничения испытаний ядерного оружия пик поступления антропогенных радионуклидов в морскую Арктику пришелся на 1970–1980-е гг. вместе с пиком загрязнения вод Норвежского и Баренцева морей. Это повышение определялось переносом стоков западноевропейских заводов «Селлафилд» и «Ла-Хаг» [3–9; 14]. В Ирландском море в 1960–1990 гг. вблизи «Селлафилда» концентрация ^{137}Cs в поверхностных водах достигала 200–210 Бк/кг [5; 6]. В 1993–1994 гг. донные отложения в районе «Селлафилда» содержали до 400 Бк/кг ^{137}Cs и 250 Бк/кг ^{90}Sr. Радиоактивное загрязнение района характеризуется также присутствием изотопа ^{134}Cs, постоянно поступающего со сбросами предприятия. В отличие от этого вблизи новоземельских полигонов, в частности губы Черной, этот радиоизотоп практически не встречается. Радионуклид ^{134}Cs был выбран в качестве трассера трансграничного переноса радиоактивных отходов «Селлафилда» в Арктический бассейн в воде [8].

Шлейф радиоактивных загрязнений из Западной Европы пересекал шельф Баренцева моря и через 6 лет достигал Центрального Полярного бассейна (рис. 1). Содержание ^{137}Cs в водах этого бассейна поднималось до 10–50 Бк/м^3 [16]. Осенью 1979 г. на Медвежинской банке вода содержала 8–15 Бк/м^3 ^{134}Cs и ^{137}Cs [9]. Максимальная концентрация радиоцезия была характерна для прибрежных струй Норвежского течения. В 1979 г. содержание ^{137}Cs и ^{134}Cs в поверхностных водах и на глубине 100 м варьировалось от 40 до 80 Бк/м^3. В эти же годы в водах Мурманского прибрежного течения присутствовал ^{134}Cs на уровне 0,2–0,7 Бк/м^3. Этот радиоизотоп практически отсутствовал в радиоактивных атмосферных выпадениях вплоть до аварии на Чернобыльской АЭС. Атмосферные выпадения продуктов аварийного выброса привели к загрязнению им морских акваторий. В середине 1980-х гг. в водах Центрального Полярного бассейна (рис. 1) ^{134}Cs отмечался в малых количествах – 0,03–0,11 Бк/м^3 [3; 8]. Его содержание в поверхностных водах Баренцева, Карского и Гренландского морей составляло 0,07–0,7 Бк/м^3.

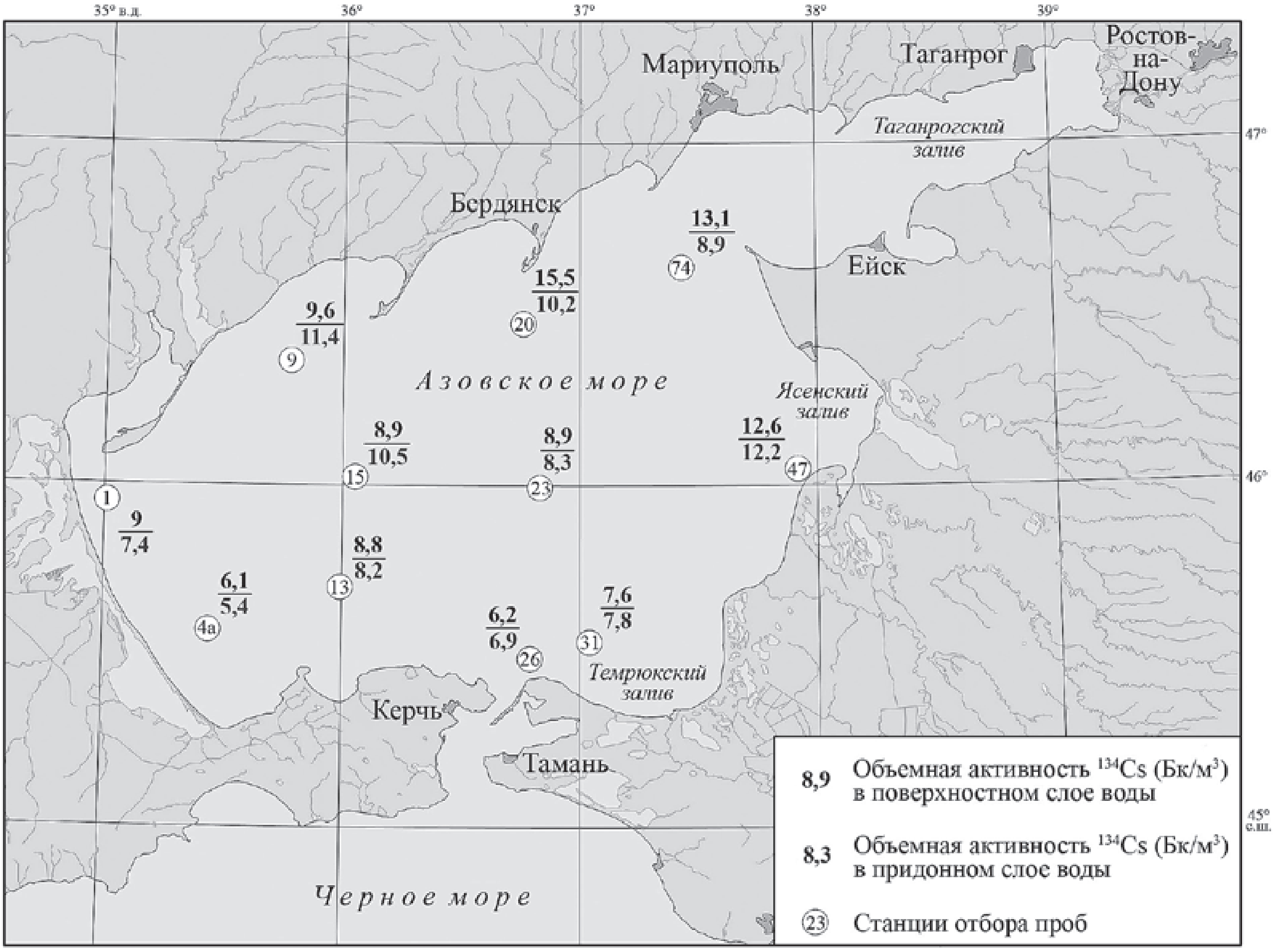


Рис. 3. Содержание ^{134}Cs в водах Азовского моря (Бк/м^3), 1987 г. [17].
Fig. 3. ^{134}Cs activity in water of the Sea of Azov (Bq/m^3), 1987 [17].

Радиохимические комбинаты «Маяк», «Томск-7» и другие в 1950–1990 гг., сбрасывая отходы в Енисей и Обь, являлись источником техногенных радионуклидов в Карском море [1; 2; 10; 15]. В грунтах Енисейской и Обской губ отмечалось значительное радиационное загрязнение.

Основные пути переноса радионуклидов в Западно-Арктическом регионе впервые показаны ММБИ в 1994 г. на карте «Уровни и основные направления переноса радионуклидов в Баренцевом и Карском морях» [14]. Анализ глубинных профилей из Новоземельского желоба (рис. 2) показывает, что под распресненным поверхностным слоем залегали воды со сравнительно высоким содержанием ^{137}Cs – 20 Бк/м^3, а ^{134}Cs в воде было относительно мало – от 0,1 до 0,7 Бк/кг. Соотношение ^{134}Cs и ^{137}Cs находилось в пределах 0,019 : 0,034. Происхождение ^{134}Cs может быть связано не с английскими, а с местными источниками [11].

Выбросы при авариях на ядерных объектах. В результате аварии на Чернобыльской АЭС с атмосферными и речными потоками в северные моря поступило огромное количество ^{137}Cs, ^{134}Cs и других радиоизотопов. До взрыва на Чернобыле воды Балтики содержали ^{137}Cs примерно 20–45 Бк/м^3 , но ^{134}Cs не обнаруживался.

После аварии концентрация ^{134}Cs в воде и планктоне Финского залива в 1986 г. достигала соответственно 5900 Бк/м^3 и 1500 Бк/кг сухой массы [3–7; 10–13]. В донных отложениях Балтики ^{134}Cs накопился до 100–400 Бк/кг. В 1986–1987 гг. в балтийской сельди и окунях содержание ^{134}Cs варьировало от 3 до 96 Бк/кг [12]. В проливе Скагеррак в треске ^{134}Cs обнаружен в количестве около 0,3 Бк/кг [13]. Уровни объемной активности радиоцезия в морской воде 50–90 Бк/м^3 стали для Балтийского моря в 1990-е гг. фоновыми. Аномально высокая (50–100 Бк/м^3) концентрация ^{137}Cs в водах пролива Ска-

Таблица 1. Концентрация ^{134}Cs в воде (Бк/м³, поверхностный слой) и донных отложениях (0–3 см, Бк/кг сухой массы) в 1978–2018 гг. в Арктическом регионе
Table 1. Concentration of ^{134}Cs in water (Bq/m³, surface layer) and bottom sediments (0–3 cm, Bq/kg of dry weight) in 1978–2018 in the Arctic region

Координаты Coordinates		Концентрация ^{134}Cs ^{134}Cs concentration	Год наблюдения Year of observation
N	E		
Вода, открытое море Water, open sea			
72,33333	33,50000	0,55	1978
72,50000	35,00000	0,48	1978
71,83333	39,00000	0,37	1978
69,53533	43,16217	0,6	1982
70,37183	54,79700	0,5	1982
70,65683	58,84617	0,4	1982
73,01283	64,56800	0,2	1982
71,53983	59,53967	0,5	1982
71,97150	56,80000	0,6	1982
72,22900	56,48950	0,5	1982
77,44250	77,25450	0,08	1982
75,75683	66,24800	0,07	1982
71,41583	22,42517	0,7	1982
72,72950	43,45917	0,5	1982
71,43133	39,96517	0,5	1982
71,44083	33,48567	0,7	1982
73,28683	59,64117	0,9	1982
72,73050	23,40083	0,5	1982
73,86400	20,12150	0,2	1982
78,04433	7,33300	0,09	1982
64,68600	39,45733	0,14	1985
65,66433	38,45017	0,11	1985
65,59083	39,31567	0,17	1985
65,75017	36,52700	0,12	1985
66,21117	35,30650	0,15	1985
65,58733	38,91800	0,16	1985
65,97017	39,17500	0,16	1985
65,53133	35,77067	0,18	1985
66,29183	34,66233	0,15	1985
81,17350	150,67383	0,04	1985
82,02283	155,75083	0,03	1985
82,49050	156,22033	0,03	1985
88,02433	103,27867	0,11	1985
88,20450	105,53917	0,006	1985
88,12217	108,55683	0,05	1985
88,02400	111,30183	0,04	1985
88,51283	75,26917	0,08	1985

Окончание табл. 1

Координаты Coordinates N	Координаты Coordinates E	Концентрация ^{134}Cs ^{134}Cs concentration	Год наблюдения Year of observation
88,87683	40,55200	0,06	1985
88,68417	11,54167	0,06	1985
88,13517	3,52817	0,03	1985
Вода, район ФГУП «Атомфлот» Water, district of the Federal State Unitary Enterprise "Atomflot"			
69,03455	33,05890	6,3	1997
69,03765	33,05812	9,2	1997
69,04040	33,06292	3,3	1997
69,05520	33,08157	0,3	1997
Вода, губа Андреева Water, Andreev Bay			
69,451167	32,354833	следы trace amounts	2014
69,442833	32,354667	следы trace amounts	2014
69,443167	32,352667	следы trace amounts	2014
Вода, губа Западная Лица Western Litsa Bay			
69,12083	36,04200	0,1	1997
69,32967	33,55233	0,4	1997
69,47333	32,50833	0,3	1997
Донные отложения, губа Андреева Bottom sediments, Andreev Bay			
69,4618	32,6089	0,2	2013
Донные отложения, шельф Шпицбергена Bottom sediments, Shpitsbergen shelf			
78,4983	33,5067	1,4	2015
77,5017	26,9850	1,8	2015
76,0867	18,6667	0,7	2015
Донные отложения, Исфьод Bottom sediments, Isfjord			
78,6583	16,6767	1,6	2015

геррак в течение 1990-х гг. поддерживалась постоянной адвекцией балтийских вод на запад [7]. В поверхностных водах проливов Скагеррак и Каттегат отношение объемной активности ^{134}Cs к объемной активности ^{137}Cs варьировало в 1996, 1997, 1998 гг. в пределах 0,023; 0,017 и 0,013 соответственно.

В Баренцево-Карском бассейне чернобыльский шлейф формировался за счет адвекции загрязненных балтийских вод и за счет смыва с водосборов северных рек. В начале 1990-х гг. в донных отложениях Печорской губы концентрации ^{134}Cs колебались от 0,4 до 1,13 Бк/кг, а в Чёшской губе составляли 0,6 Бк/кг [1]. Вероятно, происхождение ^{134}Cs связано с глобальными выпадениями в водосборных бассейнах рек (рис. 1).

В бассейне Азовского моря, включая Цимлянское водохранилище, в 1987 г. и позже в воде и донных отложениях четко прослеживается ^{134}Cs – индикатор поступления продуктов аварийного выброса Чернобыльской АЭС в 1986 г. [1; 16–18]. Содержание этого изотопа в Азовском море в 1986 и 1987 гг. в среднем составляло 8,5 ± 2,0 Бк/м^3 и 9,2 ± 2,5 Бк/м^3 соответ-

Таблица 2. Отношение объемных (удельных) активностей ^{134}Cs к ^{137}Cs в воде и донных осадках Азовского моря, 1987 г. [17]
Table 2. Ratio of ^{134}Cs and ^{137}Cs radioisotope concentrations in water and bottom sediments of the Sea of Azov, 1987 [17]

№ станции Station number	Координаты Coordinates		Горизонт Horizon	Содержание ^{134}Cs в воде, Бк/м^3 / ^{134}Cs concentration in water, Bq/m^3	Отношение ^{137}Cs к ^{134}Cs Ratio of ^{137}Cs to ^{134}Cs		
	N	E			Растворенные формы / Dissolved forms	Взвешенные формы / Suspended forms	Донные отложения / Bottom sediments
74	46,6370	37,4304	поверхностный surface	13,1	3,5	2,1	–
			придонный bottom	8,9	3,8	2,3	–
20	46,4736	36,7585	поверхностный surface	15,5	3,5	2,0	–
			придонный bottom	10,2	3,7	–	3,6
47	46,0490	37,9174	поверхностный surface	12,6	2,8	1,6	–
			придонный bottom	12,2	2,7	1,3	1,1
9	46,3625	35,7785	поверхностный surface	9,6	3,2	0,8	–
			придонный bottom	11,4	2,9	–	5,5
1	45,9488	35,011	поверхностный surface	9	2,9	1,3	–
			придонный bottom	7,4	3,0	–	–
4a	45,5744	35,4432	поверхностный surface	6,1	3,2	–	–
			придонный bottom	5,4	3,9	3,0	10,8
13	45,7015	35,9933	поверхностный surface	8,8	3,7	–	–
			придонный bottom	8,2	3,5	1,3	4,4
15	46,0242	36,0530	поверхностный surface	8,9	3,0	–	–
			придонный bottom	10,5	2,9	–	4,6
23	45,9938	36,8304	поверхностный surface	8,9	3,2	2,6	–
			придонный bottom	8,8	3,7	3,2	3,9
26	45,4937	36,7901	поверхностный surface	6,2	3,8	–	–
			придонный bottom	6,9	4,0	2,8	4,8
31	45,5424	37,0391	поверхностный surface	7,6	3,4	–	–
			придонный bottom	7,8	3,3	–	4,2

Таблица 3. Удельная активность техногенных и природных радионуклидов в воде (поверхностный слой, Бк/м³) и донных отложениях (0–3 см, Бк/кг сухой массы) Азовского моря в 2019 г.
Table 3. Specific activity of technogenic and natural radionuclides in water (Bq/m³, surface layer) and bottom sediments (0–3 cm, Bq/kg of dry weight) of the Sea of Azov in 2019

№ станции / Station number	Координаты Coordinates		Глубина, м Depth, m	^{137}Cs	^{90}Sr	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th
	N	E						
Морская вода Sea water								
1	38,86550	47,03782	4,6	1,1 ± 0.2	–	–	–	–
6	37,57163	46,81902	6,3	4,1 ± 0.9	–	–	–	–
12	38,12870	46,23722	4,8	<0.2	–	–	–	–
41	37,29838	45,47427	6	5,3 ± 0.9	–	–	–	–
59	36,67503	45,47267	11	3,1 ± 1.1	–	–	–	–
70	35,24525	45,63443	6	7,2 ± 1.5	–	–	–	–
77	36,60897	46,02643	11,9	5,8 ± 1.4	–	–	–	–
Донные отложения Bottom sediments								
1	38,86550	47,03782	4,6	25,9 ± 5,2	<0,2	518 ± 34	21,9 ± 4,7	32,4 ± 4,2
2	3822,48	4659,54	6	45,5 ± 7,8	–	1081 ± 92	34,9 ± 5	57,7 ± 5,9
3	3809,20	4650,56	5,2	29,9 ± 5,2	0,51 ± 0,04	841 ± 75	35,5 ± 4,6	35,5 ± 4,6
4	3750,69	4652,34	6,6	21,2 ± 3,8	<0,2	655 ± 59	32,9 ± 4,3	39,8 ± 3,9
12	3807,72	4614,23	4,8	11,6 ± 2,8	<0,2	253 ± 5,1	21,0 ± 3,5	22,8 ± 3
15	3711,85	4556,55	12,6	60,9 ± 10,6	1,57 ± 0,33	1034 ± 74	19,9 ± 4,7	32,7 ± 6,1
21	3729,97	4543,77	11,6	66,5 ± 10,7	5,37 ± 0,26	1110 ± 83	22,2 ± 3,5	46,7 ± 5,1
26	3633,79	4530,65	7	24,5 ± 5,2	7,26 ± 0,33	391 ± 74	28,3 ± 4,7	32,4 ± 4,2
41	3717,96	4528,46	6	65,4 ± 10,2	2,98 ± 0,53	1086 ± 69	29,7 ± 2,9	49,8 ± 4,3
59	3640,50	4528,36	10,6	49,1 ± 9,3	<0,2	703 ± 119	24,5 ± 5,7	43,4 ± 6,4
59	3640,50	4528,36	11	<0,2	–	904 ± 57	34,7 ± 2,5	47,8 ± 4,2
63	3621,41	4530,91	11,6	54,2 ± 9,1	–	857 ± 79	27,8 ± 4,4	44,7 ± 4,7
66	3536,22	4542,21	10,2	28,9 ± 4,9	3,71 ± 0,63	724 ± 60	24,1 ± 3,8	37,6 ± 3,2
68	3534,90	4524,88	8,6	58,4 ± 9,1	<0,2	1119 ± 71	28,8 ± 2,8	50,4 ± 4,3
75	3611,56	4603,35	12,6	53,1 ± 8,3	<0,2	947 ± 61	24,2 ± 2,5	31,1 ± 2,7
76	3630,49	4553,36	12	64,8 ± 10,8	<0,2	1146 ± 104	33,8 ± 4,5	63,5 ± 6,5
80	3702,62	4618,16	12	63,8 ± 11,7	<0,2	1248 ± 116	30,9 ± 5,3	58,3 ± 6,5

ственно [17], а диапазон изменения – 5,4–13,6 Бк/м³. Отмечалась дифференциация концентраций по глубине. В поверхностных азовских водах объемная активность ^{134}Cs варьировалась от 6,1–10 до 13,1 Бк/м³, а в придонном слое на глубинах 8–13 м – от 5,4–7 до 13 Бк/м³ (рис. 3, табл. 2). Отношение объемной активности ^{134}Cs к объемной активности ^{137}Cs в 1987 г. составило 0,31 ± 0,03. За счет меньшего периода полураспада ^{134}Cs в 1992 г. его содержание в воде фактически находилось на уровне минимально определяемой величины, а отношение к содержанию ^{137}Cs уменьшилось более чем в 3 раза [17]. Результаты анализа проб воды, отобранных сотрудниками Южного научного центра Российской академии наук (ЮНЦ РАН) в экспедиции 2020 г., показали, что в азовской воде присутствовал ^{137}Cs в пределах 0,2–7,2 Бк/м³. Радиоизотоп ^{134}Cs в среде отсутствовал (табл. 3).

Средняя концентрация ^{134}Cs в донных отложениях Азовского моря в 1987 г. равнялась 22,1, а в 1988 г. – 14,4 Бк/кг сухой массы. В Цимлянском водохранилище в большинстве проб (75%), в которых выявлен ^{137}Cs (17 ± 2 Бк/кг), ^{134}Cs не был обнаружен. В остальных пробах содержание ^{134}Cs и ^{137}Cs составляет в среднем 8 ± 2 и 62 ± 2 Бк/кг соответственно [16]. Анализ образцов грунта, отобранных в экспедиции ЮНЦ РАН в Азовском море на научно-исследовательском судне «Денеб» в июле 2019 г., выявил концентрации ^{137}Cs в пределах 10–65 Бк/кг (табл. 3). Короткоживущие радиоизотопы не были обнаружены.

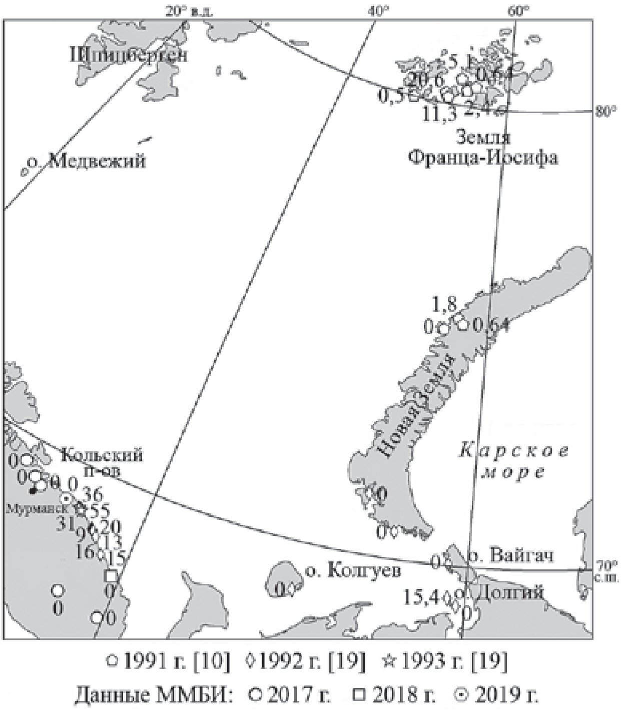


Рис. 4. Содержание ^{134}Cs в лишайниках прибрежных наземных экосистем Баренцево-Карского региона (Бк/кг сухой массы), 1978–2018 гг.
Fig. 4. ^{134}Cs activity in lichens of coastal terrestrial ecosystems of the Barents-Kara seas region (Bq/kg, dry weight), 1978–2018.

На Кольском полуострове и на островах Баренцева моря концентрация ^{134}Cs в лишайниках была выше, чем на высокоширотных архипелагах – от 0 до 32 Бк/кг сухой массы (рис. 4, табл. 1). В 1991 г. на архипелаге Земля Франца Иосифа и на севере Новой Земли концентрация ^{134}Cs в лишайниках изменялась от 0,5 до 20,6 Бк/кг, в частности на острове Гукера – до 20,6 Бк/кг, на острове Скатт-Келти – 2,4 Бк/кг, на острове Мейбелл – 0,5 Бк/кг [1; 2; 10]. Новые, «свежие», включения ^{134}Cs в количестве 0,4–1,2 Бк/кг в 2015 г. отмечены в донных отложениях фьордов и шельфа Западного Шпицбергена. Включения ^{134}Cs отмечаются в осадках Исфьорда. В донных отложениях на дне Зюйдкапского желоба присутствовал ^{134}Cs – от 0,7 до 1,8 Бк/кг (табл. 1). На станциях разреза через Баренцево море вдоль «Кольского меридиана» (33°30′ в.д.) этот радионуклид не был обнаружен.

В районе Кировск – Апатиты короткоживущий ^{134}Cs (1,9 ± 1,0 Бк/кг) был выявлен в пробе лишайников. Его присутствие может свидетельствовать о наличии в атмосферных осадках осколочных радионуклидов, связанных с аварией в Японии, либо с эпизодическими утечками с Кольской АЭС (рис. 4, табл. 1).

Требуют учета современные инциденты на атомных подводных лодках Военно-морского флота РФ («Комсомолец», 1989 г., «Курск», 2000 г., АС-12 «Лошарик», 2019 г.), деятельность атомного флота и плавучих атомных электростанций. Экспедиция ММБИ в 2000 г. в акваторию гибели атомной подводной лодки «Курск» не обнаружила свидетельств эмиссии короткоживущих изотопов (^{134}Cs, ^{140}La, ^{131}I, ^{140}Ba, ^{141}Ce, ^{95}Nb, ^{103}Ru, ^{95}Zr), связанных с утечкой ядерного топлива реакторов. В обследованной акватории во всех элементах морской экосистемы уровень ^{137}Cs, а также ^{90}Sr имел фоновые значения, такие же, как до аварии.

После обнаружения в аэрозолях в районе архипелага Шпицберген и на Кольском полуострове изотопов, типичных для выбросов АЭС «Фукусима-1», в марте – ноябре 2011 г. сотрудниками ММБИ были выполнены исследования по оценке загрязнения прибрежных и наземных экосистем Баренцева моря. Изотопы, по которым можно было бы надежно идентифицировать «след» аварийных выбросов АЭС «Фукусима-1», в исследованных пробах отсутствовали.

Местные источники. Эмиссия с баз атомных флотов охватывает конец XX и начало XXI века, когда шло стремительное развитие атомного подводного и надводного флота, его заводской, складской и ремонтной баз в губах Кольского и Мотовского заливов [1; 9]. В губе Западная Лица, где находится база атомных подводных лодок, и в губе Андреева с хранилищем отработанного ядерного топлива, имели место аварии с неконтролируемыми выбросами радиоактивных веществ в акваторию и атмосферу. Локальное поступление радиоизотопов в губу Андреева в 1982 г. было вызвано аварийной утечкой отходов из хранилища [1; 9]. В начале 2000-х гг. радиоизотопы ^{134}Cs, ^{60}Co, ^{152}Eu, ^{241}Am в осадках губ Андреева, Малая Андреева обнаруживали фрагментарно в очень низкой концентрации, <1,5 Бк/кг сухой массы. В осадках Мотовского залива данные радионуклиды не встречены.

В пробах алевритовых осадков, отобранных в 1996–1997 гг. в губе Западная Лица, присутствовали ^{137}Cs (от 0,7 до 50 Бк/кг), ^{60}Cs (от 0,5 до 4,0 Бк/кг) и $^{239,\,240}$Pu (около 2 Бк/кг). ^{134}Cs обнаруживался только в поверхностном слое воды в концентрации 0,1–0,4 Бк/м^3 (табл. 1). При более поздних и расширенных исследованиях 2013 г. радиоизотоп ^{134}Cs в донных осадках также практически отсутствовал. В единичных пробах обнаруживалась его остаточная (следовая) концентрация на уровне <0,2 Бк/кг. В Кольском заливе в 1998 г. вблизи баз атомного флота в губах Пала и Екатерининская гавань были установлены ощутимые уровни ^{60}Co – до 74 Бк/кг и до 28 Бк/кг соответственно. В некоторых образцах грунта зафиксированы изотопы ^{134}Cs, ^{125}Sb, ^{154}Eu. Вероятно, короткоживущий ^{134}Cs на дне залива имеет местное происхождение [1; 9]. В одном образце ламинарии (Кольский залив близ мыса Мишуков) обнаружены следовые количества ^{134}Cs и ^{152}Eu, что связано также с влиянием местных источников.

С 1989 г. источником техногенных радионуклидов являлась установка по очистке жидких радиоактивных отходов, расположенная на территории ремонтно-технологического предприятия «Атомфлот» (ныне Федеральное государственное унитарное предприятие «Атомфлот», г. Мурманск). В 1997 г. в воде рядом с предприятием фиксировался ^{134}Cs в количестве от 0,3–3,3 до 27 Бк/м^3. В среднем за период с 1989 по 1994 г., когда осуществлялся слив отходов, объем ^{137}Cs и ^{90}Sr, поступающих с предприятия, составил $1{,}6 \times 10^7$ и $7{,}6 \times 10^7$ Бк/год соответственно [1]. Наибольшее количество ^{137}Cs и ^{90}Sr ($2{,}1 \times 10^8$ и $2{,}6 \times 10^7$ Бк/год) поступило в залив в 1992 г.

В пробах почв Кольского полуострова, взятых в 20 экспедициях в течение 2010–2018 гг., содержание ^{134}Cs оказалось ниже минимально детектируемой активности (<0,2 Бк/кг). Лишь в одном случае на востоке региона, у пос. Каневка, уровень ^{134}Cs составил 1,2 Бк/кг. Вероятно, этот радионуклид был занесен местными воздушными потоками.

В донных отложениях Кандалакшского залива ^{134}Cs обнаруживался эпизодически. Его средняя объемная активность в верхних и глубинных слоях водоема составляла 0,14–0,17 Бк/м^3.

Захоронения радиоактивных материалов в заливах Новой Земли – Абросимова, Степового, Цивольки – являются потенциальными источниками загрязнения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При анализе хронологии обнаружений ^{134}Cs в воде, донных отложениях, биоте, почве с учетом местоположения складываются представления о его роли в разные годы в загрязнении Арктики. Этот изотоп редко присутствует в глобальных источниках загрязнения. Он образуется исключительно в процессе цепной реакции в атомных реакторах и при испытании ядерного оружия. По сравнению с ^{137}Cs данный радиоизотоп обладает существенно более коротким периодом полураспада ($T_{1/2}$ = 2,062 года). Жесткое гамма-излучение делает его одним из наиболее опасных элементов при радиационных авариях. Соответственно, поступления в среду ^{134}Cs были возможны в относительно короткий период после выбросов во внешнюю среду. Известно, что этот радиоизотоп был маркером атмосферных выбросов в период аварии в 2011 г. на АЭС «Фукусима-1».

Ледники Шпицбергена рассматриваются как зоны ледовой аккумуляции атмосферных выпадений, в том числе аэрозолей, возникших при аварии на АЭС «Фукусима-1». Включение ^{134}Cs в осадки внешнего шельфа и фьордов Шпицбергена произошло в результате выноса радионуклидов при таянии выводных ледников. Этот факт косвенно свидетельствует о радиусе воздушного переноса радиоактивной пыли от источника.

В XXI веке в арктических морях сохраняется тенденция к снижению техногенных изотопов. Современные источники искусственной радиации, включая радиоизотоп ^{134}Cs, в Заполярье неочевидны, но они есть: ледники, воздушный перенос и глобальные выпадения, местные выбросы. На участках разгрузки выводных ледников материковых оледенений Новой Земли, Земли Франца-Иосифа, Шпицбергена, Северной Земли нельзя исключать локализацию слабого загрязнения морской среды этим изотопом. В случае нахождения на побережье или в морской среде Баренцево-Карского региона ^{134}Cs необходимы незамедлительные исследования и поиск источников эмиссии.

Публикация подготовлена в рамках научного проекта РФФИ № 18-05-60249 (Г.Г. Матишов, Г.В. Ильин, И.С. Усягина) и по госзаданию ММБИ РАН (Г.Г. Матишов, Г.В. Ильин, И.С. Усягина), а также в рамках выполнения темы НИР ГЗ ЮНЦ РАН № 01201363186 и проекта № 19-05-50099 «Микромир» (Г.Г. Матишов, В.В. Титов, Е.Э. Кириллова).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г. 2001. *Радиационная экологическая океанология*. Апатиты, изд-во КНЦ РАН: 417 с.
2. Matishov G., Weslawski S. 1991. *Barents Sea biological resources and human impact. Map Scale: 1 : 3000 000*. Oslo, Norwegian Polar Institute.
3. Вакуловский С.М., Никитин А.И., Чумичев В.Б. 1985. О загрязнении арктических морей радиоактивными отходами западноевропейских радиохимических заводов. *Атомная энергия*. 58(6): 445–449.
4. Kautsky N. 1986. Distribution and content of $^{137+134}$Cs and ^{90}Sr in the water of the North Sea during the years 1982 to 1984. *Deutsche Hydrografische Zeitschrift*. 39: 139–159. doi: 10.1007/BF02307875

5. Hunt G.J., Kershaw P.J. 1990. Remobilization of artificial radionuclides from the sediment of the Irish Sea. *Journal of Radiological Protection*. 10(2): 147–151. doi: 10.1088/0952-4746/10/2/009

6. Kershaw P. J., Pentreath R.J., Woodhead D.S., Hunt G.J. 1992. *A review of radioactivity in the Irish Sea*. Lowestoft, Ministry of Agriculture, Fisheries and Food: 65 p.

7. Nies H., Harms I.H., Bahe C., Karcher M.J., Dethleff D., Kuhlmann G., Oberhuber J.O., Backhaus E., Kleine E., Loewe P., Matishov D., Stepanov A., Vasiliev O.F. 1998. Anthropogenic radioactivity in the Nordic Seas and the Arctic Ocean: Results from a joint project. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*. 50(4): 313–343. doi: 10.1007/BF02764228

8. Никитин А.И., Катрич И.Ю., Кабанов А.И., Чумичев В.Б., Смагин В.М. 1991. Радиоактивное загрязнение Северного Ледовитого океана по результатам наблюдений в 1985–1987 гг. *Атомная энергия*. 71(2): 169–172.

9. Ильин Г.В., Усягина И.С., Касаткина Н.Е. 2015. Радиоэкологическое состояние морской и наземной среды в районе губы Андреева. *Атомная энергия*. 118(3): 168–174.

10. Rissanen K., Matishov G., Matishov D. 1995. Radioactivity level in Barents, Petshora, Kara, Laptev and White Seas. In: *Environmental Radioactivity in the Arctic*. Rundels, Finnish Center for Radiation and Nuclear Safety: 208–214.

11. Foyn L., Nikitin A. 1993. The joint Norwegian-Russian expedition to the dumpsites for radioactive waste in the open Kara Sea, Tsivolki fjord and the Stepovogo fjord. September-October 1993. Report from the Expedition on Board R/V Victor Buinitski, with some preliminary results. 29 p.

12. Ilus E., Sjöblom K.-L., Ikäheimonen T.K., Saxen R., Klemola S. 1993. *Monitoring of radionuclides in the Baltic Sea in 1989–1990. Supplement 10 to Annual Report STUK-A89. STUK-A.103*. Helsinki, Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety: 35 p.

13. Sickel M.A., Selnas T.D., Christensen G.C., Strand P. 1995. Radioactivity in the Marine Environment. *In:* Report from the National surveillance program Strallvern Rapport. Østerås, Norwegian Radiation Protection Authority: 23–24.

14. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Назимов В.В. 1994. *Уровни и основные направления переноса радионуклидов в Баренцевом и Карском морях. Карта. Масштаб 1 : 4704075*. Рованиеми, изд-во ММБИ КНЦ РАН.

15. Мирошников А.Ю., Флинт М.В., Асадулин Э.Э., Комаров В.Б. 2020. Радиационно-геохимическая устойчивость донных осадков в эстуариях Оби и Енисея и на прилегающем мелководье Карского моря. *Океанология*. 60(6): 930–944. doi: 10.31857/S0030157420060088

16. Бессонов О.А., Давыдов М.Г., Марескин С.А., Малаева Т.Ю., Страдомская Е.А. 1994. Содержание радионуклидов в донных отложениях Цимлянского водохранилища. *Атомная энергия*. 77(1): 48–51.

17. Рябинин А.И., Белявская В.Б., Долотова И.С. 1992. Техногенные радионуклиды и стронций в Азовском море в 1987–1988 гг. *Труды государственного океанографического института*. 205: 96–105.

18. Буфетова М.В., Гаргопа Ю.М., Громов В.В., Ильин Г.В., Кавцевич Н.Н., Кренева К.В., Ларионов В.В., Лебедева Н.В., Макаревич П.Р., Маркитан Л.В., Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Намятов А.А., Савинова Т.Н., Фуштей Т.В. 2000. *Закономерности океанографических и биологических процессов в Азовском море*. Апатиты, изд-во КНЦ РАН: 434 с.

19. Strand P., Nikitin A., Rudjord A.L., Salbu B., Christensen G., Foin L., Kryshev I.I., Chumichev V.B., Dahlgaard H., Holm E. 1994. Survey of artificial radionuclides in the Barents Sea and the Kara Sea. *Journal of Environmental Radioactivity*. 25(1–2): 99–112. doi: 10.1016/0265-931X(94)90010-8

REFERENCES

1. Matishov G.G., Matishov D.G. 2001. *Radiatsionnaya ekologicheskaya okeanologiya*. [*Radiation Ecological Oceanology*]. Apatity, Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 417 p. (In Russian).

2. Matishov G., Weslawski S. 1991. *Barents Sea biological resources and human impact. Map Scale: 1 : 3000 000*. Oslo, Norwegian Polar Institute.

3. Vakulovskii S.M., Nikitin A.I., Chumichev V.B. 1985. Pollution of arctic seas by radioactive wastes from west European nuclear reprocessing plants. *Soviet Atomic Energy*. 58: 509–514. doi: 10.1007/BF01130862

4. Kautsky N. 1986. [Distribution and content of $^{137+134}$Cs and ^{90}Sr in the water of the North Sea during the years 1982 to 1984]. *Deutsche Hydrografische Zeitschrift*. 39: 139–159. doi: 10.1007/BF02307875

5. Hunt G.J., Kershaw P.J. 1990. Remobilization of artificial radionuclides from the sediment of the Irish Sea. *Journal of Radiological Protection*. 10(2): 147–151. doi: 10.1088/0952-4746/10/2/009

6. Kershaw P. J., Pentreath R.J., Woodhead D.S., Hunt G.J. 1992. *A review of radioactivity in the Irish Sea*. Lowestoft, Ministry of Agriculture, Fisheries and Food: 65 p.

7. Nies H., Harms I.H., Bahe C., Karcher M.J., Dethleff D., Kuhlmann G., Oberhuber J.O., Backhaus E., Kleine E., Loewe P., Matishov D., Stepanov A., Vasiliev O.F. 1998. Anthropogenic radioactivity in the Nordic Seas and the Arctic Ocean: Results from a joint project. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*. 50(4): 313–343. doi: 10.1007/BF02764228

8. Nikitin A.I., Katrich I.Yu., Kabanov A.I., Chumichev V.B., Smagin V.M. 1991. [Results of observations of radioactive contamination of the Arctic Ocean in 1985–1987]. *Atomnaya energiya*. 71(2): 169–172. (In Russian).

9. Il'in G.V., Usyagina I.S., Kasatkina N.E. 2015. Radioecological state of marine and land environments in the region of Guba Andreeva. *Atomic Energy*. 118(3): 215–221. doi: 10.1007/s10512-015-9981-x

10. Rissanen K., Matishov G., Matishov D. 1995. Radioactivity level in Barents, Petshora, Kara, Laptev and White Seas. In: *Environmental Radioactivity in the Arctic*. Rundels, Finnish Center for Radiation and Nuclear Safety: 208–214.

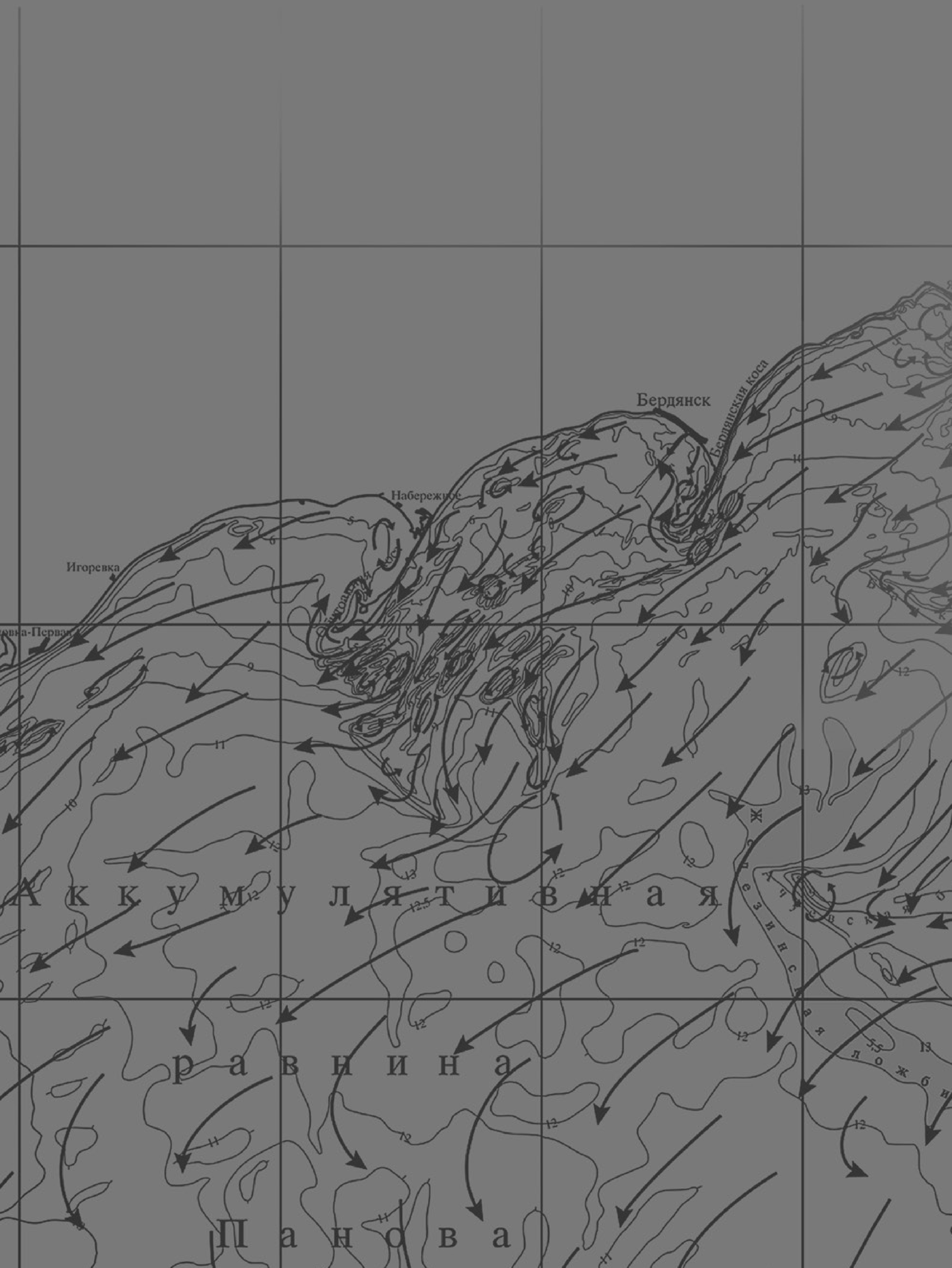
11. Foyn L., Nikitin A. 1993. The joint Norwegian-Russian expedition to the dumpsites for radioactive waste in the open Kara Sea, Tsivolki fjord and the Stepovogo fjord. September-October 1993. Report from the Expedition on Board R/V Victor Buinitski, with some preliminary results. 29 p.

12. Ilus E., Sjöblom K.-L., Ikäheimonen T.K., Saxen R., Klemola S. 1993. *Monitoring of radionuclides in the Baltic Sea in 1989–1990. Supplement 10 to Annual Report STUK-A89.*

STUK-A.103. Helsinki, Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety: 35 p.

13. Sickel M.A., Selnas T.D., Christensen G.C., Strand P. 1995. Radioactivity in the Marine Environment. *In:* Report from the National surveillance program Strallvern Rapport. Østerås, Norwegian Radiation Protection Authority: 23–24.
14. Matishov G.G., Matishov D.G., Nazimov V.V. 1994. [*Levels and main directions of radionuclide transport in the Barents and Kara seas. Map. Scale 1: 4704075*]. Rovaniemi, Murmansk Marine Biological Institute of the Kola scientific Centre of the Russian Academy of Sciences. (In Russian).
15. Miroshnikov A.Yu., Flint M.V., Asadulin E.E., Komarov V.B. 2020. Radiation-Geochemical Stability of Bottom Sediments in the Ob and Yenisei Estuaries and Adjacent Shoal Area of the Kara Sea. *Oceanology*. 60(6): 817–830. doi: 10.1134/S0001437020060065
16. Bessonov O.A., Davydov M.G., Mareskin S.A., Malaeva T.Yu., Stradomskaya E.A. 1994. [The content of radionuclides in the bottom sediments of the Tsimlyansk reservoir]. *Atomnaya energiya*. 77(1): 48–51. (In Russian).
17. Ryabinin A.I., Belyavskaya V.B., Dolotova I.S. 1992. [Technogenic radionuclides and strontium in the Sea of Azov in 1987–1988]. *Trudy gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta*. 205: 96–105. (In Russian).
18. Bufetova M.V., Gargopa Yu.M., Gromov V.V., Ilyin G.V., Kavtsevich N.N., Kreneva K.V., Larionov V.V., Lebedeva N.V., Makarevich P.R., Markitan L.V., Matishov G.G., Matishov D.G., Namyatov A.A., Savinova T.N., Fushtei T.V. *Zakonomernosti okeanograficheskikh i biologicheskikh protsessov v Azovskom more*. [*Patterns of oceanographic and biological processes in the Sea of Azov*]. Apatity, Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 434 p. (In Russian).
19. Strand P., Nikitin A., Rudjord A.L., Salbu B., Christensen G., Foin L., Kryshev I.I., Chumichev V.B., Dahlgaard H., Holm E. 1994. [Survey of artificial radionuclides in the Barents Sea and the Kara Sea]. *Journal of Environmental Radioactivity*. 25(1–2): 99–112. doi: 10.1016/0265-931X(94)90010-8

Поступила 18.02.2021


Бердянск
Бердянская коса
Набережное
Игоревка
А к к у м у л я т и в н а я
р а в н и н а
П а н о в а

ГИДРОБИОЛОГИЯ, ЭКОЛОГИЯ МОРЯ

УДК: 574.586(262.54)
DOI: 10.7868/S25000640210306

РАЗВИТИЕ *SPIROGYRA* SP. НА РЫБОЛОВНЫХ СЕТЯХ В ТАГАНРОГСКОМ ЗАЛИВЕ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОЙ СОЛЕНОСТИ [1]

© 2021 г. Академик Г.Г. Матишов[1, 2], Г.Ю. Глущенко[1], Г.В. Ковалёва[1], Е.Г. Алёшина[1], И.А. Мельников[1]

Аннотация. С начала XXI века Азово-Донской бассейн испытывает влияние процессов маловодья, что приводит к заполнению дельты Дона и прилегающей акватории Таганрогского залива Азовского моря нетипичными слабосолеными и солоноватыми водами. В результате этого происходит трансформация термохалинной, трофической и биоценотической структуры водоема, деградация ихтиофауны, коренная перестройка как в планктонных, так и в бентосных сообществах. Все чаще последствия указанных трендов имеют масштабы опасного природного явления.

Описано новое для водоема явление – обрастание рыболовных сетей нитчатыми водорослями из рода *Spirogyra* в восточной, мелководной, части Таганрогского залива. В литературе отсутствуют данные о присутствии *Spirogyra* в обрастаниях исследуемого водоема. Изучение образцов, которые были собраны в мае 2021 г., показало, что морфологические признаки фертильных нитей спирогиры соответствовали описанию *Spirogyra* cf. *decimina.* Помимо *S. decimina* на основе морфологических отличий вегетативных талломов выделены еще две морфы. Приведены результаты качественного анализа и количественной оценки макроводорослевых обрастаний рыболовных сетей, а также микрофотографии различных стадий развития исследуемых водорослей. Перечислены основные факторы среды, вызывающие массовое развитие представителей рода *Spirogyra*, и проанализированы гидрологические условия Таганрогского залива, на фоне которых происходило интенсивное развитие водорослей на сетях.

Ключевые слова: нитчатые водоросли, *Spirogyra*, обрастания рыболовных сетей, Таганрогский залив, Азовское море, осолонение.

PROLIFERATION OF *SPIROGYRA* SP. ON THE FISHING NETS IN THE TAGANROG BAY UNDER THE CONDITIONS OF HIGH SALINITY

Academician RAS G.G. Matishov[1, 2], G.Yu. Glushchenko[1], G.V. Kovaleva[1], E.G. Alyoshina[1], I.A. Melnikov[1]

Abstract. Since the beginning of the 21st century, the Sea of Azov – Don Basin has been affected by low-water processes, which lead to the filling of the Don Delta and the adjacent water area of the Taganrog Bay of the Sea of Azov with atypical slightly salty and brackish waters. As a result, there is a transformation of the thermohaline, trophic, and biocenotic structure of the reservoir, degradation of the ichthyofauna, and radical restructuring in both planktonic and benthic biotopes. The consequences of these trends more often have the scale of a dangerous natural phenomenon. This paper describes a new phenomenon for the reservoir – the fouling of fishing nets with filamentous algae from the genus *Spirogyra* in the eastern shallow part of the Taganrog Bay. In the published sources, there is no data on the presence of *Spirogyra* in the fouling of the studied reservoir. The study of samples collected in May 2021 indicated that the morphological features of spirogyra fertile filaments

[1] Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: matishov_ssc-ras@ssc-ras.ru

[2] Мурманский морской биологический институт Российской академии наук (Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17

[1] **Оригинальный текст:** *Матишов Г.Г., Глущенко Г.Ю., Ковалёва Г.В., Алёшина Е.Г., Мельников И.А.* Развитие *Spirogyra* sp. на рыболовных сетях в Таганрогском заливе в условиях повышенной солености // Наука Юга России. 2021 Т. 17. № 3. С. 47–55.

corresponded to the description of *Spirogyra* cf. *decimina*. In addition to *S. decimina*, two more morphs are distinguished based on the morphological differences of vegetative thallome. The paper presents the results of qualitative analysis and quantitative assessment of macroalgae fouling of fishing nets, as well as micrographs of various stages of development of the studied algae. The article lists the main environmental factors that cause the mass development of representatives of the genus *Spirogyra* and analyzes the hydrological conditions of the Taganrog Bay with the intensive proliferation of algae on the nets.

Keywords: filamentous algae, *Spirogyra*, fouling of fishing nets, Taganrog Bay, Sea of Azov, salinization.

ВВЕДЕНИЕ

В начале XXI века Азово-Донской бассейн стал испытывать влияние маловодья, в результате чего произошло заполнение дельты Дона и прилегающей акватории Таганрогского залива нетипичными (до 3–7 ‰) слабосолеными и солоноватыми водами [1–3]. Это стало причиной того, что в восточной части залива усилилось заиление и заболачивание водоема, произошла трансформация термохалинной, трофической и биоценотической структуры водоема [3]. На фоне этих процессов происходила деградация ихтиофауны, выражающаяся в резком сокращении численности ранее промысловых рыб и преобладании в уловах рыб-вселенцев (пиленгас, серебряный карась, амурский чебачок и др.). Коренная перестройка происходит как в планктонных, так и в бентосных сообществах [4; 5].

Последствия указанных трендов принимают масштабы опасного природного явления: в водоеме все чаще стали фиксировать «цветение» воды и присутствие видов-вселенцев. Ранее было описано явление [6], когда с июля по октябрь 2015 г. многие жители Таганрога, Азова, с. Кагальник и других населенных пунктов, расположенных на берегу Таганрогского залива, замечали, что с его акватории периодически доносился неприятный запах, напоминающий запах дуста. Мясо промысловых рыб становилось непригодным в пищу. Выделение одорантов (запах дуста) связано с появлением в кутовой части Таганрогского залива микроводорослей *Planktothrix agardhii* (Gomont) Anagn. et Kom. и *Nodularia spumigena* Mertens. В условиях аномального повышения солености вод Таганрогского залива (2–5 ‰) происходило массовое отмирание микроводорослей, и продукты разложения их биомассы могли выделять в окружающую среду разнообразные органические соединения, в том числе и одоранты [6].

В середине марта 2021 г. во время ежедневного контроля орудий рыболовного промысла было зафиксировано новое для Азовского моря явление – в кутовой части Таганрогского залива было отмечено обильное обрастание сетей нитчатой водорослью из рода *Spirogyra*. В проведенных ранее исследованиях обрастаний природных и антропогенных субстратов в Азовском море [7–10] сведений о присутствии спирогиры в перифитоне нет.

Массовое развитие спирогиры оказывает негативное влияние на рыболовство. Когда этой водорослью полностью зарастают рыболовные сети и вентеря, снижается эффективность промысла, ее избыток может вызывать заморы [11] и усиление эвтрофикации прибрежной зоны. Распространение в прибрежье нитчатых водорослей давно стало бедствием для Восточного Каспия [11; 12], озера Байкал [13], Финского залива Балтийского моря [14] и даже получило собственное название «зеленые приливы».

Цель работы – дать краткую характеристику новому явлению, отмеченному в восточной, мелководной, части Таганрогского залива, задачи – описать гидрологические условия среды, при которых было выявлено массовое развитие представителей рода *Spirogyra* в обрастаниях сетей, а также дать количественную оценку развития этих водорослей.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом для качественного анализа послужили образцы, отобранные 2, 6 и 21 мая 2021 г. с полиамидных рыболовных сетей в восточной, мелководной, части Таганрогского залива Азовского моря (47°02.346′ с.ш., 39°15.197′ в.д. – район с. Круглое, Ростовская область) (рис. 1).

Для количественной оценки обрастаний 21 мая 2021 г. были взяты пробы в виде вырезанных фрагментов (25 × 25 см, с общей площадью поверхности, равной 2,88 м^2) рыболовной сети, находившейся в водоеме 3,5 суток. Фрагменты сети подсушивали на воздухе, маркировали и транспортировали в лабораторию. В камеральных условиях с сетей счищали растительные обрастания, досушивали до постоянного веса в сушильном шкафу при температуре 105 °C и взвешивали с точностью до 0,01 мг [15]. Параллельно были отобраны образцы для расчета переводного коэффициента сырого веса водорослей по разнице веса до и после сушки.

Изучение образцов обрастаний проводили с использованием световых микроскопов «Микмед-5» и «Leica DME». Измерение размеров клеток и микрофотографии изготавливали с помощью цифровой камеры «Leica EC3». Во время отбора количественных образцов были взяты пробы на ионный состав воды и произведены измерения электропроводности, в дальнейшем переведенной в соленость, и температуры воды зондом CTD-60. Для описания гидрологической обстановки в водоеме в марте – мае 2021 г. были использованы непрерывные ряды данных температуры и электропроводности воды с гидрометеопостов Южного научного центра Российской академии наук (ЮНЦ РАН) в с. Кагальник и х. Донской (Азовский район, Ростовская область). Данные, получаемые по каналам спутниковой и сотовой связи каждые 10 минут, передаются на сервер с последующим представлением на сайте http://meteo.ssc-ras.ru.

Рис. 1. Карта-схема места отбора проб в восточном районе Таганрогского залива (станция 1) и дельте р. Дон (станция 2).
Fig. 1. Map with the sampling site in the Eastern Taganrog Bay (Station 1) and the Don River delta (Station 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В конце марта 2021 г. в восточной, мелководной, части Таганрогского залива на рыболовных сетях стали наблюдать массовое развитие нитчатых водорослей зеленого цвета. Их присутствие продолжалось до конца мая 2021 г. Исследование образцов с использованием светового микроскопа показало, что обрастания сформированы водорослями из рода *Spirogyra*. В результате количественного анализа выявили, что биомасса спирогиры (из образца, отобранного 21 мая 2021 г.) достигала 7,8 г/м^2. Учитывая, что в этот период развитие *Spirogyra* уже шло на спад, можно предположить, что на пике вегетации биомасса спирогиры была значительно выше. По визуальным оценкам ихтиологов, максимальная концентрация нитчатых водорослей на сетном полотне формировалась в конце апреля – начале мая. Наибольшую их плотность (биомассу) на сетях отмечали при ветрах восточных румбов и снижении уровня воды до 1 м.

По данным стационарных наблюдений на гидрометеопостах ЮНЦ РАН в кутовой части залива, весной 2021 г. соленость воды изменялась от 0,9 ‰ (пресная) до 2,5–3,5 ‰ (слабосоленая), периодически отмечалась даже солоноватая (до 4–7 ‰). Повышенный фон солености в заливе сочетался с прохладной погодой, относительно невысокой для весны температурой воды (как на поверхности, так и у дна). Во время отбора образцов общая минерализация в районе установки сетей составляла: в кутовой части залива (станция 1) – 1,6 г/л, в дельте р. Дон (станция 2) – 1,3 г/л (табл. 1).

На затянувшийся весенний прогрев взморья в 2021 г. (в сравнении с данными, зафиксированными на гидрометеопостах ЮНЦ РАН в предыдущие годы) указывает температурный ряд: от 10–13 °C во второй половине апреля до 14–18 °C в конце месяца. К концу мая по мере прогрева водных масс на акватории от Павлоочаковской косы до края дельты (от 22–24 °C на поверхности до 19–20 °C у дна) нитчатые водоросли стали исчезать.

Точная идентификации представителей рода *Spirogyra* до вида затруднена в связи с тем, что в природном материале не всегда удается наблюдать половой процесс, а именно его особенности признаны надежными систематическими признаками. У образцов, отобранных 2 и 6 мая 2021 г., фертильных стадий обнаружено не было. В пробах, собранных 21 мая, удалось обнаружить несколько талломов на разной стадии конъюгации и образование зигоспор (рис. 2).

По морфологическим признакам вегетативных клеток, лестничному типу конъюгации и эллипсоидным зигоспорам (табл. 2, рис. 2*а–г*) основной вид обрастаний соответствует описанию *Spirogyra* cf. *decimina* (Müll.) Kütz [12; 16]. У некоторых нитей *Spirogyra* cf. *decimina* были отмечены талломы с бóльшими размерами вегетативных клеток и бóльшим количеством оборотов спирали хроматофоров (табл. 2). Среди сопутствующих талломов, отлича-

Таблица 1. Ионный состав воды, отобранной 17 и 21 мая 2021 г. в кутовой части Таганрогского залива (станция 1) и в дельте р. Дон (станция 2)
Table 1. Ionic composition of water collected on the 17th and 21st of May 2021 in the Taganrog Bay (Station 1) and in the Don River delta (Station 2)

Химические элементы Chemical elements	Станция 1 Station 1 17.05.2021	Станция 1 Station 1 21.05.2021	Станция 2 Station 2 21.05.2021
Cl^-, ммоль/л / mmol/L	9,4	7,8	5,2
Cl^-, мг/л / mg/L	333,2	276,5	184,3
HCO_3^-, ммоль/л / mmol/L	4,0	4,8	3,9
HCO_3^-, мг/л / mg/L	241,6	295,3	236,8
SO_4^{2-}, ммоль/л / mmol/L	10,0	10,0	9,6
SO_4^{2-}, мг/л / mg/L	480,3	480,3	461,1
Жесткость, ммоль/л / Hardness, mmol/L	9,2	9,0	8,4
Ca^{2+}, ммоль/л / mmol/L	4,4	4,6	4,4
Ca^{2+}, мг/л / mg/L	88,2	92,2	88,2
Mg^{2+}, ммоль/л / mmol/L	4,8	4,4	4,0
Mg^{2+}, мг/л / mg/L	58,4	53,5	48,6
$Na^+ + K^+$, ммоль/л / mmol/L	14,2	13,6	10,3
$Na^+ + K^+$, мг/л / mg/L	354,0	341,0	257,0
Общая минерализация, г/л / Total ionic concenrtation, g/L	1,6	1,6	1,3

ющихся размерами клеток и типом клеточных перегородок, были выделены еще 2 морфы (или вида) *Spirogyra* (табл. 2, рис. 2*д–и*).

У одной морфы, со складчатой клеточной перегородкой (морфа 1), была зафиксирована лестничная конъюгация (рис. 2*е–ж*), но зигоспоры обнаружены не были, что не позволяет точно определить ее видовую принадлежность. Талломы с аналогичной складчатой клеточной перегородкой, но меньшей толщиной вегетативных клеток были отнесены нами к морфе 2 (рис. 2*з–и*).

ОБСУЖДЕНИЕ

Представители рода *Spirogyra* Link, 1820 – нитчатые макроскопические водоросли, широко распространенные преимущественно в пресных водах, но встречаются и в прибрежных участках морей с низкой соленостью [16]. Несмотря на то, что *Spirogyra* является одним из самых распространенных таксонов макроводорослей, населяющих все континенты, данные об экологических свойствах и особенностях биологии этих водорослей считаются довольно слабо изученными. Это обусловлено трудностями, связанными с видовой идентификацией, требующей наличия у образцов фертильных стадий (форма, цвет, орнамент зигоспор и тип конъюгации нитей) [14; 16], которые в природных условиях встречаются довольно редко [14; 17]. Морфология вегетативных нитей (строение клеточных стенок, ширина клеток и число хлоропластов) не является надежным систематическим видовым признаком, поскольку клетки с разными морфологическими признаками могут принадлежать одному и тому же виду и происходить из одной и той же нити вследствие полиплоидии [14]. Очень часто при идентификации по морфологическим признакам вегетативных клеток в одной пробе может насчитываться до 15 разных видов *Spirogyra*, которые на самом деле являются формами (морфами) одного и того же вида. Кроме того, в популяциях *Spirogyra* под воздействием внешних факторов весьма часто возникают различные мутации [14; 18], что позволяет идентифицировать спирогиру только до уровня рода.

В нашем исследовании удалось обнаружить надежные диагностические признаки только у одного вида – *Spirogyra* cf. *decimina*, который, как известно по литературным данным [12; 16], является галофильным, широко распространенным, эврибионтным, полиморфным видом и обитает в стоячих и текучих водах. Обнаруженные две другие морфы *Spirogyra* также выдерживают колебания солености, отмеченные в заливе.

Что касается температурных предпочтений, представители рода *Spirogyra* вегетируют при температуре от 2 до 35 °C, но лучше всего растут при температуре от 15 до 25 °C [14]. Массовое развитие макроводорослей обычно начинается весной, вскоре после таяния льда, и резко прекращается

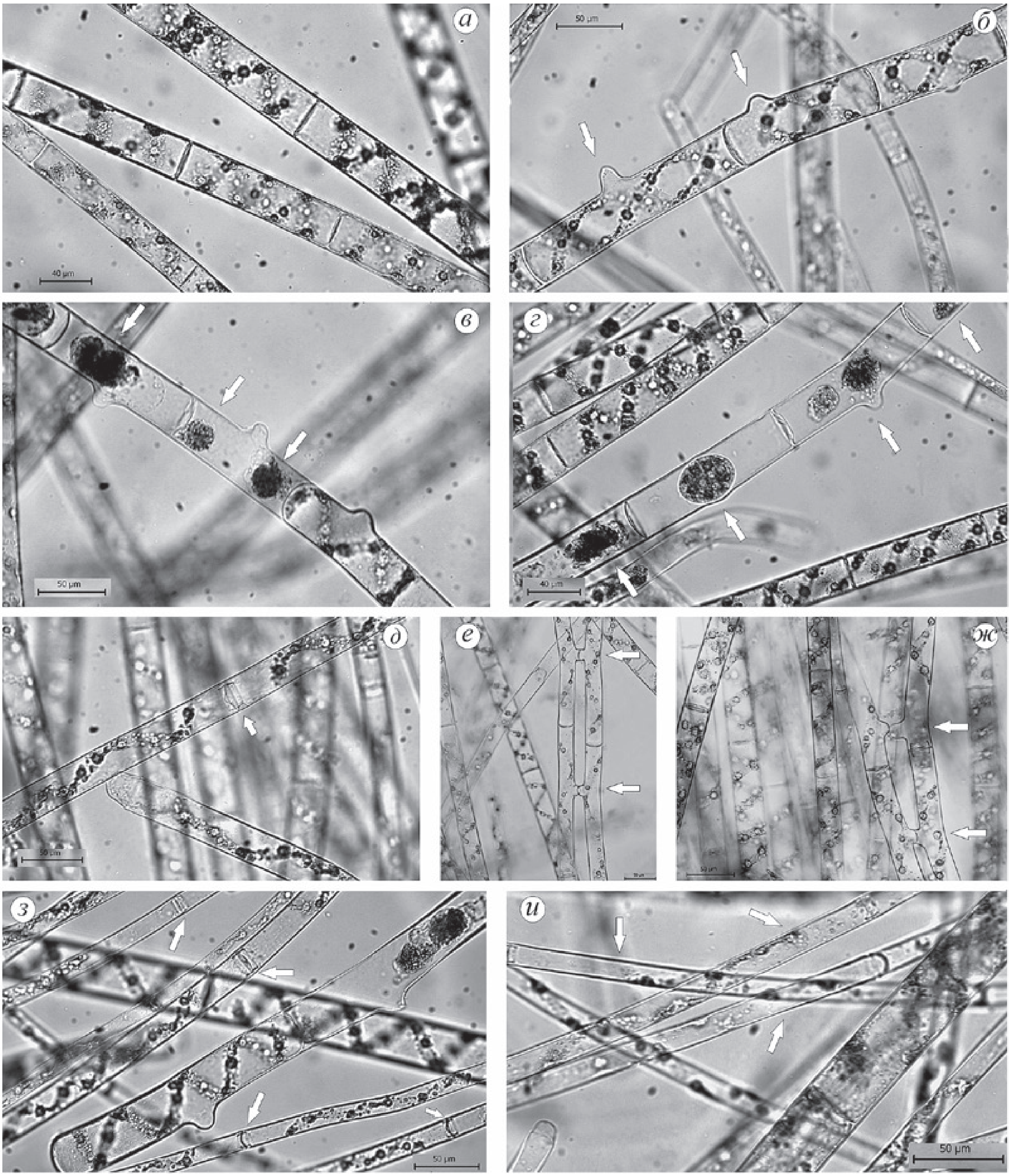


Рис. 2. Талломы *Spirogyra* с разными стадиями конъюгации из образца, отобранного 21.05.2021 г.: *а–г* – *Spirogyra* cf. *decimina*: *а* – вегетативный таллом, *б* – начало конъюгации, *в* – начало формирования зигоспор, *г* – финальная стадия формирования зигоспор; *д–ж* – морфа 1: *д* – вегетативные клетки со складчатой перегородкой, *е–ж* – лестничная конъюгация; *з–и* – морфа 2.

Fig. 2. Thallome of *Spirogyra* with different conjugation stages from the sample collected on the 21st of May 2021: *а–г* – *Spirogyra* cf. *decimina*: *а* – vegetative thallomes, *б* – beginning of conjugation, *в* – beginning of zygospore formation, *г* – final stage of zygospore

Таблица 2. Морфометрические данные талломов *Spirogyra* из образца, отобранного 21.05.2021 г.
Table 2. Morphometric data of *Spirogyra* thallomes from the sample collected on the 21st of May 2021

Таксономические признаки Taxonomical features	Таксон Taxon			
	Spirogyra cf. *decimina*	*Spirogyra* cf. *decimina**	Морфа 1 Morph 1	Морфа 2 Morph 2
Ширина клеток (мин./макс.), мкм Cell width (min / max), µm	25,5–38,9	29,5–45,8	15,1–27,5	9,8–15,3
Длина клеток (мин./макс.), мкм Cell length (min / max), µm	61–183	152–275	191–566	98–590
Характер клеточной перегородки Cell septum type	гладкие smooth	гладкие smooth	складчатые folded	складчатые folded
Количество оборотов спирали хлоропласта Number of turns of the chloroplast spiral	до 4 up to 4	до 8 up to 8	до 9 up to 9	до 6–8 up to 6–8
Ширина зигоспоры, мкм Zygospore width, µm	31,1–31,3	–	–	–
Длина зигоспоры, мкм Zygospore length, µm	43,4–51,1	–	–	–

Примечание. * – размеры превышают значения, указанные в диагнозе.
Note. * – dimensions that exceed the values specified in the diagnosis.

после достижения пика в начале или середине лета. Многие авторы отмечают, что одними из основных факторов, вызывающих прекращение роста *Spirogyra*, являются слишком высокая температура воды (выше 25 °C) и исчерпание запасов элементов минерального питания. В то же время при выращивании *Spirogyra* spp. в культуре оптимальная температура для фотосинтеза составила 35 °C, но максимальный чистый фотосинтез *Spirogyra* spp. наблюдали все же при температуре 25 °C и световом потоке 1500 мкмоль м$^{-2}$ · с$^{-1}$ [14]. Сложно однозначно утверждать, что прогревание воды выше 25 °C критично для вегетации спирогиры, но, по нашим наблюдениям, прекращение роста макроводорослей в Таганрогском заливе произошло при прогреве воды до 24 °C.

Многие авторы указывают (цит. по [14]), что *Spirogyra* не переносит высокой скорости перемешивания воды и развивается на относительно закрытых от ветра участках озер и рек или в прибрежных участках морей с низкой волновой активностью, на глубинах ниже зоны сильного воздействия волн. Поскольку макроводоросли имеют существенно меньшие удельные скорости роста и потребления элементов минерального питания по сравнению с фитопланктоном, то в условиях активного волнового перемешивания они уступают В то же время умеренное перемешивание необходимо для обеспечения спирогиры элементами минерального питания и удаления отмерших клеток. Особенности кутовой части Таганрогского залива в условиях снижения стока р. Дон приводят к кардинальному перестроению термохалинной структуры залива и уменьшению «турбулентного» и «смешанного» типов стратификации его вод [2]. Вероятно, именно эти факторы были благоприятными для развития представителей *Spirogyra* в Таганрогском заливе.

Еще одним фактором, вызывающим бурное развитие *Spirogyra* spp., многие исследователи считают эвтрофирование [14]. Несмотря на то, что рост этих водорослей лимитирован фосфором, большинство авторов полагает, что бурный рост *Spirogyra* стимулируется потоками азота антропогенного происхождения, поступающими через донные отложения и сточные воды. Существенными антропогенными источниками поступления азота как непосредственно в прибрежные воды морей, так и на водосборную территорию впадающих в море рек являются удобряемые сельхозугодья, молочные фермы, животноводческие комплексы, верфи и рекреационная деятельность (туризм) [14]. Считается, что развитие популяции спирогиры стимулируется непрерывным поступлением небольшого количества микроводорослей, чье массовое развитие провоцируется залповым вбросом высоких концентраций. Кроме того, виды рода *Spirogyra* способны запасать азот, что обеспечивает их большую биомассу даже при снижении концентрации этого микроэлемента [14]. Азовское море (и особенно Таганрогский залив) является высокопродуктивным водоемом, характеризующимся повышенным содержанием органического вещества и биогенных элементов [19], и в настоящее время данный статус сохраняется [20]. Этот фактор также мог способствовать интенсивному развитию спирогиры.

В качестве еще одного из важных условий появления «зеленых приливов» является наличие в достаточном количестве «семенного материала» – зигоспор. В пересыхающих водоемах, в которых *Spirogyra* spp. начинают бурно размножаться после заполнения водоемов водой, восстановление популяции происходит именно из зигоспор, поскольку вегетативные нити этих водорослей не переносят даже получасового высыхания и ультрафиолетового облучения [14]. Из этого можно сделать неутешительный вывод о том, что, появившись в водоеме единожды, массовые обрастания *Spirogyra* могут стать регулярным явлением. Учитывая, что нами зафиксировано образование зигоспор, вероятность того, что из перезимовавших зигоспор сформируется новая популяция спирогиры, очень велика.

Что касается пищевой ценности спирогиры, то существуют противоречивые данные. Некоторые авторы констатируют, что виды рода *Spirogyra* практические не употребляются в пищу животными-альгофагами, другие, напротив, приводят данные о ее поедании брюхоногими моллюсками и рыбами [14].

Причины возникновения и прекращения массового развития водорослей *Spirogyra* spp. в Таганрогском заливе пока малопонятны и труднообъяснимы, а спрогнозировать, повторится ли это явление в будущем, и если повторится – что может стать причиной, в настоящее время не представляется возможным. Вполне вероятно, что длительное маловодье р. Дон, приведшее к увеличению минерализации вод залива и смещению границы раздела пресных и морских вод [1], могло способствовать освобождению какой-либо из экологических ниш в водном сообществе и стремительному размножению *Spirogyra*. Еще одним фактором, стимулирующим массовое развитие спирогиры, могли стать частые сгонно-нагонные явления, которые приводят к взмучиванию донных отложений и дополнительному обогащению водной толщи органическими веществами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые для Таганрогского залива приведены сведения о развитии представителей рода *Spirogyra*, описаны гидролого-гидрохимические условия среды, при которых оно было отмечено. Таким образом, дополнены сведения об экологии, географии и биологии данного рода, не зарегистрированного до этого во флоре перифитона Азовского моря.

В ходе исследования были проанализированы образцы макроводорослевых обрастаний, морфологические признаки которых соответствовали описаниям *S. decimina* [12; 16], и отмечены еще две морфы, идентифицируемые только по морфологическим признакам. Видовая идентификация *S. decimina* была проведена на основе морфологии фертильных стадий. Во время работы были получены микрофотографии разных стадий развития *S. decimina* и двух морф. Исследование показало, что развитие спирогиры пришлось на весенние месяцы. Его начало было отмечено в марте, при температуре воды от 10–13 до 14–18 °C, и закончилось в конце мая, при прогреве водных масс до 22–24 °C.

В дальнейшем предстоит провести более подробные исследования причин появления спирогиры в Таганрогском заливе, чтобы ответить на вопросы: каково место этой водоросли в биогеоценозе залива, закрепится ли она в сообществе и как будет проходить ее адаптация к внешним факторам среды.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам научно-экспедиционной базы «Кагальник» ЮНЦ РАН (Азовский район Ростовской области) за помощь в отборе материала, с.н.с. Института океанологии РАН им. П.П. Ширшова Ф.В. Сапожникову за оказанную консультацию и ценные рекомендации, а также сотрудникам лаборатории гидрологии и гидрохимии ЮНЦ РАН А.Ю. Московцу и К.С. Григоренко за любезно предоставленные данные по абиотическим параметрам водоема. Работа выполнена в рамках реализации ГЗ НИР ЮНЦ РАН № АААА-А18-118122790121-5, проектов РФФИ № 18-05-80010 (Г.В. Ковалёва) и № 18-29-05078 мк, проекта РГО № 07/2020-И от 11.05.2020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матишов Г.Г., Григоренко К.С. 2017. Причины осолонения Таганрогского залива. *Доклады академии наук.* 477(1): 92–96. doi: 10.7868/S086956521731019X
2. Матишов Г.Г., Григоренко К.С. 2020. Динамический режим Азовского моря в условиях осолонения. *Доклады академии наук.* 492(1): 107–112. doi: 10.31857/S268673972005014X
3. Матишов Г.Г., Дашкевич Л.В., Титов В.В., Кириллова Е.Э. 2021. Анализ внутривековой природной изменчивости в Приазовье и на Нижнем Дону: причина маловодья. *Наука Юга России.* 17(1): 13–23. doi: 10.7868/S25000640210102
4. Матишов Г.Г., Степаньян О.В. 2018. Научно-исследовательское судно «Денеб»: 10 лет морских научных исследований. *Морской гидрофизический журнал.* 34(6): 548–555. doi: 10.22449/0233-7584-2018-6-548-555
5. Ковалёва Г.В. 2020. Проблема «цветения» воды в Азовском море. В кн.: *Труды Южного научного центра Российской академии наук. Т. VIII: Моделирование и анализ опасных природных явлений в Азовском регионе.* Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 122–148. doi: 10.23885/1993-6621-2020-8-122-148
6. Матишов Г.Г., Ковалева Г.В., Ясакова О.Н. 2016. Аномальное осолонение в Таганрогском эстуарии и дельте Дона. *Наука Юга России.* 12(1): 43–50.
7. Борисюк М.В. 2002. Видовой состав фитоперифитона Таганрогского залива Азовского моря. *Альгология.* 12(4): 408–420.
8. Ковалёва Г.В. 2000. Видовой состав и сезонная динамика перифитонных микроводорослей в опресненной зоне Таганрогского залива. В кн.*: Закономерности океанографических и биологических процессов в Азовском море.* Апатиты, изд-во КНЦ РАН: 219–227.
9. Липницкая Г.П., Третяк Е.Л. 1999. К изучению микрофитоперифитона шельфа Азовского моря. *Альгология.* 9(2): 74–75.
10. Парталы Е.М. 2001. Горизонтальная структура биоценоза морского обрастания Таганрогского залива Азовского моря. *Океанология.* 41(5): 751–754.
11. Абдусамадов А.С., Абдурахманов Г.М., Дохтукаева А.М., Дудурханова Л.А. 2011. Гидробиологическая характеристика основных рыбохозяйственных водоемов Западно-Каспийского региона (фитопланктон). *Юг России: экология, развитие.* 6(3): 37–49.
12. Прошкина-Лавренко А.И., Макарова И.В. 1968. *Водоросли планктона Каспийского моря.* Л., Наука: 295 с.
13. Тимошкин О.А., Бондаренко Н.А., Волкова Е.А., Томберг И.В., Вишняков В.С., Мальник В.В. 2014. Массовое развитие зеленых нитчатых водорослей родов *Spirogyra* и *Stigeoclonium* (Chlorophyta) в прибрежной зоне Южного Байкала. *Гидробиологический журнал.* 50(5): 15–26.
14. Gladyshev M.I., Gubelit Y.I. 2019. green tides: new consequences of the eutrophication of natural waters (invited review). *Contemporary Problems of Ecology.* 12(2): 109–125. doi: 10.1134/S1995425519020057
15. Соловьева В.В., Лапиров А.Г. 2013. *Гидроботаника: учебник для высших учебных заведений.* Самара, ПГСГА: 354 с.
16. Рундина Л.А. 1998. Зигнемовые водоросли России (Chlorophyta: Zygnematophyceae, Zygnematales). СПб., Наука: 351 с.
17. Волкова Е.А. 2018. Жизненный цикл *Spirogyra decimina* var. *juergensii* (Kütz.) O.V. Petlovany из озера Байкал. *Вопросы современной альгологии.* 1(16): 1–7. doi: 10.33624/2311-0147-2018-1(16)-1-7
18. Hainz R., Wober C., Schagerl M. 2009. The relationship between *Spirogyra* (Zygnematophyceae, Streptophyta) filament type groups and environmental conditions in Central Europe. *Aquatic Botany.* 91(3): 173–180. doi: 10.1016/j.aquabot.2009.05.004
19. *Азовское море в конце XX – начале XXI веков: геоморфология, осадконакопление, пелагические сообщества. Т. X.* 2008. Апатиты, КНЦ РАН: 295 с.
20. Сорокина В.В., Бердников С.В. 2018. Биогенная нагрузка Дона и Кубани на экосистему Азовского моря. *Водные ресурсы.* 45(6): 670–684. doi: 10.1134/S0321059618060147

REFERENCES

1. Matishov G.G., Grigorenko K.S. 2017. Causes of salinization of the Gulf of Taganrog. *Doklady Earth Sciences.* 477(1): 1311–1315. doi: 10.1134/S1028334X17110034
2. Matishov G.G., Grigorenko K.S. 2020. Dynamic mode of the Azov Sea in conditions of salinization. *Doklady Earth Sciences.* 492(1): 376–381. doi: 10.1134/S1028334X20050141
3. Matishov G.G., Dashkevich L.V., Titov V.V., Kirillova E.E. 2021. [Analysis of intracentury environmental variability in the Sea of Azov and Lower Don regions: the cause of low water period]. *Nauka Yuga Rossii.* 17(1): 13–23. (In Russian). doi: 10.7868/S25000640210102
4. Matishov G.G., Stepanyan O.V. 2018. Research vessel Deneb: 10 years of marine scientific research. *Physical Oceanography.* 25(6): 501–508. doi: 10.22449/1573-160X-2018-6-501-508
5. Kovaleva G.V. 2020. [The problem of "blooming" water in the Sea of Azov]. In: *Trudy Yuzhnogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. Tom VIII: Modelirovanie i analiz opasnykh prirodnykh yavleniy v Azovskom regione.* [*Proceedings of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences. Vol. VIII: Modeling and analysis of natural hazards in the Azov region*]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 122–148. (In Russian). doi: 10.23885/1993-6621-2020-8-122-148
6. Matishov G.G., Kovaleva G.V., Yasakova O.N. 2016. [Anomalous high salinity in the Taganrog Bay estuary and the Don delta]. *Nauka Yuga Rossii*. 12(1): 43–50. (In Russian).
7. Borisyuk M.V. 2002. [Species composition of the phytoperiphyton of the Taganrog Bay of the Sea of Azov]. *Al'gologiya.* 12(4): 408–420. (In Russian).
8. Kovaleva G.V. 2000. [Species composition and seasonal dynamics of periphyton microalgae in the desalinated zone of the Taganrog Bay]. In: *Zakonomernosti okeanograficheskikh i biologicheskikh protsessov v Azovskom more.* [*Regularities of oceanographic and biological processes in the Sea of Azov*] Apatity, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences: 219–227. (In Russian).
9. Lipnitskaya G.P., Tretyak E.L. 1999. [To study the microphytoperiphyton of the shelf of the Sea of Azov]. *Al'gologiya*. 9(2): 74–75. (In Russian).
10. Partaly E.M. 2001. Horizontal structure of the biocenosis of marine fouling in Taganrog bay, Sea of Azov. *Oceanology.* 41(5): 718–722.

11. AbdusamadovA.S.,AbdurakhmanovG.M.,DokhtukayevaA.M., Dudurkhanova L.A. 2011. [Hydrobiological characteristics of the main fishery reservoirs of the West Caspian region (phytoplankton)]. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie*. 6(3): 37–49. (In Russian).

12. Proshkina-Lavrenko A.I., Makarova I.V. 1968. *Vodorosli planktona Kaspiyskogo morya*. [*Algae of the Caspian Sea plankton*]. Leningrad, Nauka: 295 p. (In Russian).

13. Timoshkin O.A., Bondarenko N.A., Volkova Ye.A., Tomberg I.V., Vishnyakov V.S., Malnik V.V. 2015. Mass development of green filamentous algae of the genera *Spirogyra* and *Stigeoclonium* (Chloropltyta) in the littoral zone of the southern part of Lake Baikal. *Hydroblological Journal*. 51(1): 13–23. doi: 10.1615/HydrobJ.v51.i1.20

14. Gladyshev M.I., Gubelit Y.I. 2019. green tides: new consequences of the eutrophication of natural waters (invited review). *Contemporary Problems of Ecology*. 12(2): 109–125. doi: 10.1134/S1995425519020057

15. Solov'eva V.V., Lapirov A.G. 2013. *Gidrobotanika: uchebnik dlya vysshikh uchebnykh zavedeniy.* [*Hydrobotany: textbook for higher educational institutions*]. Samara, Volga State Social and Humanitarian Academy: 354 p. (In Russian).

16. Rundina L.A. 1998. *Zignemovye vodorosli Rossii (Chlorophyta: Zygnematophyceae, Zygnematales)*. [*Zygnema algae of Russia (Chlorophyta: Zygnematophyceae, Zygnematales)*]. St Petersburg, Nauka: 351 p. (In Russian).

17. Volkova E.A. 2018. [Life cycle of *Spirogyra decimina* var. *juergensii* (Kütz.) O.V. Petlovany from Lake Baikal]. *Voprosy sovremennoy al'gologii*. 1(16): 1–7. (In Russian). doi: 10.33624/2311-0147-2018-1(16)-1-7

18. Hainz R., Wober C., Schagerl M. 2009. The relationship between *Spirogyra* (Zygnematophyceae, Streptophyta) filament type groups and environmental conditions in Central Europe. *Aquatic Botany*. 91(3): 173–180. doi: 10.1016/j.aquabot.2009.05.004

19. *Azovskoe more v kontse XX – nachale XXI vekov: geomorfologiya, osadkonakoplenie, pelagicheskie soobshchestva. T. X.* [*The Sea of Azov at the end of the 20th – beginning of the 21st centuries: geomorphology, sedimentation, pelagic communities. Vol. X*]. 2008. Apatity, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences: 295 p. (In Russian).

20. Sorokina V.V., Berdnikov S.V. 2018. Nutrient loading of the Don and Kuban on the ecosystem of the Sea of Azov. *Water Resources*. 45(6): 920–934. doi: 10.1134/S0097807818060143

Поступила 07.06.2021

УДК 581.526.325:581.54(262.54)

СОСТАВ И СЕЗОННАЯ СУКЦЕССИЯ ФИТОПЛАНКТОНА ТАГАНРОГСКОГО ЗАЛИВА АЗОВСКОГО МОРЯ И НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ р. ДОН В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА[1]

© 2020 г. Л. Г. Корнева[a, *], Г. Ю. Глущенко[b, **]

[a]Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, пос. Борок, Некоузский р-н, Ярославская обл., Россия

[b]Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия

*e-mail: korneva@ibiw.yaroslavl.ru

**e-mail: gluschenko_gala@mail.ru

Поступила в редакцию 20.07.2018 г.
После доработки 21.01.2019 г.
Принята к публикации 06.02.2019 г.

В январе–ноябре 2017 г. исследован фитопланктон Таганрогского залива Азовского моря и нижнего течения р. Дон. Идентифицировано 210 видов эукариотических водорослей и цианопрокариот. Анализ таксономического и эколого-географического состава, сезонной динамики биомассы и размерной структуры фитопланктона показал, что соотношение крупных таксономических и эколого-географических групп в альгофлоре не изменилось по сравнению с предыдущими годами исследования 1980-е–начало 2000-х гг. В условиях современной аридизации климата в составе альгоценозов увеличилась пропорция миксотрофных фитофлагеллят и цианопрокариот из “планктотрихетового” комплекса и доля мелкоразмерных видов. Основной фактор, влияющий на формирование видового богатства, общей биомассы и структуры фитопланктона – соленость воды. Максимальное разнообразие и биомасса фитопланктона прослеживались в зоне хорогалиникума.

Ключевые слова: фитопланктон, сезонная сукцессия, размерная структура, факторы среды, соленость, климат, Таганрогский залив Азовского моря, Нижний Дон

DOI: 10.31857/S032096522001009X

ВВЕДЕНИЕ

Изучение закономерностей формирования структуры и разнообразия водных сообществ под влиянием климатических изменений – фундаментальная научная проблема. Для ее решения необходимо иметь представление о закономерностях трансформации и особенностях структуры фитопланктона, реагирующего на действие природных и антропогенных факторов изменением видового разнообразия, соотношения таксонов и количественных показателей, а также замещением одной размерной группы водорослей на другую. Изучение фитопланктона Таганрогского залива Азовского моря ведется с конца XIX в., однако, до сих пор полноценных современных таксономических данных с критическим анализом видового состава альгоценозов крайне мало (Ковалева, 2016). Единичные работы посвящены планктонным водорослям нижнего течения р. Дон (Лужняк, 2017) – акватории, для которой характерны явления сгонов и нагонов воды, зависящие от силы и преобладающего направления ветра. В последние годы термохалинный режим устьевого взморья Таганрогского залива и дельты р. Дон претерпевает аномальные трансформации. В связи с воздействием природного и антропогенного факторов и, следовательно, с маловодьем граница раздела пресных и морских вод в заливе находится максимально близко к устью реки. В результате сгонов воды аномального масштаба и происходящего в последние годы осолонения Азовского моря в авандельте р. Дон периодически отмечают появление солоноватых вод с соленостью 4–8‰. Это мало изученное явление возникает из-за снижения объема вод, поступающих в Азовское море из р. Дон, и замещения их морскими водами Черного моря. В результате формируются новые, ранее не наблюдавшиеся типы стратификации водных масс в дельте реки (Григоренко и др., 2016; Матишов и др., 2017). В связи с этим важно понять, как процессы, происходящие на общем фоне аридизации климата, влияют на структуру автотрофного планктона.

[1] **Оригинальный текст:** *Корнева Л.Г., Глущенко Г.Ю.* Состав и сезонная сукцессия фитопланктона Таганрогского залива Азовского моря и нижнего течения р. Дон в условиях изменяющегося климата // Биология внутренних вод. 2020. № 1. С. 18–26.

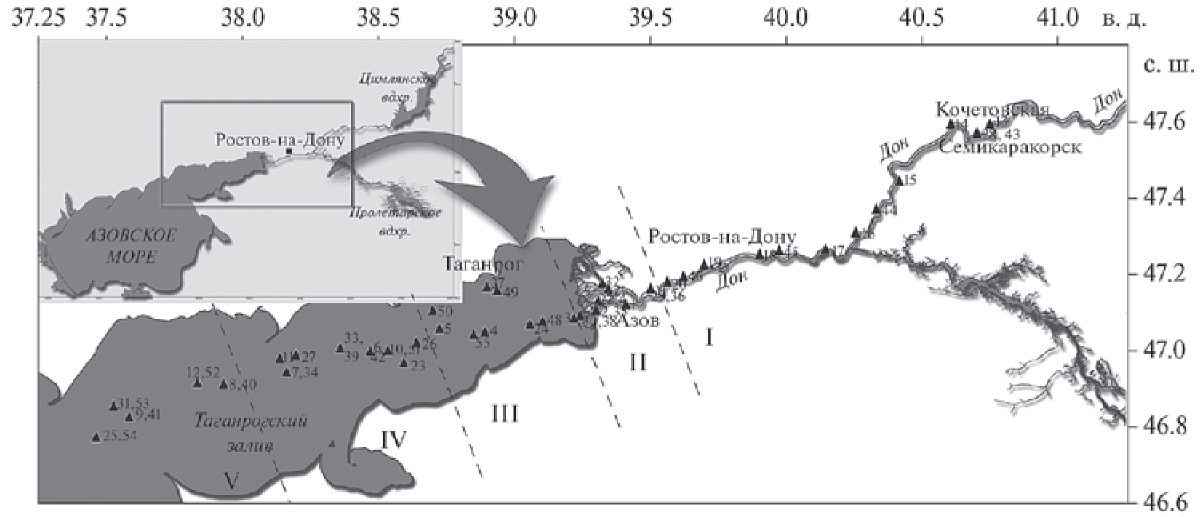


Рис. 1. Карта-схема района исследования: 1–55 – номера станций; пунктир – границы районов: I – нижнее течение р. Дон (от г. Азов до станицы Кочетовская), II – авандельта–дельта р. Дон, III – восточный, IV – центральный, V – западный районы Таганрогского залива.

Цель работы – изучить таксономический, размерный, эколого-географический состав и сезонную динамику альгофлоры планктона Таганрогского залива Азовского моря и Нижнего Дона, проанализировать влияние абиотических факторов на формирование пространственной и сезонной изменчивости фитопланктона; сравнить современные данные с полученными в предшествующие периоды наблюдений.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материал собран на 42 станциях Таганрогского залива и нижнего течения р. Дон в январе и апреле–ноябре 2017 г. В нижнем течении р. Дон (Нижний Дон) рассматривали участок от г. Азов до станицы Кочетовская (район I) и авандельту–дельту реки (район II). В пределах Таганрогского залива, согласно схеме районирования по гидродинамическим характеристикам и солености вод, выделяли восточный район (III), находящийся под влиянием пресного стока р. Дон; центральный (IV), где смешиваются опресненные водные массы и воды залива; западный (V), на который воздействуют осолоненные азовоморские воды (Матишов и др., 2007; Студеникина и др., 2005) (рис. 1).

Пробы фитопланктона отбирали с поверхностного горизонта 0.5 м. Численность водорослей определяли для разных размерных групп: ультрапланктона, который подразделяли на пико- (размеры клеток 0.2–2 мкм) и нанопланктон (2–20 мкм), и для микропланктона с размером клеток ≥20 мкм.

Учет ультрапланктона проводили методом прямого счета с использованием эпифлуоресцентной микроскопии (Гусельникова и др., 2007; Bellinger, Sigee, 2010). Пробы объемом 10 мл фиксировали 25%-ным раствором глютарового альдегида до конечной концентрации 1% (Заика и др., 1989). В лабораторных условиях 1–2 мл пробы, окрашенной флуорохромом акридином оранжевым, профильтровывали через мембранные ядерные фильтры (диаметр пор 0.2 мкм), которые предварительно окрашивали спиртовым раствором судана черного (Гусельникова и др., 2007). В люминесцентном микроскопе Микмед-2-Вар-11 при увеличении ×1500 просматривали от 5 до 100% площади фильтра.

Для анализа микропланктона пробы воды объемом 1–1.5 л фиксировали раствором Люголя, отстаивали в течение 10–14 сут и декантировали до ~100 мл. Учет численности проводили в камере Нажотта объемом 0.01 мл с использованием световых микроскопов МББ-1А и Микмед-5 при увеличении ×400. Для ее репрезентативной оценки в камере просчитывали до 400–500 особей отдельных видов водорослей, представленных как отдельными клетками, так и ценобиями, нитями и колониями (Методика..., 1975). Биомассу оценивали счетно-массовым методом, исходя из численности и объема клеток, определенного по формулам геометрического подобия (Брянцева и др., 2005). К доминирующим относили виды, достигающие ≥10% суммарной биомассы фитопланктона. Идентификацию диатомовых водорослей проводили в постоянных препаратах с применением световой микроскопии.

Для определения таксономической принадлежности водорослей использовали определители и сводки (Вассер и др., 1989; Голлербах и др., 1953; Забелина и др., 1950; Крахмальный, 2011;

Матвиенко, 1965; Прошкина-Лавренко, 1963; Царенко, 1990; Komárek, 2013; Komárek, Anagnostidis, 1998, 2005; Tomas, 1997). Данные о приуроченности к определенному местообитанию, к категории солености и сапробности, а также эколого-географическая характеристика видов приведены согласно работе Л.Г. Корневой (2015). Таксономический список эукариотических водорослей составлен с учетом систематических преобразований Guiry M. и Guiry G. (2018), цианопрокариот — согласно работам Komarek (Komárek, 2013; Komárek, Anagnostidis, 1998, 2005).

Влияние факторов среды на численность и таксономический состав фитопланктона с учетом их сезонной и пространственной изменчивости оценивали с помощью регрессионного непараметрического анализа DistLM (distance-based linear modeling) с использованием индексов сходства Брея—Кёртиса и Theta+. Оцифровку и графическую визуализацию моделей осуществляли методом ординации dbRDA (distance-based redundancy analysis). В качестве факторов использовали соленость и температуру воды, в качестве показателя расстояния от устья — географическую долготу. Достоверным считали уровень значимости $p \leq 0.01$. Кластерный анализ проводили с учетом присутствия и отсутствия представителей различных отделов водорослей методом невзвешенного парного среднего (UPGMA), где в качестве критерия сходства использован индекс Брея—Кёртиса.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В период исследований температура воды в Таганрогском заливе Азовского моря и в дельте р. Дон варьировала от –0.6 (в январе) до +28.9°C (июле–августе), минерализация — от 0.5 до 0.9 мг/л (в нижнем течении р. Дон) и соленость от 0.6 до 14.1‰ (в Таганрогском заливе). Соленость воды постепенно увеличивалась в направлении от Нижнего Дона к западной части Таганрогского залива, ее среднее значение для района I было 0.8 ± 0.1, II — 0.9 ± 0.1, III и IV — 5.1 ± 0.4, V — 10.7 ± 0.3‰.

В составе фитопланктона выявлено 210 видов эукариотических водорослей и цианопрокариот, относящихся к 10 отделам: Bacillariophyta — 61, Chlorophyta — 52, Cyanoprokaryota — 50, Dinophyta — 18, Cryptophyta — 11, Euglenophya — 11, Chrysophyta — 4, Xanthophyta, Charophyta и Haptophyta — по одному виду. Наибольшим видовым богатством характеризовались диатомовые, зеленые водоросли и цианопрокариоты. По частоте встречаемости лидировали криптофитовые водоросли *Komma caudata* (Geitler) Hill, *Plagioselmis prolonga* Butcher et al., диатомовые *Cyclotella caspia* Grunow, *Cyclotella atomus* Hustedt, *Nitzschia acicularis* (Kützing) Smith, виды рода *Thalassiosira* Cleve, динофитовые из родов *Glenodinium* Ehrenberg, и *Gymnodinium* Stein, зеленые *Monoraphidium contortum* (Thuret) Komárková-Legnerová, *Scenedesmus quadricauda* (Turpin) Brébisson; цианопрокариоты *Planktothrix agardhii* (Gomont) Anagnostidis & Komárek, *Snowella lacustris* (Chodat) Komárek & Hindák и *Pseudanabaena limnetica* (Lemmermann) Komárek. Наибольшим видовым богатством фитопланктона характеризовался Таганрогский залив (172 вида), в нижнем течении р. Дон зафиксировано 150 видов, 96 видов были общими для исследованных районов.

Фитопланктон представлен различными экологическими группами: планктонными, бентосными, эпифитными формами, морскими, солоновато-водными, а также типичными представителями пресных вод. Среди зеленых водорослей и цианопрокариот отмечены пресноводные и солоновато-водные виды, в составе диатомовых и динофитовых — виды морского, неритического и океанического происхождения, а также солоновато-водные (эстуарные) и пресноводные. По видовому богатству преобладали индифференты по отношению к солености воды и β-мезосапробы (рис. 2). Большинство видов с известными биогеографическими характеристиками входили в группу космополитов (67%).

Кластеризация районов исследования по соотношению крупных таксономических групп (рис. 3) показала достоверную дифференциацию альгофлоры реки (районы I и II) и залива (районы III–V). Коэффициент корреляции, показывающий степень соответствия полученного теоретического распределения реальным данным, был 0.96. В "речном" кластере выделялись нижнее течение р. Дон (I) и авандельта–дельта (II), в кластере "залива" — его восточная часть (ст. 3–5 района III). Остальные станции залива объединялись в три группы: относящиеся ко всей акватории (III–V), центральному (IV) и западному (V) районам. В направлении от нижнего течения р. Дон к западной части Таганрогского залива изменение видового богатства фитопланктона приобретало форму куполообразной кривой с максимумом в районах III и IV — зоне критической солености (хорогалиникума): I — 108, II — 118, III и IV — 136, V — 75 видов.

Уровень развития, характер сезонной динамики, смена ценозообразующих видов фитопланктона в нижнем течении р. Дон и Таганрогском заливе различались (рис. 4). Ценотический состав альгоценозов залива и реки в основном формировали диатомовые водоросли, цианопрокариоты и различные группы фитофлагеллят со смешанным типом питания (миксотрофы). В нижнем течении р. Дон отмечен один весенний максимум биомассы фитопланктона в мае (3.8–4.0 мг/л), сформированный диатомовыми, эвгленовыми и динофитовыми водорослями, с последующим ее снижением

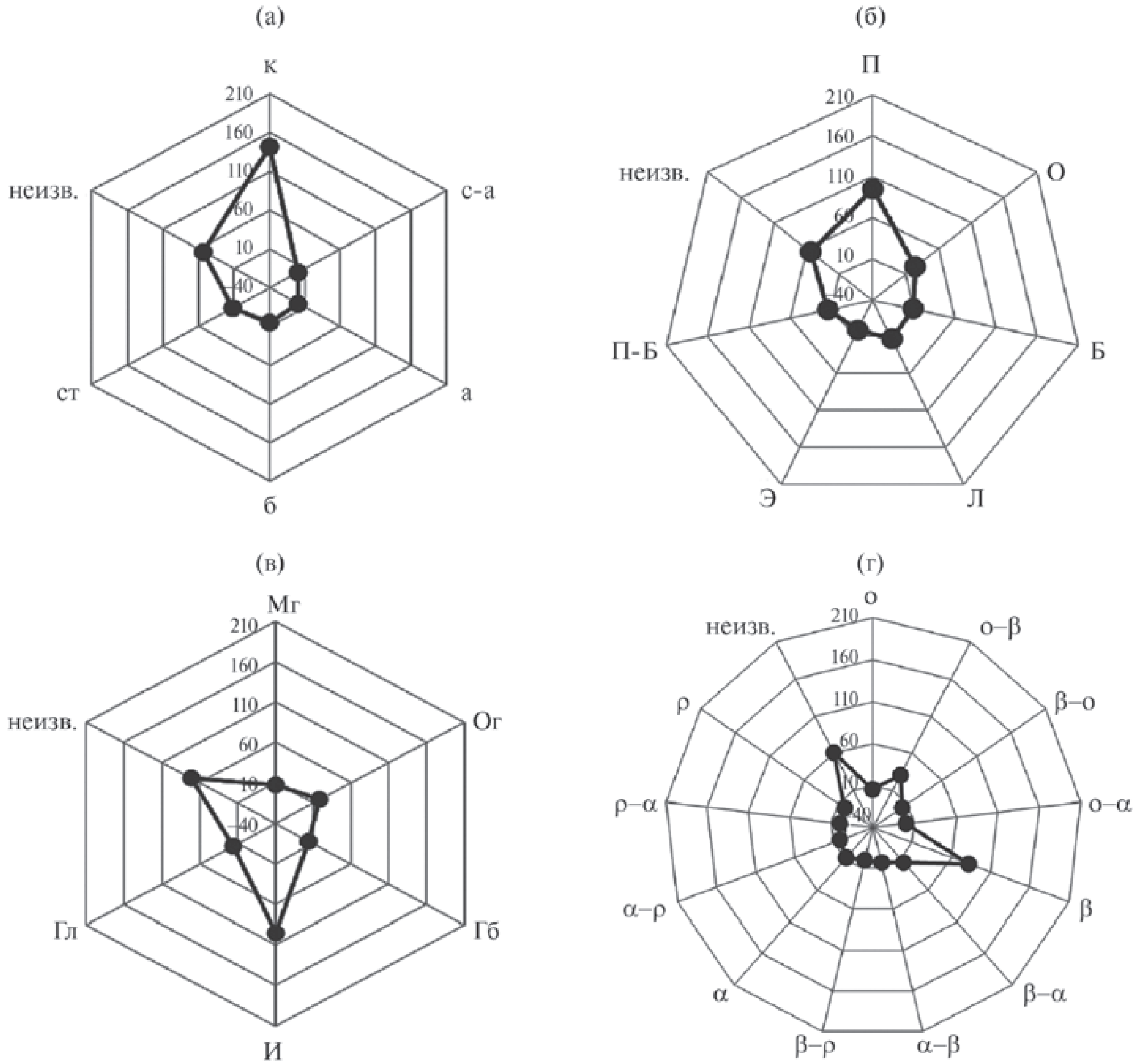


Рис. 2. Соотношение числа видов различных эколого-географических групп водорослей в планктоне Таганрогского залива и Нижнего Дона. Распространение (а): к – космополит, с–а – северо-альпийский, а – альпийский, б – бореальный, ст – субтропический. Местообитание (б): П – планктонный, О – обитатель обрастаний, Б – бентосный, Л – литоральный, Э – эпибионтный, П–Б – планкто-бентосный. Отношение к галобности (в): Мг – мезогалоб, Ог – олигогалоб, Гб – галофоб, И – индифферент, Гл – галофил. Отношение к сапробности (г): о – олигосапроб, о–β – олиго-бета-мезосапроб, β–о – бета-мезо-олигосапроб, о–α – олиго-альфа-мезосапроб, β – бета-мезосапроб, β–α – бета-альфа-мезосапроб, α–β – альфа-бета-мезосапроб, β–ρ – бета-мезо-полисапроб, α – альфа-мезосапроб, α–ρ – альфа-мезо-полисапроб, ρ–α – поли-альфа-мезосапроб, ρ – полисапроб; неизв. – вид, малоизученный в биогеографическом и экологическом отношении или с сомнительной идентификацией.

и постепенной перестройкой доминирующего комплекса: Bacillariophyta–Cryptophyta–Cyanoprokaryota. В Таганрогском заливе зафиксировано два подъема биомассы: в начале июня (6.0–14.0 мг/л) и в августе–сентябре (5.7–48.2 мг/л) за счет развития Cyanoprokaryota.

В нижнем течении р. Дон в январе доминировали диатомовые водоросли *Skeletonema costatum* (Greville) Cleve, *Cyclotella atomus* и *C. caspia*, а также криптофитовые *Rhodomonas* cf. *marina* (Dangeard) Lemmermann. В мае–начале июня к диатомовым из рода *Cyclotella* (Kützing) Brébisson присоединились эвгленовые (*Euglena* cf. *variabilis* Klebs, *Euglena* sp.), нановодоросли из отд. Chlorophyta и динофитовые (*Diplopsalis acuta* (Apstein) Entz, *Gymnodinium* sp.). Последующая перестройка доминирующего комплекса в июле–августе заключалась в превалировании криптофитовых (*Komma caudata*), диатомовых (*Skeletonema subsalsum* (Cleve-Euler) Bethge, *Thalassiosira* cf. *incerta* Makarova; *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen) и появлении безгетероцистных цианопрока-

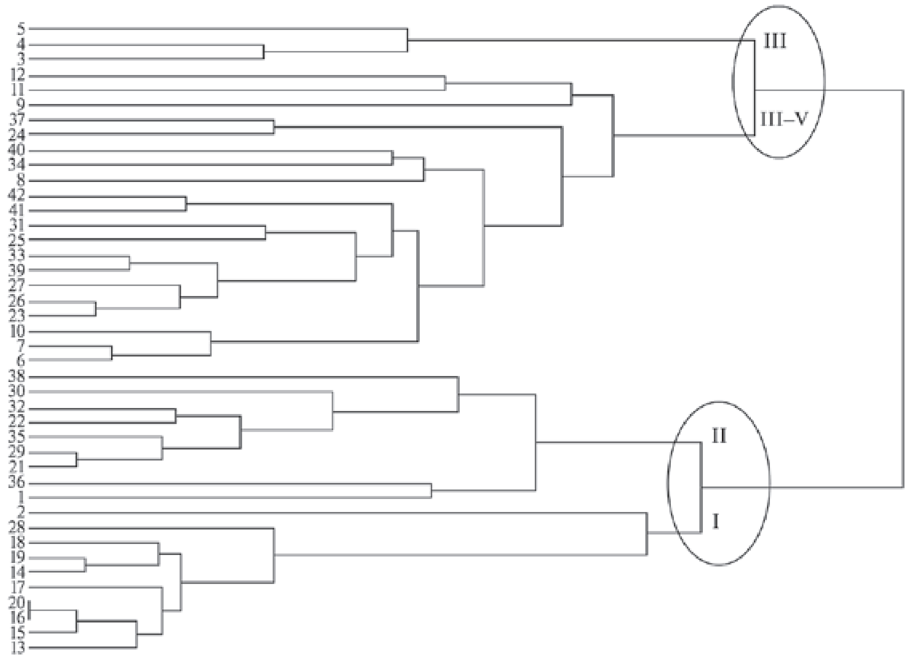


Рис. 3. Дендрограмма флористического сходства районов исследования. I–V – номера районов, 1–42 – номера станций.

риот (*Aphanocapsa delicatissima* W. & West). В начале осени (сентябрь) лидировали криптофитовые *Komma caudata* и *Cryptomonas marssonii* Skuja, диатомовые *Aulacoseira granulata*, динофитовые *Gymnodinium* sp. и цианопрокариоты *Planktothrix agardhii, Anagnostidinema amphibium* (Agardh ex Gomont) Strunecký et al., *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing, *Microcystis* sp. В ноябре ценозообразующий комплекс представляли диатомовые *Skeletonema costatum, Cyclotella meneghiniana* Kützing, *Ulnaria ulna* (Nitzsch) Compère и зеленые нановодоросли.

Сезонное чередование видов фитопланктона в разных районах Таганрогского залива различалось. В подледный период в январе на всей акватории развивались диатомовые *Skeletonema costatum*, *Cyclotella atomus, Thalassiosira* cf. *aculeata* Proshkina-Lavrenko, *T. eccentrica* (Ehrenberg) Cleve и динофитовые *Heterocapsa rotundata* (Lohmann) Hansen, *Glenodinium* sp. В апреле доминирующий комплекс состоял из диатомовых *Skeletonema costatum*, *Cyclotella atomus, Thalassiosira* cf. *subsalina* Proshkina-Lavrenko, *T. eccentrica*. В мае к ним присоединились диатомеи *Actinoptychus senarius* (Ehrenberg) Ehrenberg, *Thalassiosira* cf. *parva* Proshkina-Lavrenko, динофитовые *Prorocentrum micans* Ehrenberg, *Gonyaulax scrippsae* Kofoid и нановодоросли из отдела Chlorophyta; в восточном районе доминировали лишь диатомовые *Cyclotella atomus* и *C. caspia*. В начале июня повсеместно лидировал из цианопрокариот безгетероцистный вид *Snowella lacustris.* Параллельно с ним в разных районах залива доминировали: в западном – *Gomphosphaeria* sp. (порядок Chroococcales), в центральном – *Woronichinia elorantae* Komárek & Komárková-Legnerová (порядок Chroococcales), диазотроф *Anabaenopsis arnoldii* Aptekar (порядок Nostocales) и диатомея *Thalassiosira eccentrica*, а в восточной части – *W. elo-*

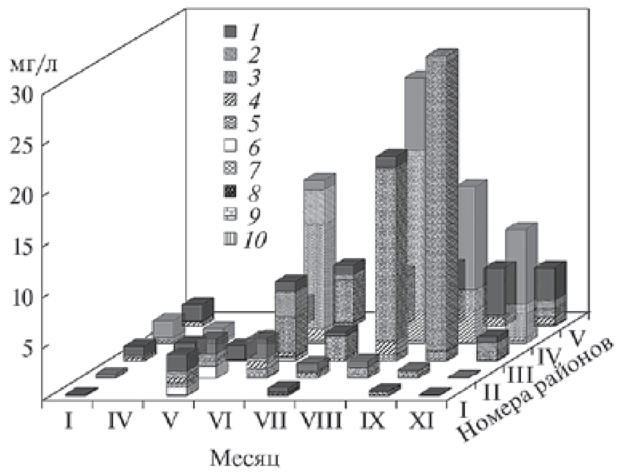


Рис. 4. Сезонная динамика биомассы водорослей Таганрогского залива и Нижнего Дона. *1* – Bacillariophyta, *2* – Chlorophyta, *3* – Cyanoprokaryota, *4* – Dinophyta, *5* – Cryptophyta, *6* – Euglenophyta, *7* – Chrysophyta, *8* – Charophyta, *9* – Xanthophyta, *10* – Haptophyta.

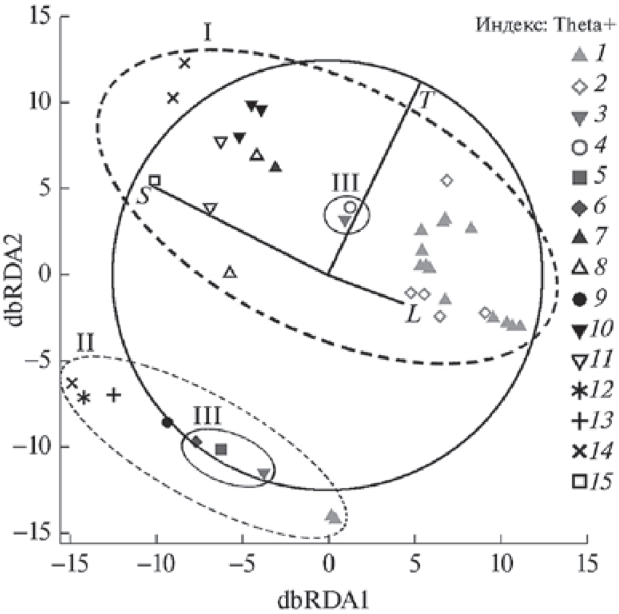


Рис. 5. Связь структуры фитопланктона Таганрогского залива и Нижнего Дона с некоторыми абиотическими факторами. Ось абсцисс (dbRDA1) объясняет 52.4% подогнанной (установленной) и 18.9% общей вариации, ось ординат (dbRDA2) – 41.3% подогнанной и 14.9% общей вариации. Векторы, указывающие направление эффекта параметра в графике ординации (L – долгота (° в.д.), T – температура (°С) и S – соленость воды (‰)): *1* – 0.5–0.99, *2* – 1.00–1.49, *3* – 4.00–4.49, *4* – 4.50–4.99, *5* – 6.50–6.99, *6* – 7.00–7.49, *7* – 8.00–8.49, *8* – 8.50–8.99, *9* – 9.00–9.49, *10* – 9.50–9.99, *11* – 10.00–10.49, *12* – 10.50–10.99, *13* – 11.50–11.99, *14* – 12.00–12.49, *15* – 12.50–12.99. Пунктирные линии – безледный (I) и подледный (II) комплексы, III – зона хорогалиникума.

rantae и представитель зеленых *Tetraëdron minimum* (Braun) Hansgirg. В конце июня–августе наблюдали постепенное замещение хроококковых на нитчатые осцилляториевые (*Pseudanabaena limnetica*). Однако в западном районе наряду с цианопрокариотами превалировали морские теплолюбивые диатомовые *Pseudosolenia calcar-avis* (Schultze) Sundström и динофитовые *Prorocentrum micans*. В сентябре к доминирующему комплексу присоединились диатомея *Lepthocylindrus minimus* Gran, динофлагеллята *Cochlodinium polykrikoides* Margalef и в восточном районе – *Woronichinia compacta* (Lemmermann) Komárek & Hindák из цианопрокариот. В ноябре из диатомовых преобладала *Thalassiosira* cf. *incerta*, а в восточном районе залива доминирующий комплекс сменили цианопрокариоты *Snowella lacustris* и *Planktothrix agardhii*, диатомовые *Skeletonema costatum, Cyclotella meneghiniana* и неидентифицированные зеленые нановодоросли.

В течение всего года большую часть суммарной биомассы формировали водоросли микрофракции, их максимумы развития наблюдали весной (60–86% биомассы) и летом (91–95%). В мае они встречались во всех исследованных районах, а в августе – только в Таганрогском заливе. В сентябре их доля в общей биомассе снижалась до 77%, в ноябре – до 71%. Осенью они развивались в основном в центральном и западном районах залива. Наибольший вклад нанофракции в суммарную биомассу фитопланктона в течение года отмечен в восточном районе залива. Максимального развития эта размерная группа достигала в январе (54–60%), мае (38–57%) и ноябре (32–47%). Пиководоросли преобладали в нижнем течении р. Дон и в его устьевом районе в течение всего периода исследования. Их наибольшая относительная биомасса отмечена в январе (15–20%) и ноябре (12–20%). В направлении от Нижнего Дона к западной части Таганрогского залива по мере увеличения солености воды процентное содержание пико- и нанопланктона в суммарной биомассе постепенно уменьшалось с 10 до 3% и с 39 до 27% соответственно, а доля микропланктона, наоборот, увеличивалась с 51 до 73%. Средняя для участков биомасса фитопланктона варьировала от 1.8 ± 0.5 до 11.7 ± 2.7 мг/л, достигая наибольшего значения в районах III и IV, в зоне хорогалиникума (10.5 ± 2.4 мг/л).

Результаты регрессионного анализа показали, что по количественному соотношению видов нано- и микропланктона "подледный" и "безледный" комплексы достоверно различались (пунктирные линии на рис. 5). В каждом из них четко прослеживалось формирование ценотических групп, которые распределялись в пространстве ординации факторов по направлению увеличения солености воды. Связь фитопланктона с соленостью наиболее четко выражена в Таганрогском заливе. Структура фитопланктона Нижнего Дона была более чувствительна к фактору долготы. Участки вод с соленостью 5–8‰ (зона хорогалиникума) располагались в восточной части Таганрогского залива (рис. 5).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение данных по составу альгофлоры планктона в период распреснения Азовского моря (1980-е–начало 2000-х гг.) (Лужняк, 2017; Макаревич, 2007; Макаревич, Ларионов, 2004) и наших данных показывает, что в 2017 г. в нижнем течении р. Дон количество видов не изменилось, а в заливе уменьшилось в три раза. Превалирование, как и ранее, видового богатства диатомовых, зеленых водорослей, цианопрокариот и преобладание космополитов, видов-индифферентов по отношению к солености и β-мезосапробов свидетельствовало о стабильности общей структуры альгофлоры планктона исследованных районов.

В отличие от предшествующих наблюдений (Макаревич, 2007; Макаревич, Ларионов, 2004) в сезонной динамике биомассы фитопланктона Таганрогского залива в 2017 г. выявлено два летних пика, сформированных цианопрокариотами, а не диатомовыми и зелеными водорослями, как отмечалось ранее. В нижнем течении р. Дон почти круглогодично лидировали диатомовые водоросли, в конце июля–сентябре к ним присоединялись цианопрокариоты и криптофитовые. Присутствие последних в доминирующем комплексе также не отмечали в предыдущие годы. Смещение в 2017 г. во времени массового весеннего развития диатомовых водорослей на один месяц могло быть связано с более поздним прогревом толщи воды до температуры >17°С.

Сезонная смена основных лидирующих видов фитопланктона исследованной акватории была сходной с описанной в работах (Лужняк, 2017; Макаревич, 2007; Макаревич, Ларионов, 2004). Однако появление среди ценозообразующих видов Нижнего Дона доминантов, способных к миксотрофному типу питания (динофитовых и криптофитовых водорослей), и массовое развитие цианопрокариот в конце августа сигнализировали о высоком уровне содержания органического вещества и об увеличении гетеротрофной составляющей в функционировании экосистемы (Корнева, 2015). В Таганрогском заливе в 2017 г. отмечено уменьшение доли зеленых водорослей в суммарной биомассе фитопланктона, начало интенсивного развития цианопрокариот в июне и смена основных доминантов (*Snowella lacustris, Pseudanabaena limnetica, Planktothrix agardhii* и виды рода *Woronichinia* Elenkin, заменили преобладавших ранее *Microcystis aeruginosa*, виды родов *Aphanizomenon* Morren ex Bornet & Flahault, *Anabaena* Bory ex Bornet & Flahault и *Oscillatoria* Vaucher ex Gomont). Нарастающее развитие безгетероцистных цианопрокариот и их представителей из "планктотрихетового" (осцилляториевого) комплекса, устойчивых к недостатку света и высокому содержанию биогенных веществ (Reynolds et al., 2002), характерно для заключительных стадий олиго-эвтрофной сукцессии (Корнева, 2015) и свидетельствует об увеличении трофии вод залива.

На повышение уровня трофии вод залива и реки указывает также изменение соотношения размерных групп фитопланктона. По сравнению с предыдущим периодом (Глущенко, Лужняк, 2013), в 2017 г. наблюдали уменьшение доли микроводорослей в среднем на 10% и увеличение в 1.5 раза доли мелкоклеточного нанопланктона. Повышение доли крупноразмерного фитопланктона по мере увеличения солености хорошо согласуется с результатами, полученными при росте минерализации в водохранилищах Нижней Волги (Корнева, 2015).

В 2017 г. в пространственном распределении фитопланктона сохранялись три комплекса водорослей с присущими им специфическими наборами видов (Макаревич, 2007; Макаревич, Ларионов, 2004), но границы их развития сместились в залив в результате усиления аридизации и продвижения соленых вод. Первый комплекс, характеризующийся преобладанием диатомовых и динофитовых водорослей, был сформирован в западном районе (в зоне влияния морских вод) и распространялся до центральной части залива, а иногда и до восточной. Второй комплекс с доминированием диатомовых водорослей и цианопрокариот, ранее приуроченный к опресненным водам восточной части Таганрогского залива и Нижнего Дона, сохранил свое расположение и в 2017 г. Третий – смешанный комплекс, отличающийся по видовому составу от двух первых, ранее занимал районы смешения пресных и солоноватых вод в центральной части залива, а в 2017 г. сместился ближе к его восточной части. Присутствие галофилов в этой части залива носит периодический характер, предположительно связанный с заносом азово-черноморских солоноватых вод в результате сгонно-нагонных явлений. Поэтому расширение зоны развития представителей морского планктона в центральном районе залива и их проникновение вплоть до его восточной части пока не может свидетельствовать о натурализации морских видов по всей акватории Таганрогского залива. Однако результаты статистического анализа подтверждают и иллюстрируют, что наиболее важный фактор формирования флоры и структуры автотрофного планктона в исследованных водоемах – соленость. Данные об увеличении видового богатства и биомассы фитопланктона в зоне критической солености согласуются с концепцией максимального разнообразия протистов в хорогалиникуме (Skarlato, Telesh, 2017) и служат хорошим дополнением в ее развитие.

Выводы. В январе–ноябре 2017 г. в Таганрогском заливе и нижнем течении р. Дон обнаружено 210 видов водорослей из 10 отделов. По видовому богатству превалировали диатомовые, зеленые водоросли и цианопрокариоты. Основную часть видов представляли космополиты, индифференты по отношению к солености воды и β-мезосапробы по отношению к содержанию легкоусвояемого органического вещества. Структуру планктонных альгоценозов залива и реки определяли диатомовые водоросли, цианопрокариоты и различные группы миксотрофных фитофлагеллят. В сезонной динамике биомассы фитопланктона Нижнего Дона зарегистрирован один весенний максимум, обусловленный развитием диатомей и жгутиковых водорослей. В динамике фитопланктона Таганрогского залива отмечен обширный летний максимум, образованный цианопрокариотами. Средняя биомасса фитопланктона постепенно увеличивалась от реки к заливу и достигала наибольших значений в его восточном и центральном районах в зоне хорогалиникума, где выявлено наибольшее видовое богатство фитопланктона. Увеличение доли биомассы мелкоклеточных видов водорослей, обилия видов "планктотрихетового" комплекса цианопрокариот и миксотрофных фитофлагеллят свидетельствуют о глубоких изменениях, происходящих в исследованных водных экосистемах вследствие возрастания уровня трофии вод при изменении климата. Увеличение солености вод в условиях аридизации отражается на формировании структуры альгопланктоценозов и периодическом расширении ареала распространения его морских представителей к дельте реки.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны О.С. Макаровой (Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН) за помощь в подготовке материала для диатомового анализа, В.Л. Семину (Южный научный центр РАН) в работе с программным обеспечением Primer-6 & Permanova+ и сотрудникам лаборатории гидрологии и гидрохимии (Южный научный центр РАН) за любезно предоставленные данные по абиотическим параметрам водоемов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 17-34-50135 "Оценка изменений сезонной сукцессии фитопланктона Таганрогского залива Азовского моря и Нижнего Дона в условиях изменяющегося климата".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Брянцева Ю.В., Лях А.М., Сергеева А.В. 2005. Расчет объемов и площадей поверхности одноклеточных водорослей Черного моря. Севастополь, Препринт Институт биологии южных морей НАН Украины.

Вассер С.П., Кондратьева Н.В., Масюк Н.П. и др. 1989. Водоросли: справочник. Киев: Наук. думка.

Глущенко Г.Ю., Лужняк О.Л. 2013. Роль водорослей разных размерных фракций в общей биомассе фитопланктона Таганрогского залива // Вестник Южного научного центра. Т. 9. № 1. С. 42.

Голлербах М.М., Коссинская Е.К., Полянский В.И. 1953. Определитель пресноводных водорослей СССР. М.: Сов. наука. Вып. 2.

Григоренко К.С., Московец А.Ю., Аршакян Г.Г., Мирко А.С. 2016. О взаимодействии пресных речных вод р. Дон и осолоненных вод Таганрогского залива Азовского моря // Наука юга России. Т. 12. № 1. С. 107.

Гусельникова Н.Е., Черкасова М.Н., Власова С.Н. 2007. Методика прямого учета бактерий в пробах воды с применением флуоресцентного красителя // Питьевая вода. № 1. С. 22–23.

Забелина М.М., Киселев И.А., Прошкина-Лавренко А.И., Шешукова В.С. 1950. Диатомовый анализ: Определитель ископаемых и современных диатомовых водорослей. Кн. 3. Л.: Госгеолиздат.

Заика В.Е., Шевченко В.А., Булатов К.В. 1989. Экология морского фототрофного пикопланктона. М.: Научный центр биологических исследований.

Ковалева Г.В. 2016. История изучения микроводорослей Азовского моря. Обзор // Наука Юга России. Т. 12. № 3. С. 51.

Корнева Л.Г. 2015. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги. Кострома: Костромской печатный дом.

Крахмальный А.Ф. 2011. Динофитовые водоросли Украины (иллюстрированный определитель). Киев: Альтерпрес.

Лужняк О.Л. 2017. Современное состояние фитопланктона нижнего течения реки Дон в условиях антропогенного преобразования стока // Вода: химия и экология. № 9. С. 11.

Макаревич П.Р. 2007. Планктонные альгоценозы эстуарных экосистем. Баренцево, Карское и Азовское моря. Москва: Наука.

Макаревич П.Р., Ларионов В.В. 2004. Сезонная сукцессия фитопланктонного сообщества Таганрогского залива // Комплексный мониторинг среды и биоты Азовского бассейна. Т. 6. Апатиты: Кольск. науч. центр. С. 106.

Матвиенко О.М. 1965. Визначник прісноводних водоростей Української РСР. Т. III. Ч. 1. Київ: Наук. думка.

Матишов Г.Г., Григоренко К.С., Московец А.Ю. 2017. Механизмы осолонения Таганрогского залива в условиях экстремально низкого стока Дона // Наука юга России. Т. 13. № 1. С. 35.

Матишов Д.Г., Ильин Г.В., Моисеев Д.В. 2007. Сезонная термохалинная изменчивость водных масс в Таганрогском заливе Азовского моря // Вестник Южного научного центра. Т. 3. № 1. С. 28.

Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. 1975. Москва: Наука.

Прошкина-Лавренко А.И. 1963. Диатомовые водоросли планктона Азовского моря. Москва: Наука.

Студеникина Е.И., Мирзоян З.А., Мартынюк М.Л. и др. 2005. Методы сбора и обработки гидробиологических проб // Методы рыбохозяйственных и природоохранных исследований в Азово-Черноморском бассейне. Краснодар: АзНИИРХ, С. 50.

Царенко П.М. 1990. Краткий определитель хлорококковых водорослей Украинской ССР. Киев: Наук. думка.

Bellinger E.G., Sigee D.C. 2010. Freshwater Algae: Identification and Use as Bioindicators. Wilts: Chippenham.

Guiry M.D., Guiry G.M. 2018. AlgaeBase. World–wide electronic publication. Galway: National University of Ireland Press. Available at: http://www.algaebase.org. (accessed 08.05.2018).

Komárek J. 2013. Süßwasserflora von Mitteleuropa: Cyanoprokaryota: Heterocytous Genera. Bd 19/3. Berlin: Springer.

Komárek J., Anagnostidis K. 1998. Süßwasserflora von Mitteleuropa: Cyanoprokaryota: Chroococcales. Bd 19/1. Heidelberg: Spektrum.

Komárek J., Anagnostidis K. 2005. Süßwasserflora von Mitteleuropa: Cyanoprokaryota: Oscillatoriales. Bd 19/2. München: Elsevier.

Reynolds C.S., Huszar V., Kruk C. 2002. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton // J. Plankton Res. V. 24. № 5. P. 417.

Skarlato S.O., Telesh I.V. 2017. The development of the protistan species-maximum concept for the critical salinity zone // Russ. J. Mar. Biol. V. 43. № 1. P. 1.

Tomas C.R. 1997. Identifying Marine Phitoplankton. San Diego: Academic Press.

Composition and Seasonal Succession of the Phytoplankton of the Taganrog Bay of the Sea of Azov and the Lower Don under Changing Climate

L. G. Korneva[1, *] and G. Yu. Glushchenko[2, **]

[1]*Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, Borok, Nekouzskii raion, Yaroslavl oblast, Russia*

[2]*Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia*

**e-mail: korneva@ibiw.yaroslavl.ru*

***e-mail: gluschenko_gala@mail.ru*

The results of the study on the phytoplankton in the Taganrog Bay in the Sea of Azov and the Lower Don during January—November 2017 are presented. 210 species of eukaryotic algae and cyanoprokaryotes were identified. Analysis of the taxonomic, ecological and geographical composition of the plankton algoflora, seasonal dynamics of biomass of phytoplankton taxonomic and size structures showed that the ratio of large taxonomic and ecological-geographic groups in the algal flora did not change in comparison with previous years (1980s—early 2000s). However, in algocoenosis the proportion of myxotrophic phytophagellate, cyanoprokaryotes from "planktotrichet" complex and small-sized species increased. It is shown that the salinity of water is the main factor influencing the formation of species richness, total biomass and structure of phytoplankton. The maximum diversity and biomass of phytoplankton were recorded in the zone of horohalinicum.

Keywords: phytoplankton, seasonal succession, size structure, climate, salinity, Taganrog Bay of the Sea of Azov, Lower Don

УДК 581.526.3(262.5 + 262.54)
DOI: 10.7868/S25000640200404

МАКРОФИТОБЕНТОС ЧЕРНОГО И АЗОВСКОГО МОРЕЙ: ФЛОРИСТИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ (ОБЗОР)[1]

© 2020 г. О.В. Степаньян[1]

Аннотация. Приведен ретроспективный анализ исследований макрофитобентоса Черного и Азовского морей. Выделены основные 4 этапа: I этап (1860–1920-е гг.) – флористический; II этап (1930–1950-е гг.) – гидробиологический; III этап (1960–1990-е гг.) – флористическо-экологический; IV этап (с начала 2000-х гг.) – синергетический. В последние годы превалируют локальные флористические работы с описанием экологии и биологии отдельных видов. Необходимо усиление исследований макрофитобентоса Черного и Азовского морей во всех странах причерноморского региона.

Ключевые слова: макрофитобентос, морские водоросли, Черное море, Азовское море.

MACROPHYTOBENTHOS OF THE BLACK AND AZOV SEAS: FLORISTIC AND ECOLOGICAL ASPECTS (OVERVIEW)

O.V. Stepanyan[1]

Abstract. The review considers the historical retrospective of studies of macrophytobenthos of the Black Sea and the Sea of Azov. Main 4 research stages were identified: stage I (1860–1920) – floral; stage II (1930–1950) – hydrobiological; stage III (1960–1990) – floristic-ecological; stage IV (early 2000s) – synergistic. It is shown that in recent years local floristic works with the description of ecology and biology of separate species prevail. The lack of large-scale international programs for conducting hydrobiological (algological) surveys using sea vessels and professional divers with precise reference to coordinates and satellite data to a certain extent "throws" scientists to the level of capabilities of the first half of the twentieth century. Due to modern geopolitical realities, full-scale research of the Zernov phyllophore field in the North-Western sector of the Black Sea has become impossible, and separate sections of the shelf in the Azov and Black seas have become inaccessible to researchers. Work on the physiology and biochemistry of macroalgae has been sharply reduced. There are practically no modern molecular genetic studies of seaweed and, consequently, no modern assessment of species diversity. The creation of an accessible international database on the marine diversity of the Azov and Black seas has been suspended. To accurately assess long-term changes in the macrophytobenthos of the Black Sea, it is necessary to search for historical and archival materials (herbariums, field diaries of researchers) that contain information with primary data and geographical references. It is necessary to strengthen the studies of macrophytobenthos of the Black and Azov seas in all countries of the Black Sea region.

Keywords: macrophytobenthos, seaweeds, Black Sea, Sea of Azov.

Макрофитобентос играет важную роль в функционировании морских прибрежных экосистем, в том числе Азовского и Черного морей. Макроводоросли и морские травы, являясь фотосинтезирующими организмами, обеспечивают постоянный приток органического вещества для гетеротрофных организмов, образуют растительный полог – биотоп для беспозвоночных и фитофильных рыб. Динамика подводной растительности во многом определяет изменения в донных сообществах, их распределении и запасах. Сообщества морских трав и водорослей рассматриваются как индикаторы долговременных климатических и антропогенных изменений в водоемах [1; 2]. Несмотря на много-

[1] Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: step@ssc-ras.ru

[1] **Оригинальный текст:** *Степаньян О.В.* Макрофитобентос Чёрного и Азовского морей: флористические и экологические аспекты (обзор) // Наука Юга России. 2020. Т. 16. № 4. С. 26–38.

численные работы по исследованию макрофитобентоса Азовского и Черного морей в последние десятилетия, материалы зачастую разрозненны и противоречивы, необходима систематизация данных, создание региональных баз данных и сводных чек-листов.

История исследований водорослей южных морей – Черного и Азовского – начинается с XVIII века усилиями естествоиспытателей И.Х. Буксбаума, С.Г. Гмелина и К.И. Габлица. В их работах содержатся первые сведения о флористических находках, приводится некоторая информация о морфологии, циклах развития, экологии и распространении отдельных видов. Указанным авторам в ходе опасных экспедиций в условиях непрекращающихся боевых действий на Кавказе удалось описать более 10 видов водорослей с турецкого и российского побережий Черного моря. В начале XIX века К. Гард и Ж. Лемуре указывали до 30 видов водорослей. Наиболее полные сведения о водорослях южных морей на тот период содержатся в сводке А.Ф. Постельса и Ф.И. Рупрехта, вышедшей в 1840 г., однако отмечается незначительное видовое разнообразие водорослей Черного моря.

Планомерные исследования макрофитобентоса южных морей (Азовского и Черного) насчитывают более 150 лет. В исторической ретроспективе можно выделить 4 основных этапа: I этап (1860–1920-е гг.) – флористический; II этап (1930–1950-е гг.) – гидробиологический; III этап (1960–1990-е гг.) – флористическо-экологический; IV этап (с начала 2000-х гг.) – синергетический. Для каждого этапа характерны свои методы и способы исследования, в связи с чем часто невозможно сравнить данные, полученные *de novo*, с имеющимися литературными сведениями.

На Черном море флористические исследования были начаты Л.А. Ришави, К.Н. Декенбахом, Л.В. Рейнгардом, С.М. Переяславцевой, Н.Н. Воронихиным во второй половине XIX – начале XX века. В то время важная роль в организации альгологических исследований принадлежала Харьковскому императорскому университету и Севастопольской биологической станции [3]. Работы проводили отдельные специалисты, водоросли добывали из выбросов на берегу или драгированием с использованием весельных лодок. Этот этап работ можно назвать **флористическим**. Первые комплексные исследования фитобентоса Азовского и Черного морей были проведены в СССР в сложных условиях послевоенной разрухи в 1920–1930-х гг. Л.И. Волковым, Н.В. Морозовой-Водяницкой, Е.С. Зиновой в знаменитых промысловых экспедициях Н.М. Книповича, а также на Новороссийской и Севастопольской биостанциях [3]. В это время активно использовались гидробиологические методы исследования, проводились масштабные драгирования с крупных судов. Этот этап возможно обозначить как **гидробиологический**. Масштабные исследования фитобентоса Черного моря с использованием специализированных научных судов, легководолазного снаряжения и погружаемых аппаратов были осуществлены в 1960–1970-х гг. А.А. Калугиной-Гутник, К.М. Петровым, К.Л. Виноградовой, И.И. Погребняком, В.В. Громовым, Е.И. Блиновой, Т.Ф. Щаповой и др., а результаты обобщены в работах, ставших классикой отечественной и зарубежной альгологии. В этот же период вышел первый и до сих пор единственный определитель макроводорослей южных морей, составленный А.Д. Зиновой [4], и монография А.А. Калугиной-Гутник [5]. Этот этап выделяется нами как **эколого-флористический**. После некоторого спада в 1990-х гг. интенсивность альгологических исследований в 2000-х гг. возросла, но работ по современной оценке видового разнообразия макроводорослей южных морей недостаточно, они охватывают различные регионы в отдельные временные периоды. В это время начали формироваться базы данных по видовому разнообразию, экологии и биологии макрофитов, внедрялись и совершенствовались методы математической обработки данных. Это этап в исследовании фитобентоса южных морей России мы обозначили как **синергетический**.

Необходимо отметить, что практически во всех опубликованных работах до начала 2000-х гг. отсутствуют точные географические координаты мест, где проводились исследования, это обстоятельство делает невозможным репрезентативное сравнение имеющихся литературных данных с полученными *de novo*.

Остановимся более подробно на характеристике каждого этапа исследований.

В середине XIX века начинается активизация научных работ на Черном море. Проводятся многочисленные экспедиции, правда, носящие характер отдельных экспедиционных выездов, с наймом плавательных средств. Эти исследования локальны и ограниченны по времени. В 1860 г. 11 видов водорослей для Черного моря указывает П.А. Чихачев (цит. по [6]). Более 80 видов для Черного моря приводит Г. Шперк в 1869 г. Составитель флоры Новороссийского края и Бессарабии Н.К. Срединский указывает в 1873 г. для Черного моря 34 вида водорослей (цит. по [6]). В 1874–1890 гг. на Крымском побережье изучают водоросли профессора Харьковского Императорского университета Л.А. Ришави и Л.В. Рейнгард, которые отмечают сходство флоры водорослей Черного и Средиземного морей, приводя сравнительный список водорослей двух морей. К.Н. Декенбах указывает 80 видов водорослей, собранных в Балаклавской бухте, и также подчеркивает средиземноморский характер флоры водорослей Черного моря. В начале XX века появляются первые сводки по водорослям побережья Болгарии и Румынии. Полная библиография работ болгарских альгологов по Черному морю в XX веке приведена в статье [7].

Пионерские эколого-флористические работы на черноморском побережье России проводит С.М. Переяславцева – первая женщина-директор Севастопольской биостанции [3]. В обзоре, опубликованном уже после ее смерти благодаря усилиям русского альголога Н.Н. Воронихина, приводится около 100 видов макроводорослей с описанием их экологии и биологии.

Организация Севастопольской биостанции как структурного подразделения Академии наук и руководство ею С.А. Зерновым вывело гидробиологические и альгологические работы на новый уровень. С этого времени начинается систематическое исследование флоры Черного моря. С.А. Зернов впервые описывает биоценозы Черного моря, один из которых – биоценоз филлофорного поля в северо-западной части – обнаружен в 1908 г. и носит имя его первооткрывателя. В указанной работе принимают участие два альголога – студент Харьковского Императорского университета Л.И. Волков и молодой преподаватель Санкт-Петербургского Императорского университета Н.Н. Воронихин, который в последующем опубликует несколько систематических сводок по водорослям Черного моря.

Роль исследователей из Санкт-Петербургского университета (К.Н. Декенбах, Н.Н. Воронихин, А.А. Еленкин, М.М. Голлербах) в изучении флоры Черного моря значительна [8]. Фактически в конце XIX и первой четверти XX века исследования проводились учеными из двух крупнейших университетов – Харьковского и Санкт-Петербурского.

В 1920-х гг. развиваются альгологические исследования на Новороссийской биологической станции, созданной В.М. Арнольди. Н.В. Морозова-Водяницкая [9; 10] дает описание флоры водорослей Новороссийской бухты. Обзор промысловых видов этой же бухты и их практическое использование приведены Е.С. Зиновой [11].

В 1950–1960 гг. фитобентос советского побережья Черного моря, используя водолазные и аэросъемки, исследует К.М. Петров [12–14], что позволило не только выявить видовой состав водорослей, но и оценить распределение водорослей в прибрежной зоне до глубин 10–15 м. Флору одесского берега и лиманов северо-запада описал И.И. Погребняк [15]. В 1950–1970-х гг. изучено видовое разнообразие болгарского побережья [16]. Побережье Румынии в 1930–1950-х гг. исследовала М. Челан (цит. по [5]).

Значительным событием стал выход монографии А.Д. Зиновой «Определитель зеленых, бурых и красных водорослей южных морей СССР» [4], где для Черного моря указано 277 видов водорослей, в том числе 77 зеленых, 71 бурых, 129 красных.

Монография А.А. Калугиной-Гутник [5] подводила определенную черту во флористических работах: для Черного моря приведено 292 вида водорослей-макрофитов, дана общая характеристика видового состава и фитоценозов Черного моря, показаны примеры практического использования бурых и зеленых водорослей в хозяйственной деятельности.

В 1970-х гг. В.В. Громовым [17] проведены многочисленные исследования Новороссийской, Геленджикской, Анапской бухт, шельфовой зоны северокавказского участка Черного моря. При этом В.В. Громов [17] разрабатывает новые методические подходы к исследованию водной растительности и еще раз доказывает эффективность применения легководолазного снаряжения в альгологических исследованиях. В 1980-х гг. В.В. Громов проводит масштабные исследования фитобентоса Азовского моря и Северного Каспия, выявляя видовой состав водорослей, исследуя особенности биологии и экологии отдельных видов.

В последние десятилетия проводится инвентаризация флоры конкретных участков шельфа. Исследовано видовое разнообразие азовского и черноморского прибрежий Крыма и Тамани [18–29]. Ф.П. Ткаченко [30] описывает видовой состав макрофитов Одесского залива, отмечая изменения в характере доминирующих фитоценозов. На Крымском полуострове проводится инвентаризация макрофитобентоса в сети прибрежных особо охраняемых природных территорий [22; 23; 25; 27]. В целом для побережья Крыма и Украины в настоящее время указано 239 видов макроводорослей [29; 31–34].

В 1990-е гг. произошел значительный прорыв в исследовании видового разнообразия морских водорослей Турции. По современным данным, в турецкой части Черного моря в настоящее время насчитывается более 300 видов макроводорослей, более половины из них принадлежат к отделу Rhodophyta [35–38].

С берегов Болгарии в настоящее время указано 165 видов макроводорослей, большинство из которых красные водоросли [16; 39].

Около 150 видов указано для побережья Румынии, но во флоре макроводорослей начинают доминировать зеленые водоросли, что связано с возрастанием опресняющего действия днепровских и дунайских вод [40].

Значимым событием в исследованиях флоры Черного моря была публикация обширной сводки под редакцией С.П. Вассера и П.М. Царенко, в которой приведены данные о разнообразии всех групп водорослей флоры Украины, насчитывающей 886 родов, объединяющих 4817 видов (6004 внутривидовых таксона) [41]. Авторами проведен критико-систематический анализ известных таксонов водорослей пресноводной и морской флоры, обобщены данные о разнообразии водорослей за 140-летний период их изучения (до конца 1990-х гг.), представлены 30 новых таксономических комбинаций. В обзоре приведен наиболее полный для того времени список литературы по альгофлоре Украины [41]. Важно отметить, что указанный чек-лист вышел в 2000 г., когда развитие Интернета было ограниченным, в свободном доступе отсутствовали крупные мировые или региональные альгологические базы данных. Этот выпуск журнала «Альгология» стал настольной книгой для всех альгологов причерноморских стран на последующее десятилетие.

В сводках последних лет для российского побережья Черного моря разные авторы указывают от 125 до 228 видов макрофитов [28; 34; 42; 43]. Наиболее изучен северо-восточный берег российского прибрежья, включая Новороссийскую и Геленджикскую бухты. Активные исследования северокавказского побережья проводились как в 1990-х гг., так и в последующие годы [42–50]. Н.А. Митяева с соавторами [50] для северо-восточного побережья Черного моря указывают 80 видов макроводорослей, из них 21 вид зеленых, 20 видов бурых и 39 видов красных водорослей. Для Новороссийской бухты приводится от 117 до 125 видов макроводорослей [43; 45; 46], при этом отмечается, что разнообразие некоторых групп водорослей увеличилось по сравнению с 1980-ми гг.

Флора макроводорослей северной части российского побережья – прибрежной зоны Таманского полуострова, Анапской банки, Керченского пролива, прилегающих лиманов – была подробно изучена в 1960-х гг. [12–14]. Современные исследования также частично или полностью охватывают этот район побережья [28; 43; 50–55]. Обзор исследования флоры водорослей прибрежной мелководной зоны, а также сообществ обрастаний и лиманов выполнен В.Н. Никитиной и О.А. Лисовской [51] и охватывает период 2002–2008 гг. – время активного хозяйственного освоения Таманского полуострова, но до начала масштабных преобразований в Большом Сочи. Авторами проведен эколого-флористический анализ макрофитобентоса верхней сублиторали Черного моря, дана характеристика таксономического состава флоры. В результате выявлено 150 видов макроводорослей, из которых 41 вид приводится впервые для рассматриваемого района. Детально исследованы сообщества растительных обрастаний гидротехнических сооружений, на малоизученном участке от порта Туапсе до р. Мзымта обнаружен 101 вид макрофитов, из них более трети для прикрепления использовали в качестве субстрата пирсы, молы, сваи и другие техногенные объекты в прибрежной зоне. Проведено ландшафтно-биономическое районирование исследованной акватории. Выделен новый флористический район – подводный склон северо-западной части побережья Колхиды [51].

В верхней сублиторали Черного моря в настоящее время происходит увеличение разнообразия зеленых водорослей, преимущественно мезосапробной группы. Особенно явно и быстро интенсивное развитие зеленых водорослей отмечается в районах Керченского пролива и Большого Сочи. Мезосапробные сообщества макроводорослей вытесняют олигосапробные и становятся доминирующими практически на всем протяжении российского прибрежья, в том числе на открытых участках [51; 53; 56].

Анализ фитогеографического состава флоры южных морей России [4; 5; 29; 53; 54; 57] показывает, что преобладают широкобореальные, нижнебореальные и бореально-тропические элементы. Еще в начале XX века С.М. Переяславцева, отмечая сходство флоры Черного моря с флорой Средиземного моря, разделила описываемые виды на космополиты, водоросли холодной и умеренной climatiческих зон. Доминантами не подверженных опреснению районов с твердыми субстратами являются виды рода *Cystoseira* – нижнебореальные виды, распространенные в Средиземном море. Альгофлора Черного моря имеет атлантическое происхождение и проникала в Черное море через Средиземное. В целом флора Черного моря – это обедненная флора Средиземного моря [4; 5; 57].

Фактор, определяющий возможность обитания макрофитобентоса, – доступные для колонизации твердые субстраты. Большинство макроводорослей закрепляется на твердых субстратах, некоторые виды способны активно занимать рыхлые грунты, но прикрепление все равно происходит к твердым субстратам (частицы песка, раковины, другие водоросли). Структура и пространственное распределение сообществ макрофитобентоса в зависимости от рельефа дна северокавказского побережья Черного моря изучены в работе У.В. Симаковой [58], которая показала, что основным фактором, влияющим на структуру сообществ макрофитобентоса верхней фитали (до глубин 7 м) в условиях грядового бенча, является рельеф дна, а не глубина. Именно это обуславливает неоднородности подводного полога и определяет распределение водорослей. У.В. Симакова [58] отмечает, что в макрофитобентосе северокавказского прибрежья Черного моря за последние 40 лет произошли существенные изменения: нижние границы существования глубоководных видов поднялись с 40–80 до 10–20 м, при этом биомасса филлофоры в зоне глубоководного пояса уменьшилась в 20 раз. Область существования переходного сообщества между цистозировым и филлофоровым поясами существенно сместилась с 12–18 м в 1960–1970-е гг. до 7–12 м в 2000-е. У.В. Симаковой [58] выдвигается предположение о том, что произошла трансформация экоклина в экотон с более высоким видовым богатством, но в более узкой зоне фитали.

Ранее было показано, что более 90 % (по биомассе и видовому разнообразию) бентосных многоклеточных водорослей сосредоточено на глубине от 0 до 30 м [4]. При этом доминантой подводных сообществ являются цистозировые водоросли. К.М. Хайловым с коллегами [59; 60] выявлена приуроченность талломов разных возрастов к определенным глубинам: с увеличением глубины растет доля возрастных талломов. На открытых участках прибрежья на глубине 1 м средний возраст талломов составляет 2–4 года, редко достигая 6 лет. На глубине 3–5 м средний возраст цистозир увеличивается до 4–7 лет. В защищенных от волнения бухтах и заливах возраст цистозировых водорослей может превышать 10 лет. В акваториях со значительной биогенной нагрузкой и интенсивной гидродинамикой отмечается уменьшение среднего возраста цистозировых водорослей на всем диапазоне глубин [59; 61], при этом наиболее интенсивное развитие водорослей обнаружено в прибойных местах с пологими скалистыми берегами, а также в местах с постоянным течением.

В Черном море нет выраженных приливов и отливов, поэтому выделяется особый черноморский тип литорали, делящийся на псевдолитораль и сублитораль. В настоящее время в Черном море отмечают 3 зоны литорали, супралитораль, псевдолитораль и сублитораль, разделенные на горизонты фотофильной и сциафильной растительности [4].

Сезонная динамика жизни водорослей является результатом взаимодействия нескольких факторов – эндогенных, обусловленных генетическими свойствами вида, жизненным циклом, возрастом растений, и экзогенных, определяемых географическим положением и условиями произрастания. С.М. Переяславцева впервые подразделила водоросли Черного моря на многолетние и однолетние виды, ею дана характеристика 68 видов с указанием местонахождения и степени обилия. Позже А.А. Калугина-Гутник [5] на основе собственных многолетних фенологических наблюдений за развитием водорослей Черного моря определила продолжительность вегетации для большинства черноморских видов, разделив их на однолетние, сезонные и многолетние виды.

В 1930-х гг. Н.В. Морозова-Водяницкая [62] впервые описала 10 основных растительных ассоциаций Черного моря, отметив, что донная растительность распространена до глубины 100 м. А.А. Калугиной-Гутник [5] выделено 40 основных ассоциаций подводной растительности, из них многолетних – 26, однолетних – 8, сезонных зимних – 4 и сезонных летних – 2. В.В. Громов [17] с использованием геоботанических методов предложил оригинальную классификацию растительности южных морей России, выделив 2 типа растительности – морских водорослей и трав, – в состав которых включил 160 ассоциаций. В последние годы развивается альтернативный метод выделения донных сообществ на основе подходов Браун-Бланке и синтаксономии [44].

А.А. Калугиной-Гутник [5] для советской части Черного моря выделено 11 гидроботанических районов. Каждый район характеризуется определенным сочетанием гидрологического и гидрохимического режимов вод, геоморфологическими особенностями береговой зоны и верхнего шельфа, и, конечно, своеобразием подводной флоры. Как показано позже [53], правомерность такого деления на гидроботанические районы сохраняется в настоящее время.

Комплексный фактор, оказывающий существенное влияние на состав и структуру подводных фитоценозов южных морей России, – антропогенное воздействие. До середины 1930-х гг. антропогенное воздействие на фитоценозы было относительно низким, хотя и тогда отмечались некоторые негативные явления, влияющие на рост и развитие водорослей [9; 10]. В 1950-е гг. большая часть прибрежных вод Черного моря относилась к мезотрофным. В 1970–1980-е гг. в результате химизации сельского хозяйства, развития портово-промышленных комплексов, интенсификации наливных и балкерных перевозок усилилась эвтрофикация, особенно в мелководной прибрежной части. Стали наблюдаться такие негативные явления, как красные приливы, гипоксия в придонном слое, снижение прозрачности вод. В 1988–1991 гг., в период массового развития вселенца гребневика-мнемиопсиса, экологическая обстановка обострилась по всей акватории Черного и Азовского морей.

Одним из последствий антропогенного воздействия является увеличение мутности воды. Эвфотическая зона в Черном море, в которой обитают макроводоросли, в последние десятилетия заметно уменьшается [17; 49; 63]. Отмечено, что на участке северо-восточного побережья от Геленджика до Туапсе растительность исчезает на глубине 9,5 м, а ширина зоны обитания водорослей в настоящее время составляет не более 500 м [58]. При сравнении результатов разных десятилетий выявлено, что биомасса видов рода *Cystoseira* на оптимальных для их роста глубинах практически не изменилась, однако ширина зарослей существенно уменьшилась в результате поднятия нижней границы фитоценоза с 20 до 10 м. В середине 1990-х гг. наблюдалось восстановление ранее трансформированных подводных сообществ с участием *Cystoseira*, что связывалось с улучшением экологической обстановки в регионе и высокой способностью *Cystoseira* к регенерации [63; 64].

По химическому составу море достаточно стабильная среда, но концентрация биогенных элементов возрастает вблизи крупных источников загрязнений, здесь развиваются специфические водорослевые сообщества с доминированием *Ulva*, *Cladophora*, *Ceramium* [4]. Предполагалось, что отмеченное увеличение ареала пластообразующей красной водоросли *Coccotylus truncatus* (Pallas) M.J. Wynne & J.N. Heine после 1951 г. связано с увеличением концентрации нитратов в северо-западной части Черного моря [65].

Среди основных признаков деградации биоценозов выделяются следующие: уменьшение видового разнообразия, проективного покрытия, биомассы, сокращение возрастного ряда, замещение многолетних видов на однолетние [4; 17; 51; 53; 64]. Адаптация фитоценозов с участием *Cystoseira* к эвтрофикации выражается в омоложении популяции, интенсификации метаболизма, уменьшении количества особей на единицу поверхности субстрата. При этом происходит освоение жизненного пространства видами с большей функциональной активностью. При увеличении антропогенной нагрузки идет замещение аборигенной растительности ассоциациями эфемероидных малопродуктивных видов, представителей родов *Acrosiphonia*, *Ulva*, *Ectocarpus*, *Cladophora*, *Chaetomorpha*, *Ceramium*, *Polysiphonia*, а также упрощение пространственной и иерархической структуры сообщества [59–61].

Виды рода *Cystoseira* относятся к многолетним медленно растущим олигосапробам, образующим в Черном море коренные фитоценозы. Большинство сопутствующих водорослей (*Polysiphonia*, *Ceramium*, *Laurencia*, *Callithamnion*, *Cladophora*, *Ulva*, *Sphacelaria* и др.) являются короткоживущими, поселяющимися под пологом видов *Cystoseira* или на их слоевищах. Одним из существенных показателей увеличения концентрации в прибрежных водах биогенных и органических веществ является изменение численности сопутствующих *Cystoseira* водорослей [4; 19]. Еще в 1920-е гг. на примере водорослей Новороссийской бухты было показано, что при приближении к источнику бытового загрязнения биомасса водорослей рода *Cystoseira* снижается, а биомасса эпифитных водорослей увеличивается [10], сходные изменения в сообществах водорослей рода *Cystoseira* описаны в 1970-е гг. [4] и в последние годы для открытых участков побережья [66] и для Новороссийской бухты [46; 55].

В начале XX века С.А. Зернов сделал научное открытие – обнаружил гигантское скопление красной водоросли филлофора с запасом 10 млн т. [67]. А.А. Калугиной-Гутник [5] в 1960-х гг. открыты три «малых поля» в Каркинитском заливе и одно в Каламитском заливе. Однако добыча филлофоры, преимущественно на филлофорном поле Зернова, проводилась без учета особенностей воспроизводства промысловых видов в условиях возросшего антропогенного воздействия, в результате чего запасы водорослей практически исчерпались [68–71]. Слабые процессы восстановления филлофорного поля Зернова отмечены в середине 2000-х гг. [70; 71], но восстановление былых промысловых запасов филлофоры к середине 2010-х гг. не произошло и в ближайшие десятилетия вряд ли возможно.

В последнее время в российской части Черного моря увеличиваются находки новых видов водорослей – представителей тепловодной флоры [31–33; 51; 64; 72; 73]. Водоросли рода *Sargassum*, выступающие конкурентом доминатам верхней сублиторали *Cystoseira barbata* и *C. crinita*, начинают появляться в российском секторе [43]. Вероятно, балластные воды судов являются источником различных инвазий, в том числе и водорослей холодноводного комплекса, в северо-западной части Черного моря. Пример – успешное вселение и акклиматизация в районе одесского прибрежья арктическо-бореальной бурой водоросли *Desmarestia viridis* (O.F. Müll.) J.V. Lamour., обнаруженной в 1990-х гг., которая с весны 2015 г. образует сообщество с новым северным вселенцем, представителем порядка Laminariales, – *Halosiphon tomentosus* (Lyngbye) Jaasund [72]. За 20 лет ареал *D. viridis* в Черном море незначительно увеличился за счет румынского сектора моря, но по-прежнему локализован на наиболее холодном участке Черного моря.

Восстановление нарушенных прибрежных фитоценозов зависит от характера биотопа. Антропогенному загрязнению сопутствует изменение субстрата – заиление и (или) полное погребение твердых субстратов. Показано, что быстрое восстановление зарослей водорослей идет на участках с высокой степенью прибойности, незначительными колебаниями солености воды и каменистым субстратом [21; 63]. Формирование сообществ цистозиры на искусственных субстратах у открытого прибрежья наиболее интенсивно происходит на глубине 2 м в течение трех лет, при этом практически всегда массово присутствует *Cystoseira barbata*, доля которой может доходить до 80 % от общей биомассы макрофитов [47; 63; 74].

Исследования реакции макрофитобентоса на загрязнение воды позволили использовать макроводоросли как индикатор качества морских вод. Н.В. Морозова-Водяницкая [10] провела пионерские санитарно-альгологические исследования на Черном море, предложив список водорослей – руководящих форм для биологического анализа морской воды. Показатели сильно загрязненных, полисапробных морских вод – *Ceramium virgatum*, *Callithamnion corymbosum*, *Ulva intestinalis*, *Cladophora rupestris*, *C. laetevirens*, *Bryopsis plumosa*, *Ulva rigida*, *Bangia fuscopurpurea*, *Porphyra leucosticta*, *Urospora penicilliformis*. В 1970–2000-х гг. проводились наблюдения за динамикой донной растительности в районе Севастопольской бухты и Южного берега Крыма, были предложены системы оценки сапробности по макроводорослям Черного моря [5]. Показано эффективное использование макроводорослей в биомониторинге загрязнения тяжелыми металлами вод Черного моря [74; 75]. Г.Г. Миничевой [76] использованы показатели поверхности бентосных водорослей для экспресс-диагностики трофо-сапробионтного состояния прибрежных экосистем. Отметим, что водоросли могут быть эффективными средством мониторинга нефтяного загрязнения в морских экосистемах [77]. Концепция Н.В. Морозовой-Водяницкой [10], объясняющая изменения фитобентоса южных морей России с ростом загрязнения морской среды, была активно использована в 1960–1980-х гг. В тот период деструкцию фитобентоса Черного моря связывали исключительно с антропогенной деятельностью – действием токсических веществ (тяжелых металлов, пестицидов, нефти), увеличением биогенной нагрузки и др. Такой взгляд на динамику изменений структуры фитосообществ среди исследователей преобладает и в настоящее время.

В последние годы увеличилось число работ природоохранной направленности. Так, на Украине на государственном и региональном уровне созданы Красные книги, включающие десятки видов макроводорослей и морских трав [78]. Специалисты Института биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН (Севастополь, Россия) обосновали концепцию сохранения сообществ морских макроводорослей путем создания охраняемых прибрежных участков [79]. Этот подход был реализован в 2010-х гг. в Крыму, где выделено более 15 охраняемых прибрежных акваторий с особым режимом [79].

В последние годы в исследованиях альгологов превалируют локальные флористические работы с описанием экологии и биологии отдельных видов. Отсутствие масштабных международных программ по проведению гидробиологических (альгологических) съемок с использованием морских судов и привлечением профессиональных водолазов, с точными привязками к координатам и спутниковым данным в определенной мере отбрасывает ученых на уровень возможностей первой половины XX века. В силу современных геополитических реалий оказались невозможными полномасштабные исследования филлофорного поля Зернова в северо-западном секторе Черного моря, стали труднодоступны для исследователей отдельные участки шельфа в Азовском и Черном море. Резко сократились работы по физиологии и биохимии макроводорослей. Практически отсутствуют молекулярно-генетические исследования морских водорослей и, соответственно, современная оценка видового разнообразия. Приостановилось создание доступной международной базы данных по морскому разнообразию Азовского и Черного морей. Для точной оценки многолетних изменений в макрофитобентосе Черного моря необходим поиск исторических и архивных материалов (гербарии, полевые дневники исследователей), которые содержат информацию с первичными данными и географическими привязками. Указанные проблемы свидетельствуют о необходимости интенсификации исследований морского макрофитобентоса всеми странами причерноморского региона.

Исследования выполнены в рамках реализации госзадания ЮНЦ РАН № AAAA-A18-118122790121-5 и проекта РФФИ 18-29-05078.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Minicheva G.G., Bolshakov V.N., Kalashnik E.S., Zotov A.B., Marinets A.V. 2018. Assessment of the reactions of algal communities to influence of climatic factors in the North-Western Black Sea ecosystem. *International Journal on Algae.* 20(2): 121–134. doi: 10.1615/InterJAlgae.v20.i2.20

2. Merzouka A., Johnson L.E. 2011. Kelp distribution in the northwest Atlantic Ocean under a changing climate. *J. of Exp. Mar. Biol. and Ecol.* 400(1–2): 90–98. doi: 10.1016/j.jembe.2011.02.020

3. *Очерки истории Севастопольской биологической станции – Института биологии южных морей (1871–2011)*. 2011. Севастополь, ЭКОСИ-Гидрофизика: 366 с.

4. Зинова А.Д. 1967. *Определитель зеленых, бурых и красных водорослей южных морей СССР.* М. – Л., Наука: 398 с.

5. Калугина-Гутник А.А. 1975. *Фитобентос Черного моря.* Киев, Наукова думка: 248 с.

6. Щербакова А.А., Базилевская Н.А., Калмыков К.Ф. 1983. *История ботаники в России (дарвиновский период, 1861–1917 гг.).* Новосибирск, Наука: 365 с.

7. Temniskova D., Stoyneva M.P., Kirjakov I.K. 2008. Red List of the Bulgarian algae. I. Macroalgae. *Phytologia Balcanica.* 14(2): 193–206.

8. Балашова Н.Б., Стрельникова Н.И. 2013. Альгология на кафедре ботаники Санкт-Петербургского государственного университета. *Вестник СПбГУ. Серия 3. Биология.* 3: 109–133.

9. Морозова-Водяницкая Н.В. 1927. Наблюдения над экологией водорослей Новороссийской бухты. В кн.: *Труды Кубано-Черноморского НИИ. Вып. 52.* Краснодар: 5–35.

10. Морозова-Водяницкая Н.В. 1930. Материалы к санитарно-биологическому анализу морских вод. В кн.: *Труды Новороссийской биологической станции. Вып. 4.* Новороссийск: 163–180.

11. Зинова Е.С. 1935. Водоросли Черного моря окрестностей Новороссийской бухты и их использование. В кн.: *Труды Севастопольской биологической станции. Вып. 4.* М., изд-во АН СССР: 136 с.

12. Петров К.М. 1960. Подводная растительность черноморского побережья Северного Кавказа и Таманского полуострова. I. *Вестник Ленинградского университета. Серия геологии и географии.* 18(3): 124–143.

13. Петров К.М. 1961. Подводная растительность черноморского побережья Северного Кавказа и Таманского полуострова. II. *Вестник Ленинградского университета. Серия геологии и географии.* 12(2): 116–134.

14. Петров К.М. 1961. Подводная растительность черноморского побережья Северного Кавказа и Таманского полуострова. III. Характеристика фитоценозов, обитающих в нижней сублиторали на каменистом грунте. Характеристика фитоценозов, обитающих на песчано-илистом и ракушечном грунтах. *Вестник Ленинградского университета. Серия геологии и географии.* 24(2): 90–98.

15. Погребняк И.И. 1965. *Донная растительность лиманов Северо-Западного Причерноморья и сопредельных им акваторий Черного моря. Автореф. дис. ... докт. биол. наук.* Одесса: 34 с.

16. Димитрова-Конаклиева С. 2000. *Флора на морските водорасли в България (Rhodophyta, Phaeophyta, Chlorophyta).* София, Pensoft: 304 с.

17. Громов В.В. 2012. *Макрофитобентос южных морей России. Водоросли северо-кавказского побережья Черного моря, прибрежно-водная растительность Азовского моря и Северного Каспия.* Рига, Palmarium Academic Publishing: 337 с.

18. Евстигнеева И.К. 1990. Некоторые аспекты структуры эпифитных компонентов цистозировых сообществ в Черном море. *Экология моря.* 34: 33–37.

19. Евстигнеева И.К. 1993. Видовой состав и количественная характеристика эпифитов *Cystoseira crinita* Bory. *Альгология.* 3(4): 52–57.

20. Евстигнеева И.К., Танковская И.Н. 2008. Макрофитобентос мелководья Западного Крыма. *Труды ЮгНИРО.* 46: 79–86.

21. Евстигнеева И.К., Танковская И.Н. 2010. Макрофитобентос прибрежного экотона юго-запада Крыма (Черное море). *Морской экологический журнал.* 9(4): 48–61.

22. Евстигнеева И.К., Танковская И.Н. 2016. Макроводоросли ландшафтно-геоморфологического района «Южный берег Крымского полуострова» (Черное море). В кн.: *Биоразнообразие и антропогенная трансформация природных экосистем: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной памяти профессора А.И. Золотухина (Балашов, 2–3 июня 2016 г.)*. Саратов, Саратовский источник: 72–80.

23. Маслов И.И. 2001. Фитобентос прибрежного аквального комплекса у мыса Ай-Тодор, Черное море (Украина). *Альгология*. 11(2): 194–201.

24. Маслов И.И., Белич Т.В., Садогурский С.Е. 1996. Виды водорослей-макрофитов, новые для Южного берега Крыма. В кн.: *Эколого-физиологические исследования водорослей и их значение для оценки состояния природных вод: Материалы научной конференции (Борок, 3–5 декабря 1996 г.)*. Ярославль: 64–65.

25. Садогурский С.Е. 2006. Макрофитобентос водоемов острова Тузла и прилегающих морских акваторий (Керченский пролив, Украина). *Альгология*. 16(3): 337–354.

26. Садогурский С.Е. 2007. К изучению макрофитобентоса у черноморского побережья Керченского полуострова (Крым). *Альгология*. 17(3): 345–360.

27. Садогурский С.Е., Белич Т.В. 2003. Современное состояние макрофитобентоса Опукского природного заповедника (Черное море). *Альгология*. 13(2): 185–202.

28. Лисовская О.А., Степаньян О.В. 2009. Разнообразие макроводорослей прибрежья Таманского п-ова в летний период. *Альгология*. 19(4): 341–348.

29. *Black Sea Monitoring Guidelines. Macrophytobenthos*. 2014. URL: http://emblasproject.org/wp-content/uploads/2013/12/Manual_macrophytes_EMBLAS_ann.pdf (дата обращения: 20.11.2019).

30. Ткаченко Ф.П. 2001. Макрофитобентос Одесского залива Черного моря и его динамика. *Альгология*. 11(1): 115–122.

31. Мильчакова Н.А. 2002. Бурые водоросли Черного моря: систематический состав и распространение. *Альгология*. 12(3): 324–337.

32. Мильчакова Н.А. 2003. Систематический состав и распространение зеленых водорослей-макрофитов (Chlorophyceae Wille s. l.) Черного моря. *Альгология*. 13(1): 70–82.

33. Мильчакова Н.А., Айзель В., Эрдуган Х. 2006. Систематический состав и распространение красных водорослей (Rhodophyceae, excl. Ceramiales) Черного моря. *Альгология*. 16(2): 227–245.

34. Мильчакова Н.А., Миронова Н.В., Рябогина В.Г. 2011. Морские растительные ресурсы. В кн.: *Промысловые биоресурсы Черного и Азовского морей*. Севастополь, ЭКОСИ-Гидрофизика: 117–139.

35. Aysel V., Erduğan H., Dural-Tarakçı B., Okudan E.Ş., Şenkardeşler A., Aysel F. 2004. Marine flora of Sinop (Black Sea, Turkey). *J. of Fisheries & Aquatic Sciences*. 21(1–2): 59–68.

36. Aysel V., Dural B., Şenkardeşler A., Erduğan H., Aysel F. 2008. Marine algae and seagrasses of Samsun (Black Sea, Turkey). *J. Black Sea/Mediter. Environment*. 14(1): 53–67.

37. Aysel V., Erduğan H. 1995. Checklist of Black Sea seaweeds. *Tr. J. of Bot.* 19: 545–554.

38. Güven K.C., Zeybek N., Cirik Ş. 1991. Studies on marine algae of Turkey in 1899–1990. *İ.Ü. Deniz Bilimleri ve Coğrafya Enstitüsü Bülteni Sayi*. 7: 51–81.

39. *National Report for Biological Diversity Conservation in Bulgaria*. 1998. URL: http://enrin.grida.no/biodiv/ru/nrcbd/bulgaria.pdf (дата обращения: 01.01.2019).

40. Bavaru A., Bologa S.A., Skolka H.V. 1991. A checklist of the benthic marine algae (except the Diatoms) along the Romanian shore of the Black Sea. *Rev. Roum. Biol.-Biol. Végét.* 36: 7–22.

41. Борисова Е.В., Бухтиярова Л.Н., Вассер С.П., Виноградова О.Н., Горбулин О.С., Дариенко Т.М., Догадина Т.В., Коваленко О.В., Крахмальный А.Ф., Леванец А.А., Лилицкая Г.Г., Масюк Н.П., Паламарь-Мордвинцева Г.М., Панина З.А., Петлеванный О.А., Ступина В.В., Царенко П.М. 2000. Разнообразие водорослей Украины. *Альгология*. 10(4): 3–310.

42. Теюбова В.Ф., Ефимова О.В. 2003. Макрофитобентос урезовой зоны Новороссийской бухты (Черное море) в условиях антропогенного воздействия. *Экология моря*. 64: 67–71.

43. Теюбова В.Ф., Мильчакова Н.А. 2011. Флористическое разнообразие макрофитов российского шельфа Черного моря (от м. Панагия до м. Видный). В кн.: *Состояние экосистем шельфовой зоны Черного и Азовского морей в условиях антропогенного воздействия: Сборник статей, посвященный 90-летию Новороссийской морской биологической станции им. профессора В.М. Арнольди*. Краснодар, КубГУ: 152–165.

44. Афанасьев Д.Ф., Абдуллин Ш.Р. 2014. Опыт анализа организации донной растительности российского шельфа Черного моря с использованием непрямой ординации. *Экология*. 1: 74–76. doi: 10.7868/S0367059714010028

45. Березенко Н.С. 2015. Эколого-таксономический состав макрофитобентоса района выпуска нефтесодержащих сточных вод ПНБ «Шесхарис» (Цемесская бухта, Черное море). *Фундаментальные исследования*. 6(2): 219–224.

46. Березенко Н.С., Литвинская С.А. 2014. Анализ изменений фитоценотической структуры макрофитобентоса в районе выпуска нефтесодержащих сточных вод. *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 3: 45–49.

47. Блинова Е.И. 2007. *Водоросли-макрофиты и травы морей европейской части России*. М., ВНИРО: 114 с.

48. Вилкова О.Ю. 2005. Распределение и состояние запасов цистозиры в российской части Черного моря. *Рыбное хозяйство*. 5: 70–71.

49. Максимова О.В., Лучина Н.П. 2002. Современное состояние макрофитобентоса у побережья Северного Кавказа: реакция фитали на эвтрофикацию Черноморского бассейна. В кн.: *Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря*. М., Наука: 297–308.

50. Митяева Н.А., Максимова О.В., Георгиев А.А. 2003. Флора макроводорослей северной части российского побережья Черного моря. *Экология моря*. 64: 24–28.

51. Никитина В.Н., Лисовская О.А. 2013. *Макрофитобентос верхних отделов береговой зоны российского побережья Черного моря*. СПб, СПбГУ: 132 с.

52. Stepanian O.V. 2009. Distribution of macroalgae and seaweed in the Azov Sea, Kerch Strait, and Taman Bay. *Oceanology*. 49(3): 361–367. doi: 10.1134/S0001437009030084

53. Stepanyan O.V. 2014. Modern biodiversity of macroalgae of the Sea of Azov, the Black Sea, and the Caspian Sea. *Doklady Earth Sciences*. 458(1): 1158–1160. doi: 10.1134/S1028334X14090220

54. Степаньян О.В. 2016. Как меняется фитобентос южных морей России? *Природа*. 2: 32–42.

55. Степаньян О.В. 2018. Макрофитобентос Новороссийской бухты (Черное море): деградация в условиях хозяйственной деятельности и климатических изменений. *Вестник КамчатГТУ*. 45: 110–116. doi: 10.17217/2079-0333-2018-45-110-116

56. Чумаков А.А., Никитина В.Н., Николаев П.М. 2000. К бентосной флоре водорослей-макрофитов Кавказского побережья Черного моря в районе Большого Сочи. *Вестник СПбГУ. Серия 3. Биология*. 4(27): 27–32.

57. Зинова А.Д., Калугина-Гутник А.А. 1974. Сравнительная характеристика флоры водорослей южных морей. В кн.: *Биологическая продуктивность южных морей*. Киев, Наукова думка: 43–51.

58. Симакова У.В. 2009. Влияние рельефа дна на сообщества цистозиры северо-кавказского побережья Черного моря. *Океанология*. 49(5): 725–733.

59. Хайлов К.М., Парчевский В.П. 1983. *Иерархическая регуляция структуры и функции морских растений*. Киев, Наукова думка: 254 с.

60. Хайлов К.М., Празукин А.В., Ковардаков С.А., Рыгалов В.Е. 1992. *Функциональная морфология морских многоклеточных водорослей*. Киев, Наукова думка: 280 с.

61. Ковардаков С.А., Празукин А.В., Фирсов Ю.К., Попов А.Е. 1985. *Комплексная адаптация цистозиры к градиентным условиям: научные и прикладные проблемы*. Киев, Наукова думка: 215 с.

62. Морозова-Водяницкая Н.В. 1959. Растительные ассоциации в Черном море. В кн.: *Труды Севастопольской биологической станции. Вып. 11*. М., изд-во АН СССР: 3–28.

63. Капков В.И., Сабурин М.Ю., Беленикина Ю.А., Блинова Е.И. 2005. Восстановление фитоценозов *Cystoseira crinita* (Phaeophyta) и динамика роста макрофитов на искусственных рифах. *Вестник Московского университета. Серия 16. Биология*. 2: 30–34.

64. Maximova O.V., Moruchkova N.A. 2005. Long-term anthropogenic transformation and contemporary state of the North Caucasian macrophytobenthos (Black Sea). *Oceanology*. 45(1): 168–175.

65. Возжинская В.Б., Камнев А.Н. 1994. *Эколого-биологические основы культивирования и использование морских донных водорослей*. М., Наука: 202 с.

66. Афанасьев Д.Ф., Камнев А.Н., Сеськова Д.В., Сушкова Е.Г. 2017. Сезонная динамика сообществ морских водорослей с доминированием *Cystoseira crinita* Duby, 1830 (Fucales: Phaeophyceae) в северо-восточной части Черного моря. *Биология моря*. 43(6): 393–402.

67. Степаньян О.В. 2019. Филлофорное поле Зернова: 110 лет открытию уникального биологического объекта в Черном море. *Природа*. 6: 62–70. doi: 10.7868/S0032874X19060085

68. Евстигнеева И.К., Нехорошев М.В. 2008. Морфо-функциональные особенности видов рода *Phyllophora* Grev. в условиях поля Зернова (Черное море). *Труды ЮгНИРО*. 46: 55–63.

69. Калугина-Гутник А.А., Евстигнеева И.К. 1993. Долговременная динамика видового состава и структуры донных фитоценозов филлофорного поля Зернова. *Экология моря*. 43: 90–97.

70. Ткаченко Ф.П., Третьяк И.П., Костылев Э.Ф. 2008. Макрофитобентос филлофорного поля Зернова в современных условиях (Черное море, Украина). *Альгология*. 18(4): 423–431.

71. Миничева Г.Г. 2007. Современная морфофункциональная трансформация сообщества макрофитов филлофорного поля Зернова. *Альгология*. 17(2): 171–190.

72. Миничева Г.Г. 2015. Новый вселенец в Черном море: бурая водоросль *Chorda tomentosa* Lyngb. *Альгология*. 25(3): 323–329. doi: 10.15407/alg25.03.323

73. Миничева Г.Г., Ерёменко Т.И. 1993. Альгологические находки в северо-западной части Чёрного моря. *Альгология*. 3(4): 83–87.

74. Капков В.И., Шошина Е.В., Беленикина В.А. 2016. Биоремедиация морских прибрежных экосистем: использование искусственных рифов. *Вестник МГТУ*. 19(1–2): 286–295. doi: 10.21443/1560-9278-2016-1/2-286-295

75. Камнев А.Н. 1989. *Структура и функции бурых водорослей*. М., МГУ: 200 с.

76. Миничева Г.Г. 1998. Использование показателей поверхности бентосных водорослей для экспресс-диагностики трофо-сапробионтного состояния прибрежных экосистем. *Альгология*. 8(4): 419–427.

77. Stepanyan O.V., Voskoboinikov G.M. 2006. Effect of oil and oil products on morphofunctional parameters of marine macrophytes. *Russian Journal of Marine Biology*. 32(1): 32–39. doi: 10.1134/S1063074006070042

78. *Червона книга України. Рослинний світ*. 2009. Київ, Глобалконсалтинг: 912 с.

79. *Морские охраняемые акватории Крыма: научный справочник*. 2015. Симферополь, Н. Оріанда: 312 с.

REFERENCES

1. Minicheva G.G., Bolshakov V.N., Kalashnik E.S., Zotov A.B., Marinets A.V. 2018. Assessment of the reactions of algal communities to influence of climatic factors in the North-Western Black Sea ecosystem. *International Journal on Algae*. 20(2): 121–134. doi: 10.1615/InterJAlgae.v20.i2.20

2. Merzouka A., Johnson L.E. 2011. Kelp distribution in the northwest Atlantic Ocean under a changing climate. *J. of Exp. Mar. Biol. and Ecol*. 400(1–2): 90–98. doi: 10.1016/j.jembe.2011.02.020

3. *Ocherki istorii Sevastopol'skoy biologicheskoy stantsii – Instituta biologii yuzhnykh morey (1871–2011)*. [*Essays on the history of the Sevastopol biological station-Institute of biology of the south seas (1871–2011)*]. 2011. Sevastopol, EKOSI-Gidrofizika: 366 p. (In Russian).

4. Zinova A.D. 1967. *Opredelitel' zelenykh, burykh i krasnykh vodorosley yuzhnykh morey SSSR*. [*Key to green, brown and red algae of the southern seas of the USSR*]. Moscow – Leningrad, Nauka: 398 p. (In Russian).

5. Kalugina-Gutnik A.A. 1975. *Fitobentos Chernogo morya*. [*Phytobenthos of the Black Sea*]. Kiev, Naukova dumka: 248 p. (In Russian).

6. Shcherbakova A.A., Bazilevskaya N.A., Kalmykov K.F. 1983. *Istoriya botaniki v Rossii (darvinovskiy period, 1861–1917 gg.).* [*History of botany in Russia (Darwin period, 1861–1917)*]. Novosibirsk, Nauka: 365 p. (In Russian).

7. Temniskova D., Stoyneva M.P., Kirjakov I.K. 2008. Red List of the Bulgarian algae. I. Macroalgae. *Phytologia Balcanica*. 14(2): 193–206.

8. Balashova N.B., Strelnikova N.I. 2013. [Algology at the Department of botany of Saint-Petersburg State University]. *Vestnik SPbGU. Seriya 3. Biologiya.* 3: 109–133. (In Russian).

9. Morozova-Vodyanitskaya N.V. 1927. [Observations on the ecology of algae in the Novorossiysk Bay]. In: *Trudy Kubano-Chernomorskogo NII. Vyp. 52.* [*Proceedings of the Kuban-Black Sea Research Institute. Iss. 52*]. Krasnodar: 5–35. (In Russian).

10. Morozova-Vodyanitskaya N.V. 1930. [Materials to sanitary and biological analysis of marine waters]. In: *Trudy Novorossiyskoy biologicheskoy stantsii.* [*Proceedings of the Novorossiysk Biological Station. Iss. 4*]. Novorossiysk: 163–180. (In Russian).

11. Zinova E.S. 1935. [Algae of the Black Sea in the vicinity of Novorossiysk Bay and their use]. In: *Trudy Sevastopol'skoy biologicheskoy stantsii. Vyp. 4.* [*Proceedings of the Sevastopol Biological Station. Iss. 4*]. Moscow, USSR Academy of Sciences: 136 p. (In Russian).

12. Petrov K.M. 1960. [Underwater vegetation of the Black Sea coast of the North Caucasus and the Taman Peninsula. I]. *Vestnik Leningradskogo universiteta. Seriya geologii i geografii.* 18(3): 124–143. (In Russian).

13. Petrov K.M. 1961. [Underwater vegetation of the Black Sea coast of the North Caucasus and the Taman Peninsula. II]. *Vestnik Leningradskogo universiteta. Seriya geologii i geografii.* 12(2): 116–134. (In Russian).

14. Petrov K.M. 1961. [Underwater vegetation of the Black Sea coast of the North Caucasus and the Taman Peninsula. III. Characteristics of phytocenoses that live in the lower sublittoral on stony ground. Characteristics of phytocenoses that live on sandy-silty and shell soils]. *Vestnik Leningradskogo universiteta. Seriya geologii i geografii.* 24(2): 90–98. (In Russian).

15. Pogrebnyak I.I. 1965. *Donnaya rastitel'nost' limanov Severo-Zapadnogo Prichernomor'ya i sopredel'nykh im akvatoriy Chernogo morya.* [*Bottom vegetation of estuaries of the North-Western Black Sea region and adjacent waters of the Black Sea. SciD Abstract*]. Odessa: 34 p. (In Russian).

16. Dimitrova-Konaklieva S. 2000. *Flora na morskite vodorasli v Blgariya (Rhodophyta, Phaeophyta, Chlorophyta).* [Flora of the marine algae in Bulgaria (Rhodophyta, Phaeophyta, Chlorophyta)]. Sofia, Pensoft: 304 p. (In Bulgarian).

17. Gromov V.V. 2012. *Makrofitobentos yuzhnykh morey Rossii. Vodorosli severo-kavkazskogo poberezh'ya Chernogo morya, pribrezhno-vodnaya rastitel'nost' Azovskogo morya i Severnogo Kaspiya.* [*Macrophytobenthos of the southern seas of Russia. Algae of the North Caucasus coast of the Black Sea, coastal vegetation of the Sea of Azov and the Northern Caspian*]. Riga, Palmarium Academic Publishing: 337 p. (In Russian).

18. Evstigneeva I.K. 1990. [Certain aspects of structure of epiphyte components from Cystoseira communities in the Black Sea]. *Ekologiya morya.* 34: 33–37. (In Russian).

19. Evstigneeva I.K. 1993. [Species composition and quantitative characteristics of *Cystoseira crinita* Bory epiphytes]. *Algologiya.* 3(4): 52–57. (In Russian).

20. Evstigneyeva I.K., Tankovskaya I.N. 2008. [Macrophytobenthos of the Western Crimea shallow waters]. *Trudy YugNIRO*. 46: 79–86. (In Russian).

21. Evstigneeva I.K., Tankovskaya I.N. 2010. [Macrophytobenthos of the coastal ecotone of the South-West of Crimea (Black Sea)]. *Morskoy ekologicheskiy zhurnal.* 9(4): 48–61. (In Russian).

22. Evstigneeva I.K., Tankovskaya I.N. 2016. [Macroalgae of the landscape-geomorphological region "Southern Coast of the Crimean Peninsula" (Black Sea)]. In: *Bioraznoobrazie i antropogennaya transformatsiya prirodnykh ekosistem: Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy pamyati professora A.I. Zolotukhina.* [*Biodiversity and anthropogenic transformation of natural ecosystems: Materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation, dedicated to the memory of Professor A.I. Zolotukhin (Balashov, Russia, 2–3 June 2016)*]. Saratov, Saratovskiy istochnik: 72–80. (In Russian).

23. Maslov I.I. 2001. [Phytobenthos of the coastal aquatic complex at Cape Ay-Todor, the Black Sea (Ukraine)]. *Algologiya*. 11(2): 194–201. (In Russian).

24. Maslov I.I., Belich T.V., Sadogursky S.E. 1996. [Macrophyte algae species new to the Southern Coast of Crimea]. In: *Ekologo-fiziologicheskie issledovaniya vodorosley i ikh znachenie dlya otsenki sostoyaniya prirodnykh vod: Materialy nauchnoy konferentsii.* [*Ecological and physiological studies of algae and their significance for assessing the state of natural waters: Materials of scientific conference ((Borok, Russia, 3–5 December 1996)*]. Yaroslavl: 64–65. (In Russian).

25. Sadogursky S.E. 2006. [Macrophytobenthos of the waters of the Tuzla Island and the adjacent sea areas (Kerch Strait, Ukraine)]. *Algologiya.* 16(3): 337–354. (In Russian).

26. Sadogursky S.E. 2007. [On the study of macrophytobenthos near the Black Sea coast of the Kerch Peninsula (Crimea)]. *Algologiya.* 17(3): 345–360. (In Russian).

27. Sadogursky S.E., Belich T.V. 2003. [The current state of the macrophytobenthos of the Opuksky Nature Reserve (Black Sea)]. *Algologiya*. 13(2): 185–202. (In Russian).

28. Lisovskaya O.A., Stepanyan O.V. 2009. [Biodiversity of macroalgae of the Taman Peninsula coast in summer]. *Algologiya.* 19(4): 341–348. (In Russian).

29. *Black Sea Monitoring Guidelines. Macrophytobenthos.* 2014. Available at: http://emblasproject.org/wp-content/uploads/2013/12/Manual_macrophytes_EMBLAS_ann.pdf (accessed 20 November 2019).

30. Tkachenko F.P. 2001. [Macrophytobenthos of the Odessa Bay of the Black Sea and its dynamics]. *Algologiya*. 11(1): 115–122. (In Russian).

31. Milchakova N.A. 2002. [Brown algae of the Black Sea: systematic composition and distribution]. *Algologiya.* 12(3): 324–337. (In Russian).

32. Milchakova N.A. 2003. [Systematic composition and distribution of green algae-macrophytes (Chlorophyceae Wille s. l.) of the Black Sea]. *Algologiya.* 13(1): 70–82. (In Russian).

33. Milchakova N.A., Aizel V., Erdugan H. 2006. [Systematic composition and distribution of red algae (Rhodophyceae, excl. Ceramiales) of the Black Sea]. *Algologiya.* 16(2): 227–245. (In Russian).

34. Milchakova N.A., Mironova N.V., Ryabogina V.G. 2011. [Marine plant resources]. In: *Promyslovye bioresursy Chernogo i Azovskogo morey. [Commercial bioresources of the Black and Azov seas]*. Sevastopol, EKOSI-Gidrofizika: 117–139. (In Russian).

35. Aysel V., Erduğan H., Dural-Tarakçı B., Okudan E.Ş., Şenkardeşler A., Aysel F. 2004. Marine flora of Sinop (Black Sea, Turkey). *J. of Fisheries & Aquatic Sciences*. 21(1–2): 59–68.

36. Aysel V., Dural B., Şenkardeşler A., Erduğan H., Aysel F. 2008. Marine algae and seagrasses of Samsun (Black Sea, Turkey). *J. Black Sea/Mediter. Environment*. 14(1): 53–67.

37. Aysel V., Erduğan H. 1995. Checklist of Black Sea seaweeds. *Tr. J. of Bot.* 19: 545–554.

38. Güven K.C., Zeybek N., Cirik Ş. 1991. Studies on marine algae of Turkey in 1899–1990. *I.Ü. Deniz Bilimleri ve Coğrafya Enstitüsü Bülteni Sayi*. 7: 51–81.

39. *National Report for Biological Diversity Conservation in Bulgaria*. 1998. Available at: http://enrin.grida.no/biodiv/ru/nrcbd/bulgaria.pdf (accessed 1 January 2019).

40. Bavaru A., Bologa S.A., Skolka H.V. 1991. A checklist of the benthic marine algae (except the Diatoms) along the Romanian shore of the Black Sea. *Rev. Roum. Biol.-Biol. Végét.* 36: 7–22.

41. Borisova E.V., Bukhtiyarova L.N., Vasser S.P., Vinogradova O.N., Gorbulin O.S., Darienko T.M., Dogadina T.V., Kovalenko O.V., Krakhmal'nyy A.F., Levanets A.A., Lilitskaya G.G., Masyuk N.P., Palamar'-Mordvintseva G.M., Panina Z.A., Petlevannyy O.A., Stupina V.V., Tsarenko P.M. 2000. [Biodiversity of algae of Ukraine]. *Algologiya*. 10(4). 3–310. (In Russian).

42. Teyubova V.F., Efimova O.V. 2003. [Macrophitobenthos of water-line region of the Novorossisk Bay (the Black Sea) in conditions of anthropogenic affecting]. *Ekologiya morya*. 64: 67–71. (In Russian).

43. Teyubova V.F., Mil'chakova N.A. 2011. [Floristic diversity of macrophytes of the Russian Black Sea shelf (from cape Panagiya to cape Vidnyy)]. In: *Sostoyanie ekosistem shel'fovoy zony Chernogo i Azovskogo morey v usloviyakh antropogennogo vozdeystviya: Sbornik statey, posvyashchennyy 90-letiyu Novorossiyskoy morskoy biologicheskoy stantsii im. professora V.M. Arnol'di. [State of ecosystems of the shelf zone of the Black and Azov seas under anthropogenic influence: Collection of articles dedicated to the 90th anniversary of the Novorossiysk Marine Biological Station named after Professor V.M. Arnoldi]*. Krasnodar, Kuban State University: 152–165. (In Russian).

44. Afanasyev D.F., Abdullin S.R. 2014. Experience in analyzing organization of bottom vegetation on the Russian Black Sea shelf using indirect ordination. *Russian Journal of Ecology*. 45(1): 80–82. doi: 10.1134/S1067413614010020

45. Berezenko N.S. 2015. [Ecological and taxonomic composition of macrophytobenthos of the oil-containing wastewater discharge area of the Sheskharis oil refinery (Tsemesskaya Bay, Black Sea)]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 6(2): 219–224. (In Russian).

46. Berezenko N.S., Litvinskaya S.A. 2014. [Analysis of changes in the phytocenotic structure of macrophytobenthos in the area of oil-containing wastewater discharge]. *Environmental protection in oil and gas complex*. 3: 45–49. (In Russian).

47. Blinova E.I. 2007. *Vodorosli-makrofity i travy morey evropeyskoy chasti Rossii. [Algae-macrophytes and grasses of the seas of the European part of Russia]*. Moscow, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography: 114 p. (In Russian).

48. Vilkova O.Yu. 2005. [Distribution and status of stocks cistozira in the Russian part of the Black Sea]. *Rybnoe khozyaystvo*. 5: 70–71. (In Russian).

49. Maksimova O.V., Luchina N.P. 2002. [The current state of macrophytobenthos of the coast of the North Caucasus: fitali's reaction to eutrophication of the Black Sea basin]. In: *Kompleksnye issledovaniya severo-vostochnoy chasti Chernogo morya. [Comprehensive research of the north-eastern part of the Black Sea]*. Moscow, Nauka: 297–308. (In Russian).

50. Mitjaseva N.A., Maximova O.V., Georgiev A.A. 2003. [Macrophytes of nothern part of Russian coast of the Black Sea]. *Ekologiya morya*. 64: 24–28. (In Russian).

51. Nikitina V.N., Lisovskaya O.A. 2013. *Makrofitobentos verkhnikh otdelov beregovoy zony rossiyskogo poberezh'ya Chernogo morya. [Macrophytobenthos of the upper parts of the coastal zone of the Russian Black Sea coast]*. St Petersburg, St Petersburg State University: 132 p. (In Russian).

52. Stepanian O.V. 2009. Distribution of macroalgae and seaweed in the Azov Sea, Kerch Strait, and Taman Bay. *Oceanology*. 49(3): 361–367. doi: 10.1134/S0001437009030084

53. Stepanyan O.V. 2014. Modern biodiversity of macroalgae of the Sea of Azov, the Black Sea, and the Caspian Sea. *Doklady Earth Sciences*. 458(1): 1158–1160. doi: 10.1134/S1028334X14090220

54. Stepanyan O.V. 2016. [How is the phytobenthos of the Southern seas of Russia changing?]. *Priroda*. 2: 32–42. (In Russian).

55. Stepanyan O.V. 2018. [Macrophytobenthos of the Novorossiysk Bay (the Black Sea): degradation under conditions of economic activity and climate changes]. *Vestnik KamchatGTU*. 45: 110–116. (In Russian).

56. Chumakov A.A., Nikitina V.N., Nikolaev P.M. 2000. [To the benthic flora of algae-macrophytes of the Caucasian coast of the Black Sea in the Greater Sochi region]. *Vestnik SPbGU. Seriya 3. Biologiya*. 4(27): 27–32. (In Russian).

57. Zinova A.D., Kalugina-Gutnik A.A. 1974. [Comparative characteristics of the algae flora of the south seas]. In: *Biologicheskaya produktivnost' yuzhnykh morey. [Biological productivity of the south seas]*. Kiev, Naukova dumka: 43–51. (In Russian).

58. Simakova U.V. 2009. Influence of the sea bottom relief on the *Cystoseira communities* of the North Caucasian coast of the Black Sea. *Oceanology*. 49(5): 672–680. doi: 10.1134/S0001437009050087

59. Khaylov K.M., Parchevskiy V.P. 1983. *Ierarkhicheskaya regulyatsiya struktury i funktsii morskikh rasteniy. [Hierarchical regulation of the structure and function of marine plants]*. Kiev, Naukova dumka: 254 p. (In Russian).

60. Khaylov K.M., Prazukin A.B., Kovardakov S.A., Rygalov V.E. 1992. *Funktsional'naya morfologiya morskikh mnogokletochnykh vodorosley. [Functional morphology of marine multicellular algae]*. Kiev, Naukova dumka: 280 p. (In Russian).

61. Kovardakov S.A., Prazukin A.V., Firsov Yu.K., Popov A.E. 1985. *Kompleksnaya adaptatsiya tsistoziry k gradientnym*

usloviyam: nauchnye i prikladnye problemy. [*The integrated adaptation of cystoseira to the gradient conditions: scientific and applied problems*]. Kiev, Naukova dumka: 215 p. (In Russian).

62. Morozova-Vodyanitskaya N.V. 1959. [Plant associations in the Black Sea]. In: *Trudy Sevastopol'skoy biologicheskoy stantsii. Vyp. 11.* [*Proceedings of the Sevastopol Biological Station. Iss. 11*]. Moscow, USSR Academy of Sciences: 3–28. (In Russian).
63. Kapkov V.I., Saburin M.Yu., Belenikina Yu.A., Blinova E.I. 2005. [Phytocenosis recovery of *Cystoseira crinita* (Phaeophyta) and seaweeds growth dynamics at the artificial reefs]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 16. Biologiya.* 2: 30–34. (In Russian).
64. Maximova O.V., Moruchkova N.A. 2005. Long-term anthropogenic transformation and contemporary state of the North Caucasian macrophytobenthos (Black Sea). *Oceanology.* 45(1): 168–175.
65. Vozzhinskaya V.B., Kamnev A.N. 1994. *Ekologo-biologicheskie osnovy kul'tivirovaniya i ispol'zovanie morskikh donnykh vodorosley.* [*Ecological and biological bases of cultivation and use of marine bottom algae*]. Moscow, Nauka: 202 p. (In Russian).
66. Afanasyev D.F., Kamnev A.N., Seskova D.V., Sushkova E.G. 2017. The seasonal dynamics of *Cystoseira crinita* Duby, 1830 (Fucales: Phaeophyceae)-dominated communities in the northeastern Black Sea. *Russian Journal of Marine Biology.* 43(6): 425–435. doi: 10.1134/S1063074017060025
67. Stepan'yan O.V. 2019. [Zernov phylophore field: 110 years of discovery of a unique biological object in the Black Sea]. *Priroda.* 6: 62–70. (In Russian). doi: 10.7868/S0032874X19060085
68. Evstigneeva I.K., Nekhoroshev M.V. 2008. [Morpho-functional features of Phyllophora Grev. genus species in conditions of Zernov field (the Black Sea)]. *Trudy YugNIRO.* 46: 55–63. (In Russian).
69. Kalugina-Gutnik A.A., Evstigneeva I.K. 1993. [Long-term dynamics of species composition and structure of bottom phytocenoses of the Zernov phyllophore field]. *Ekologiya morya.* 43: 90–97. (In Russian).
70. Tkachenko F.P., Tret'yak I.P., Kostylev E.F. 2008. [Macrofitobenthos of Phyllophora Zernov field in present conditions (Black Sea, Ukraine)]. *Algologiya.* 18(4): 423–431. (In Russian).
71. Minicheva G.G. 2007. [Contemporary morpho-functional transformation of the community of macrophytes of phyllophore field of Zernov]. *Algologiya.* 17(2): 171–190. (In Russian).
72. Minicheva G.G. 2015. [New invider in the Black Sea: brown algae *Chorda tomentosa* Lyngb.]. *Algologiya.* 25(3): 323–329. (In Russian). doi: 10.15407/alg25.03.323
73. Minicheva G.G., Eremenko T.I. 1993. [Algological finds in the North-Western part of the Black Sea]. *Algologiya.* 3(4): 83–87. (In Russian).
74. Kapkov V.I., Shoshina E.V., Belenikina V.A. 2016. [Bioremediation of marine coastal ecosystems: using artificial reefs]. *Vestnik MGTU.* 19(1–2): 286–295. (In Russian). doi: 10.21443/1560-9278-2016-1/2-286-295
75. Kamnev A.N. 1989. *Struktura i funktsii burykh vodorosley.* [*Structure and functions of brown algae*]. Moscow, Moscow State University: 200 p. (In Russian).
76. Minicheva G.G. 1998. [Use of benthic algae surface indicators for rapid diagnostics of the trophic-saprobiont state of coastal ecosystems]. *Algologiya.* 8(4): 419–427. (In Russian).
77. Stepanyan O.V., Voskoboinikov G.M. 2006. Effect of oil and oil products on morphofunctional parameters of marine macrophytes. *Russian Journal of Marine Biology.* 32(1): 32–39. doi: 10.1134/S1063074006070042
78. *Chervona kniga Ukraïni. Roslinniy svit.* [*Red Book of Ukraine. Flora*]. 2009. Kiev, Globalkonsalting: 912 p. (In Ukrainian).
79. *Morskie okhranyaemye akvatorii Kryma: nauchnyy spravochnik.* [*Marine protected areas of the Crimea: a scientific guide*]. 2015. Simferopol', N. Orianda: 312 p. (In Russian).

Поступила 22.10.2020

УДК 581.526.3(262.54)

БУРЫЕ ВОДОРОСЛИ РОДА *CYSTOSEIRA* В АЗОВСКОМ МОРЕ: ВСЕЛЕНИЕ ИЛИ РАСШИРЕНИЕ АРЕАЛА? [1]

© 2020 Степаньян О.В.

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, 344006, Россия;
e-mail: step@ssc-ras.ru

Поступила в редакцию 10.09.2019. После доработки 21.04.2020. Принята к публикации 11.05.2020.

В настоящее время типичные местообитания *Cystoseira* в Азовском море и Керченском проливе сосредоточены в южной части Таманского залива, на восточной части косы Тузла, в районе мыса Ахеллион и Керченского п-ова – между мысами Хрони и Казантип. Показано, что *Cystoseira* периодически наблюдается и в юго-западной части Азовского моря, чему способствует компенсационное придонное течение из Чёрного моря, которое при входе в Азовское море из Керченского пролива отклоняется на запад. В исследованиях 2014–2017 гг. обнаружена *Cystoseira barbata* в 2014 г. в районе мыса Зюк (пос. Курортное) и в 2017 г. у мыса Чаганы (пос. Золотое) в Казантипском заливе. В экспедициях 2018 г. в районе собственно мыса Казантип представители *Cystoseira* не обнаружены. Вероятно, их находки у мыса Казантип можно ожидать в ближайшее время, однако дальнейшее продвижение бурых водорослей будет ограничено рыхлыми грунтами. Условия Азовского моря являются для водорослей рода *Cystoseira* экологической границей ареала и для них характерна пульсация его границ. В Азовском море существуют факторы, вызывающие расширение ареала этих водорослей – увеличение солёности, прозрачности и температуры морской воды. Факторы, вызывающие сужение их ареала – уменьшение солёности, прозрачности воды и увеличение количества суровых зим с ледоставом. Водоросли рода *Cystoseira* являются хорошими биологическими индикаторами для многолетних наблюдений за изменениями гидрологического режима моря. Но считать их чужеродными видами в Азовское море вряд ли правомочно.

Ключевые слова: макроводоросли, Чёрное море, Азовское море, *Cystoseira*.

Введение

В Чёрном море отмечается несколько видов бурых водорослей рода *Cystoseira*, максимальное число (5 видов) отмечено для района Босфор – Синоп турецкого прибрежья [Aysel, Erduğan, 1995; Aysel et al., 1996, 2004, 2008]. Ряд исследователей [Шиганова и др., 2012] однозначно считают инвазией проникновение в Чёрное море средиземноморских видов макроводорослей, в том числе, представителей рода *Cystoseira*. Два вида – *Cystoseira barbata* и *C. crinita* относятся к многолетним водорослям и массовым видам верхней сублиторали Чёрного моря, которые формируют устойчивые сообщества – типичные биотопы, характерные для Чёрного и Средиземного морей [Калугина-Гутник, 1975]. Оба вида обладают широкой экологической пластичностью, однако *C. crinita* предпочитает глубины от 0.5 до 5 м, а *C. barbata* от 2.0 до 25 м. С начала 2000-х гг. отмечена устойчивая тенденция сокращения площадей и исчезновения указанных видов в российском прибрежье Чёрного моря [Митясева и др., 2003; Ткаченко, 2004; Блинова, 2007; Minicheva et al., 2010; Симакова, 2011; Milchakova, 2011; Громов, 2012; Никитина, Лисовская, 2013; Степаньян, 2014, 2016]. Причины этого явления не ясны, но, по всей видимости, они связаны с многолетним трендом увеличения температуры поверхностного слоя [Кукушкин и др., 2013] и одновременным уменьшением прозрачности в Чёрном море, в том числе из-за развития кокколитофорид [Микаэлян и др., 2011; Kontoyiannis et al., 2012], локально (в портах, бухтах и заливах) – с выемкой твёрдых субстратов и загрязнением морской воды поллютантами, прежде всего, нефтепродуктами [Степаньян, 2018]. Отметим, что в последнее время обитание *C. crinita* в Чёрном море оспаривается, и некоторые авторы счи-

[1] **Оригинальный текст:** *Степаньян О.В.* Бурые водоросли рода *Cystoseira* в Азовском море: вселение или расширение ареала? // Российский журнал биологических инвазий. 2020. № 2. С. 112–119.

тают этот вид эндемиком Средиземного моря и указывают, что в Чёрном обитает другой вид – *C. bosphorica* Sauvageau [Berov et al., 2015]. Тенденция изменений в распределении бурых водорослей в Северном полушарии носит глобальный характер [Merzouka, Johnson, 2011]. В то же время, проблема биологических инвазий, особенно видов, опасных для здоровья человека и экосистем, в том числе морских, стала в последние годы актуальной [Самые опасные…, 2018]

В наиболее подробном чек-листе А.А. Калугиной-Гутник [1975], составленном по данным сборов и литературным данным 1950–1970-х гг., водоросли рода *Cystoseira* для флоры Азовского моря не приведены, но отмечены для Прикерченского флористического района, в который входит и Керченский пролив, однако точных указаний о местонахождении *Cystoseira* нет. В ряде более поздних работ [Воловик и др., 2008; Громов, 2012] виды рода *Cystoseira* приведены для флоры Таманского залива (Керченский пролив) и Азовского моря, без указаний местонахождений водорослей. В.В. Громов [2000] прямо указывает водоросли рода *Cystoseira* как чужеродные виды для Азовского моря. Отметим, что данные водоросли относятся к бореально-тропическому комплексу и нередко встречаются в тропических и субтропических опреснённых эстуариях [Guiry, Guiry, 2019]. Однако, остаётся не ясным – являются ли они постоянными компонентами флоры Азовского моря.

Цель работы – выяснить насколько велико распространение жизнеспособных талломов по морской акватории, как различные факторы водной среды ограничивают распространение указанных водорослей.

Материал и методы

Собственный альгологический материал собран в Азовском и Чёрном (северо-кавказское прибрежье) морях, в Керченском проливе в летний период в 2005–2018 гг. Для качественной и количественной оценки распределения водорослей использовали стандартные гидробиологические методы [Громов, 1973]: гидробиологические разрезы (до глубины 10 м) и пробные площадки (рамка 0.25 м^2). Для анализа распределения водорослей использовали опубликованные данные [Волков, 1940; Генералова, 1951; Зинова, 1967; Калугина-Гутник, 1975; Миничева, Ерёменко, 1993; Aysel, Erduğan, 1995; Aysel et al., 1996, 2004, 2008; Садогурский, 2001, 2006, 2007; Мильчакова, 2003; Ткаченко, 2004; Костенко и др., 2005, 2009; Блинова, 2007; Воловик и др., 2008; Маслов, 2008; Теюбова, Мильчакова, 2011а, б; Milchakova, 2011; Никитина, Лисовская, 2013; Minicheva et al., 2014; Миничева и др., 2018; Guiry, Guiry, 2018; Садогурский и др., 2019]. Для установления статуса вселенца использовали шкалу основных признаков вида-вселенца, предложенную А.Ю. Звягинцевым с коллегами [2012] для морей Дальнего Востока, в том числе для прибрежных и эстуарных вод.

Результаты и их обсуждение

Выявлено, что, в настоящее время, типичные местообитания *Cystoseira* в Азовском море и Керченском проливе сосредоточены в южной части Таманского залива, на восточной части косы Тузла, мысе Ахеллион и Керченском п-ове – между мысами Хрони и Казантип (рис. 1). Отметим, что на Керченском п-ове береговая зона сложена известняками, а в прибрежной зоне Таманского п-ова и в Темрюкском заливе отмечается практически полное отсутствие твёрдых грунтов. Таким образом, расселение *Cystoseira* в основном направлено в юго-западную часть Азовского моря. По всей видимости, способствует их расселению компенсационное придонное течение из Чёрного моря, которое при входе в Азовское море из Керченского пролива отклоняется на запад. «Продвижение» этих водорослей происходит достаточно быстро. Так, в работе С.Е. Садогурского [2014] *Cystoseira barbata* отмечена в 2009 г. в районе пос. Осовины недалеко от мыса Хрони (45°25′25″ с. ш., 36°34′35″ в. д.), по которому проводится навигационная граница Керченского пролива. В наших исследованиях 2014–2017 гг. мы обнаружили *Cystoseira barbata* в 2014 г. в районе мыса Зюк (пос. Курортное, 45°28′54″ с. ш., 36°20′38″ в. д.) и в 2017 г. у

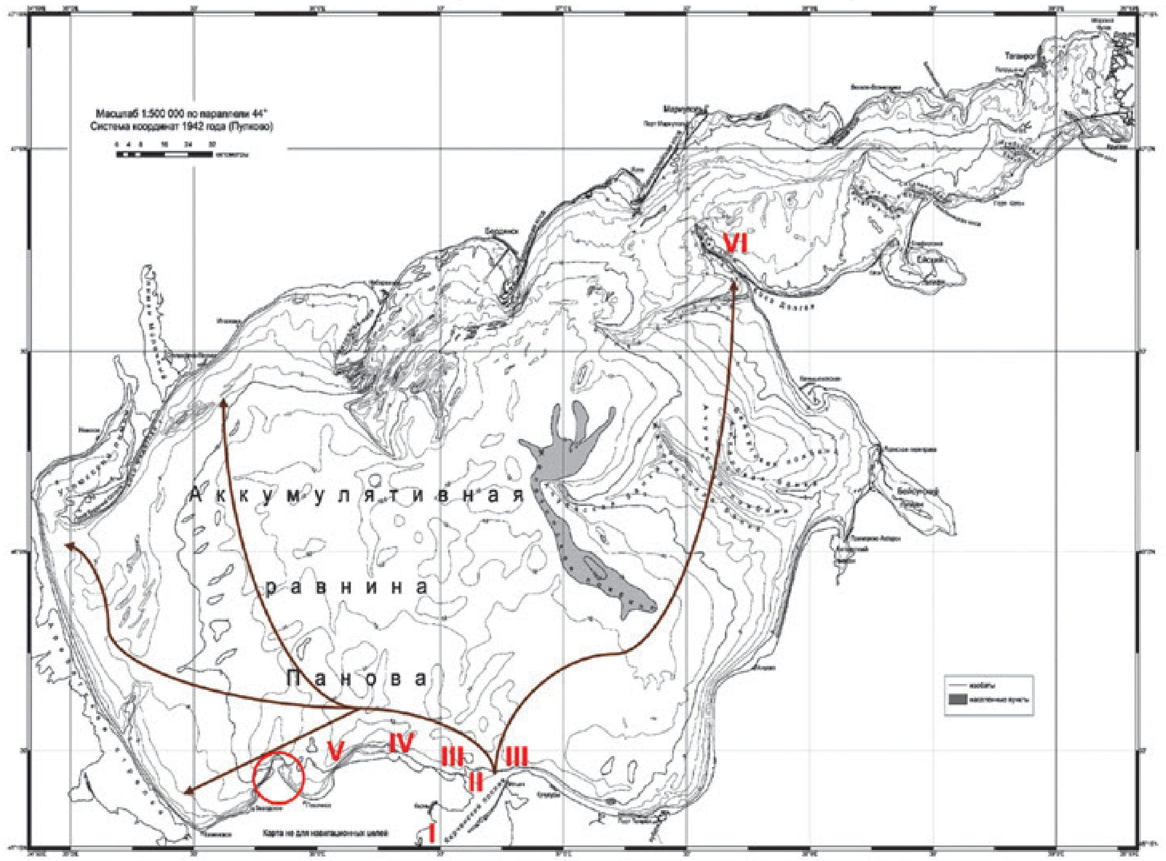


Рис. 1. Находки водорослей рода *Cystoseira* в Азовском море в 2009–2018 гг. I – местообитание в Керченском проливе (при солёности Азовского моря – 10–12‰). Местообитание на Керченском полуострове (при солёности Азовского моря – 14–15‰): II – мыс Хрони, III – мысы Хрони и Ахиллион, IV – мыс Зюк, V – мыс Чаганы, VI – находка на косе Долгая (апрель 2001 г.). Круг – возможные находки *Cystoseira* в ближайшие годы в районе мыса Казантип. Стрелки – вероятные пути проникновения водорослей.

мыса Чаганы (пос. Золотое, 45°26′12″ с. ш., 36°04′18″ в. д.) в Казантипском заливе. Хотя в последних экспедициях 2018 г. в районе собственно мыса Казантип водоросли рода *Cystoseira* не обнаружены, нет указаний на их находки и в крупном обобщении [Садогурский и др., 2019]. Но, вероятно, находки этих водорослей у мыса Казантип можно ожидать в ближайшее время, однако дальнейшее продвижение бурых водорослей будет ограничено рыхлыми грунтами Арабатской стрелки.

Рядом исследователей [Громов и др., 1991; Громов, 2000] водоросли рода *Cystoseira* отнесены к числу видов-вселенцев, проникших в Азовское море в конце 1980-х гг. Однако указанные водоросли отмечались ранее для этого района, причём В.Н. Дятлов [1968] указывает на обширные их заросли в азовоморской части Керченского п-ова (но без точной географической привязки и видового определения). В работах Л.И. Волкова [1940], собиравшего альгологический материал на Керченском п-ове в период с 1919 по 1925 г., и В.Н. Генераловой [1951], которая исследовала макрофитобентос в 1931–1934 гг., водоросли рода *Cystoseira* для Азовского моря не упомянуты.

В конце апреля 2001 г. автором среди выбросов макрофитов были обнаружены жизнеспособные со сформированными рецептакулами талломы *Cystoseira barbata f. hoffi* на оконечности косы Долгая (46°40′45″ с. ш., 37°43′48″ в. д.), находящейся в 150 км от Керченского пролива [Степаньян, 2009]. Наиболее вероятная причина находки водоросли в указанном месте – транспортировка талломов течениями от Керченского пролива и южного берега Керченского п-ова. На прилегающих акваториях подобных находок не было отмечено. Район от ст. Голубицкой до пос. Ачуево находится под влиянием пресного стока р. Кубань, и обитание *Cystoseira* в указанном районе в тот период исключено. Таким образом, наша находка свидетельствует о возможности вселения черноморских водорослей на большую часть акватории Азовского моря. Фактически, водоросли могут достигать Таганрогского залива, но вот их дальнейшая натурализация существенно зависит от ряда факторов морской среды.

В последние годы отмечено увеличение среднегодовой температуры воды Азовского и Чёрного морей на 2 °C [Кукушкин и др., 2012; Матишов и др., 2014а], для Азовского моря выявлены характерная цикличность периодов опреснения – осолонения, при этом в последние несколько лет отмечен существенный рост солёности, в среднем до 14.0‰, в районе Керченского пролива – до 15.0‰ [Дашкевич и др., 2017, фондовые материалы ЮНЦ РАН], а также увеличение прозрачности морской воды на большей части акватории Азовского моря [Сорокина, Кулыгин, 2013; фондовые материалы ЮНЦ РАН].

На наш взгляд, указанные факторы, в первую очередь увеличение солёности морской воды, приводят к расширению зоны расселения *Cystoseira* и проникновению их из Чёрного в Азовское море. Это способствует формированию новых прибрежных биотопов черноморского типа и влияет на продуктивность в юго-западной части Азовского моря. Однако, даже в условиях повышенной солёности Азовского моря, расселение *Cystoseira* будет ограничено наличием твёрдых субстратов для прикрепления и роста этих водорослей.

В ряде работ [Матишов и др., 2014а, б] отмечена тенденция увеличения числа суровых зим, что негативно сказывается на донной растительности мелководного Азовского моря. Ледовый припай, особенно в Керченском проливе, западной части Азовского моря и Таганрогском заливе, двигаясь под действием ветра, фактически «срезает» подводную растительность на глубину до 1 м. Этим обстоятельством, вероятно, можно объяснить исчезновение водорослей и отсутствие их в конкретных местообитаниях, после особо холодных зим. Например, такие суровые зимы были зафиксированы в 2003, 2008, 2012 и 2016 гг., когда вся акватория Азовского моря оставалась подо льдом свыше 100 дней. Даже в менее суровые зимы, когда на большей части акватории моря отмечается разреженный ледовый покров, при восточных ветрах, преобладающих в это время года, ледовые поля из центра и восточной части моря достаточно быстро двигаются в западную часть моря и могут образовывать в береговой зоне Керченского п-ова и на Арабатской стрелке скопления высотой более 2 м, при этом опускаясь на глубину до 1.5 м. Образование толстого припая и многометровых торосов в прибрежной зоне и их разрушительная деятельность для прибрежных экосистем делают Азовское море сходным с арктическими морями. Аналогичное воздействие оказывают экстремальные шторма, «перепахивающие» морское дно до глубины в 5 м и более, что способствует существенной перестройке донных сообществ [Костенко и др., 2009].

В северо-западной части (одесское и румынское побережья) Чёрного моря (выше 45° с. ш.), наиболее похожей по своим гидролого-гидрохимическим условиям на Азовское море, происходят сходные процессы освоения биотопов новыми видами бурых водорослей. Однако в эти районы активно проникают дальние вселенцы – водоросли холодноводного комплекса, причём, вероятный источник инвазий – балластные воды морских судов. Так, например, в 1990-х гг. в районе одесского, а затем и румынского прибрежья, отмечено успешное вселение и натурализация арктическо-бореальной бурой водоросли *Desmarestia viridis*, которая с весны 2015 г. образует новое сообщество с «северным» вселенцем, представителем порядка Laminariales – *Halosiphon tomentosus* (=*Chorda tomentosa*) [Миничева, Ерёменко, 1993; Minicheva, 2015].

На наш взгляд, условия Азовского моря являются экологической границей ареала для водорослей рода *Cystoseira*, и для этих водорослей характерна пульсация его границ. С.Е.

Садогурский [2014] на основе данных экспедиции на Керченском п-ове в 2009 г., отмечает: «Обнаружение новых для Азовского моря таксонов свидетельствует о дальнейшем продвижении в его предпроливные районы «черноморских» макрофитов». Сбор альгологического материала С.Е. Садогурским [2014] осуществлялся в то время, когда начался резкий рост солёности в Азовском море, однако, автор только фиксирует наличие *C. barbata* в исследованном районе, не комментируя возможность вселения этого вида бурых водорослей в Азовское море. А.И. Кафанов и В.А. Кудряшов [2000] приводят ряд примеров для некоторых видов морских макрофитов Дальнего Востока со сходными «пульсациями» ареала в приграничной области обитания. Расчётный вероятный статус вселенца (ВСВ), по методике А.Ю. Звягинцева с коллегами [2012], составляет 45%, что не позволяет считать данный вид в полной мере чужеродным.

Заключение

В Азовском море есть факторы окружающей среды, вызывающие расширение ареала водорослей рода *Cystoseira* – увеличение солёности, прозрачности и температуры морской воды; и факторы вызывающие сужение ареала – уменьшение солёности, прозрачности воды и увеличение количества суровых зим с ледоставом. Исследуемые водоросли являются хорошими биологическими индикаторами для многолетних наблюдений за изменениями гидрологического режима моря. Но считать представителей рода *Cystoseira* вселенцами (чужеродными видами) в Азовском море вряд ли правомочно.

Благодарности

Автор выражает благодарность анонимному рецензенту за ценные замечания.

Финансирование работы

Исследования проведены в рамках государственного задания № ААА-А-А18-118122790121-5 и проекта РФФИ 18-29-05078.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Соблюдение этических стандартов

Статья не содержит никаких исследований с участием животных в экспериментах, выполненных автором.

Литература

Блинова Е.И. Водоросли-макрофиты и травы морей европейской части России (флора, распространение, биология, запасы, марикультура). М.: ВНИРО, 2007. 114 с.

Волков Л.И. Материалы к флоре Азовского моря // Тр. Ростов. обл. биол. об-ва. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 1940. Вып. 4. С. 114–137.

Воловик С.П., Корпакова И.Г., Афанасьев Д.Ф., Федяева В.В., Громов В.В. Флора водных и прибрежно-водных экосистем Азово-Черноморского бассейна. Краснодар: ФГУП «Азниирх», 2008. 275.

Генералова В.Н. Водная растительность Утлюкского лимана и Арабатской стрелки в Азовском море // Тр. АзЧерНИРО, 1951. Вып.15. С. 131–338.

Громов В.В. Методика подводных фитоценотических исследований // Гидробиологические исследования северо-восточной части Черного моря. Ростов-на-Дону: Изд. РГУ, 1973. С. 69–72.

Громов В.В. Появление бурой водоросли *Cystoseira crinita* в Азовском море // Виды-вселенцы в европейских морях России. Тезисы докладов междунар. конфер. (г. Мурманск, 27–28 января 2000 г.). Мурманск: ММБИ КНЦ РАН, 2000. С. 31–32.

Громов В.В. Макрофитобентос южных морей России. Водоросли северо-кавказского побережья Чёрного моря, прибрежно-водная растительность Азовского моря и Северного Каспия. Саарбрюккен, Германия: Palmarium Academic Publishing, 2012. 337 с.

Громов В.В., Студеникина Е.И., Фроленко Л.Н., Шевченко В.Н. Особенности развития донных биоценозов в прибрежной зоне Азовского моря // Тез. докл. 6 съезда Всесоюз. гидробиол. общества (г. Мурманск, 8–11 октября 1991 г.). Мурманск: Полярная Правда, 1991. Ч. 1. С. 45–46.

Дашкевич Л.В., Бердников С.В., Кулыгин В.В. Многолетнее изменение средней солёности Азовского моря // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 5. С. 563–572.

Дятлов В.Н. К сезонной динамике зообентоса псевдолиторали Азовского моря // Гидробиол. журн. 1968. Т. 4. № 2. С. 58–61.

Звягинцев А.Ю., Ивин В.В., Кашин И.А., Бегун А.А., Городков А.Н. Чужеродные виды в Дальневосточном морском государственном природном биосферном заповеднике // Известия ТИНРО. 2012. Т. 170. С. 60–81.

Зинова А.Д. Определитель зелёных, бурых и красных водорослей южных морей СССР. М; Л.: Наука, 1967. 398 с.

Калугина-Гутник А.А. Фитобентос Чёрного моря. Киев: Наукова думка, 1975. 248 с.

Кафанов А.И., Кудряшов В.А. Морская биогеография. М.: Наука, 2000. 176 с.

Костенко Н.С., Дикий Е.А., Заклецкий А.А., Марченко В.С. Многолетние изменения в сообществах макрофитобентоса района Карадага (Крым, Чёрное море) // Морской экологический журнал. Отдельный выпуск. 2005. 1. С. 48–60.

Костенко Н.С., Дикий Е.А., Заклецкий А.А., Марченко В.С. Воздействие экстремальных штормов на прибрежную донную растительность Карадагского природного заповедника Национальной академии наук Украины // Сб. науч. трудов, посвящ. 95-летию Карадагской науч. станции и 30-летию Карадагского природного заповедника Национальной академии наук Украины. Севастополь: Экоси-Гидрофизика, 2009. С. 327–343.

Кукушкин А.С. Прохоренко Ю.А., Хорошун С.А. Многолетняя изменчивость прозрачности вод в шельфовых и глубоководных районах Чёрного моря в XX столетии // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2013. № 27. С. 243–248.

Маслов И.И. Альгофлора заповедных морских акваторий Крымского полуострова: макрофитобентос // Фундаментальные и прикладные проблемы ботаники в начале XXI века. Мат. всероссийской конференции (Петрозаводск, 22–27 сентября 2008 г.). Часть 2: Альгология. Микология. Лихенология. Бриология. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2008. С. 60–62.

Матишов Г.Г., Бердников С.В., Жичкин А.П., Макаревич П.Р., Дженюк С.Л., Кулыгин В.В., Яицкая Н.А., Поважный В.В., Шевердяев И.В., Третьякова И.А., Цыганкова А.Е. Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878–2013). Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2014а. 256 с.

Матишов Г.Г., Чикин А.Л., Дашкевич Л.В., Кулыгин В.В., Чикина Л.Г. Ледовый режим Азовского моря и климат в начале XXI века // Доклады АН. 2014б. Т. 457. № 5. С. 603–607.

Микаэлян А.С., Силкин В.А., Паутова Л.А. Развитие кокколитофорид в Чёрном море: межгодовые и многолетние изменения // Океанология. 2011. Т. 51. № 1. С. 45–53.

Мильчакова Н.А. Бурые водоросли Чёрного моря: систематический состав и распространение // Альгология. 2002. Т. 12. № 3. С. 324–337.

Мильчакова М.А. Макрофитобентос // Современное состояние биоразнообразия прибрежных вод Крыма (черноморский сектор). Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. С. 152–208.

Миничева Г.Г., Большаков В.Н., Калашник Е.С., Зотов А.Б., Маринец А.В. Оценка реакции альгосообществ черноморских экосистем на воздействие климатических факторов // Альгология. 2018. Т. 28. № 2. С. 121–135.

Миничева Г.Г., Ерёменко Т.И. Альгологические находки в северо-западной части Чёрного моря // Альгология. 1993. Т. 3. № 4. С. 83–87.

Митясева Н.А., Максимова О.В., Георгиев А.А. Флора макроводорослей северной части российского побережья Чёрного моря // Экология моря. 2003. Вып. 64. С. 24–28.

Никитина В.Н., Лисовская О.А. Макрофитобентос верхних отделов береговой зоны российского побережья Чёрного моря // Труды СПб об-ва естествоиспыт. Сер. 3. Т. 81. СПб.: СПбГУ, 2013. 132 с.

Садогурский С.Е. К изучению макрофитобентоса заповедных акваторий Каркинитского залива (Чёрное море) // Альгология. 2001. Т. 11. № 3. С. 342–357.

Садогурский С.Е. Макрофитобентос водоёмов острова Тузла и прилегающих морских акваторий (Керченский пролив, Украина // Альгология. 2006. 16(3). С. 337–354.

Садогурский С.Е. К изучению макрофитобентоса у черноморского побережья Керченского полуострова (Крым) // Альгология. 2007. Т. 17. № 3. С. 345–360.

Садогурский С.Е. Макрофитобентос у берегов Осовинской степи (Азовское море – Керченский пролив, Украина) // Альгология. 2014. Т. 24. № 1. С. 75–93.

Садогурский С.Е. Белич Т.В., Садогурская С.А. Макрофиты прибрежно-морских акваторий природных заповедников Крымского полуострова (Чёрное и Азовское моря) // Альгология. 2019. Т. 29. № 3. С. 322–351.

Самые опасные инвазионные виды России (ТОП-100) / Ред. Ю.Ю. Дгебуадзе, В.Г. Петросян, Л.А. Хляп. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2018. 688 с.

Симакова У.В. Структура и распределение сообществ макрофитобентоса в зависимости от рельефа дна (Северокавказское побережье Чёрного моря): Автореф. дис. … канд. биол. наук. М., 2011. 27 с.

Сорокина В.В., Кулыгин В.В. Долговременная изменчивость относительной прозрачности вод Азовского моря // Океанология. 2013. Т. 53. № 3. С. 324–331.

Степаньян О.В. Распределение макроводорослей и морских трав Азовского моря, Керченского пролива и Таманского залива // Океанология. 2009. Т. 49. № 3. С. 393–399.

Степаньян О.В. Современное разнообразие макроводорослей Азовского, Чёрного и Каспийского морей // Доклады АН. 2014. Т. 458. № 2. С. 229–232.

Степаньян О.В. Как меняется фитобентос южных морей России? // Природа. 2016. № 2. С. 32–42.

Степаньян О.В. Макрофитобентос Новороссийской бухты (Чёрное море): деградация в условиях хозяйственной деятельности и климатических изменений // Вестник КамчатГТУ. 2018. № 45. С. 110–116.

Теюбова В.Ф., Мильчакова Н.А. Флористическое разнообразие макрофитов российского шельфа Чёрного моря (от м. Панагия до м. Видный) // Состояние экосистем шельфовой зоны Чёрного и Азовского морей в условиях антропогенного воздействия. Сб. статей, посвящ. 90-летию Новороссийской морской биол. станции им. проф. В.М. Арнольди. Краснодар: КубГУ, 2011а. С. 152–165.

Теюбова В.Ф., Мильчакова Н.А. Эколого-фитоценотическая структура макрофитобентоса открытого прибрежья Чёрного моря (от м. Панагия до м. Видный) / Состояние экосистем шельфовой зоны Чёрного и Азовского морей в условиях антропогенного воздействия. Сб. статей, посвящ. 90-летию Новороссийской морской биол. станции им. проф. В.М. Арнольди. Краснодар: КубГУ, 2011б. С. 165–178.

Ткаченко Ф.П. Видовой состав водорослей-макрофитов северо-западной части Чёрного моря (Украина) // Альгология. 2004. Т. 14. № 3. С. 277–293.

Шиганова Т.А., Мусаева Э.И., Лукашова Т.А., Ступникова А.Н., Засько Д.Н., Анохина Л.Л., Сивкович А.Е., Гагарин В.И., Булгакова Ю.В. Увеличение числа находок средиземноморских видов в Чёрном море // Российский журнал биологических инвазий. 2012. № 3. С. 61–99.

Aysel V., Dural B., Şenkardeşler A., Erduğan H., Aysel F. Marine algae and seagrasses of Samsun (Black Sea, Turkey) // J. Black Sea/Mediterranean Environment. 2008. Vol. 14. P. 53–67.

Aysel V., Erduğan H. Checklist of Black Sea seaweeds // Tur. J. of Bot. 1995. Vol. 19. P. 545–554.

Aysel V., Erduğan H., Dural-Tarakçı B., Okudan E.Ş., Şenkardeşler A., Aysel F. Marine flora of Sinop (Black Sea, Turkey) // J. of Fisheries/Aquatic Sciences. 2004. Vol. 21. No. 1–2. P. 59–68.

Aysel V., Erduğan H., Sukatar A., Güner H., Öztürk M. Marine algae of Bartın // Tur. J. of Bot. 1996. Vol. 20. P. 251–258.

Berov D., Ballesteros E., Sales M., Verlaque M. Reinstatement of species rank for *Cystoseira bosphorica* Sauvageau (*Sargassaceae, Phaeophyceae*) // Cryptogamie, Algologie. 2015. Vol. 36. No. 1. P. 65–80.

Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. 2018. (Электронный ресурс) // (http://www.algaebase.org). Searched on 21 August 2019.

Kontoyiannis H., Papadopoulos V., Kazmin A., Zatsepin A., Georgopoulos D. Climatic variability of the sub-surface sea temperatures in the Aegean-Black Sea system and relation to meteorological forcing // Climate Dynamics. 2012. Vol. 39. P. 1507–1525.

Merzouka A., Johnson L.E. Kelp distribution in the northwest Atlantic Ocean under a changing climate // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 2011. Vol. 400. No. 1–2. P. 90–98.

Milchakova N.A. Marine Plants of the Black Sea. An Illustrated Fied Guide. Sevastopol: DigitPrint, 2011. 144 pp.

Minicheva G. Finding of alien brown macroalgae *Chorda tomentosa* Lyngb. in the Ukrainian Black Sea coast // J. Black Sea/Mediterranean Environment. 2015. Vol. 21. No. 2. P. 227–231.

Minicheva G., Afanasyev D., Kurakin A. Black Sea Monitoring Guidelines. Macrophytobenthos. 2014 (Электронный документ) // (http://emblasproject.org/wp-content/uploads/2013/12/Manual_macrophytes_EMBLAS_ann.pdf). Проверено 26.01.2020.

Minicheva G.G., Bolshakov V.N., Zotov A.B. The response of autotrophic communities of the northwestern Black Sea to the variability of climatic factors // J. Environ. Protect. Ecol. 2010. Vol. 3. No. 11. P. 1046–1054.

BROWN ALGAE OF THE GENUS CYSTOSEIRA IN THE SEA OF AZOV: SETTLING OR EXPANSION OF THE RANGE?

© 2020 Stepanyan O.V.

Federal Research Centre, the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, 344006, Russia;
e-mail: step@ssc-ras.ru

Currently, the habitats of *Cystoseira* in the Sea of Azov and Kerch Strait are concentrated in the southern part of the Gulf of Taman on the east part of Tuzla, Cape Achillion and Kerch Peninsula – between Cape Khroni and Kazantip. It is shown that the main vector of *Cystoseira* settlement is directed to the southern-western part of the Sea of Azov, which is facilitated by the compensatory bottom current from the Black Sea, which at the entrance to the Sea of Azov from the Kerch Strait deviates to the west. In studies 2014–2017, *Cystoseira barbata* was discovered in 2014 in the area of Cape Zyuk (village Kyrortnoe) and in 2017 at Cape Chagani (village Zolotoe) in the Kazantipsky Gulf. In expeditions of 2018 in the area of the actual Cape Kazantip representatives of *Cystoseira* were not detected. Probably, the findings of *Cystoseira* at Cape Kazantip can be expected in the near future, but further progression of brown algae will be limited to loose soils. Conditions of the Sea of Azov are an ecological boundary of the range of the genus *Cystoseira*, and for these algae pulsation of the range border is characteristic. Factors that cause the expansion of the range of algae of the genus *Cystoseira* in the Sea of Azov are an increase in salinity, transparency and temperature of the sea water. The factors causing the narrowing of the *Cystoseira* range in the Sea of Azov are a decrease in salinity, water transparency and an increase in the number of severe winters with ice. Algae of the genus *Cystoseira* are good biological indicators for long-term observations of changes in the hydrological regime of the sea. But to consider them invaders in the Sea of Azov is hardly competent.

Keywords: macroalgae, Black Sea, Sea of Azov, *Cystoseira*.

УДК 593.8(262.54)
DOI: 10.7868/S25000640200307

СОСТОЯНИЕ ЖЕЛЕТЕЛОГО МАКРОЗООПЛАНКТОНА АЗОВСКОГО МОРЯ В 2018–2019 гг.[1]

© 2020 г. В.В. Саяпин[1]

Аннотация. Приведены данные о состоянии азовоморских псевдопопуляций гребневиков-вселенцев *Mnemiopsis leidyi* A. Agassiz, 1865 и *Beroe ovata* Bruguière, 1789 в 2018 и 2019 гг. Показаны особенности в характере распределения биомассы этих видов в указанный период. Отмечено смещение на более ранний срок захода *M. leidyi* и *B. ovata* в Азовское море по сравнению с литературными данными. Высказано предположение о его связи с повышением среднегодовых температур воды в северо-восточной части Черного моря.

Ключевые слова: Азовское море, северо-восточная часть Черного моря, Таганрогский залив, желетелый макрозоопланктон, ктенофоры-вселенцы, биомасса.

CONDITIONS OF THE GELATINOUS MACROZOOPLANKTON COMMUNITY OF THE SEA OF AZOV IN 2018–2019

V.V. Sayapin[1]

Abstract. The article presents data on the state of the pseudopopulations of non-indigenous ctenophores *Mnemiopsis leidyi* (Agassiz, 1865) and *Beroe ovata* Bruguière, 1789 in the Sea of Azov in 2018 and 2019. The peculiarities of these species' biomass distribution in the studied period are shown. A shift of the *M. leidyi* and *B. ovata* penetration into the Sea of Azov to an earlier date is noted, compared with published data. A suggestion is made that it is associated with an increase in average annual water temperatures in the northeastern Black Sea.

Keywords: the Sea of Azov, northeastern part of the Black Sea, the Taganrog Bay, gelatinous macrozooplankton, non-indigenous ctenophores, biomass.

ВВЕДЕНИЕ

Желетелый макрозоопланктон в морских экосистемах юга России занимает верхние звенья пищевой цепи наряду с планктоноядными рыбами и является их главным конкурентом, поэтому изменения в его качественных и количественных характеристиках сказывается на состоянии всей биоты, включая прибрежные районы. Доминирование определенного вида этой группы определяет характер функционирования планктонных сообществ.

В Азовском море не образуется постоянных популяций видов, составляющих основу желетелого макрозоопланктона. Каждый год происходит заход этих видов из Черного моря.

Начиная с 2000-х гг. наибольшую роль в сообществе желетелого макрозоопланктона играют два вида гребневиков-вселенцев – *Mnemiopsis leidyi* A. Agassiz, 1865 и *Beroe ovata* Bruguière, 1789. Соответственно, от биологических особенностей этих видов, таких как диапазон температур обитания, выбор пищевых объектов и интенсивность питания, зависит состояние всего зоопланктонного сообщества водоема. Большое влияние оказывает ежегодный сценарий освоения Азовского моря каждым из этих видов, так как им определяется продолжитель-

[1] Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: sayapin@ssc-ras.ru

[1] **Оригинальный текст:** *Саяпин В.В.* Состояние желетелого макрозоопланктона Азовского моря в 2018–2019 гг. // Наука Юга России. 2020. Т. 16. № 3. С. 62–68.

ность периода интенсивного потребления кормового зоопланктона гребневиком *Mnemiopsis leidyi*.

Традиционно выделяют два сценария проникновения *Mnemiopsis leidyi* в Азовское море: ранний и поздний. При раннем сценарии первые особи встречаются уже в мае, в июне этот вид распространен широко, а к июлю он осваивает всю акваторию водоема до изогалины 3 ‰. При позднем сценарии заселение видом моря начинается в июне, а полное освоение акватории происходит к августу [1–4].

Заход *Beroe ovata* в Азовское море, согласно литературным источникам [3], начинается в конце лета – начале осени. Основную акваторию Азовского моря этот вид осваивает к середине – концу осени и остается в воде до ноября – декабря, после чего погибает [3].

Подобная же картина наблюдалась и нами в 2012–2014 гг. Так, в 2012 г. в ходе летних исследований в конце июня – первой декаде июля *M. leidyi* был отмечен на четырех станциях в прикерченском районе, в августе – на большей части акватории Азовского моря (восточная граница его распространения проходила в западной части Таганрогского залива), а *B. ovata* был обнаружен только в прикерченском районе. На тех станциях, где присутствовал *B. ovata*, *M. leidyi* не зарегистрирован. В октябре 2012 г. в Азовском море были отмечены оба вида гребневиков; граница распространения *B. ovata* проходила северо-восточнее места впадения р. Кубань, *M. leidyi* освоил всю акваторию Азовского моря вплоть до восточной части Таганрогского залива [5].

В мае 2013 г. в акватории водоема гребневики нами отмечены не были, а в июле присутствовал только *M. leidyi* [5].

В июне 2014 г. гребневики-вселенцы в Азовском море не зарегистрированы. В сентябре 2014 г. вся исследованная акватория собственно Азовского моря и устьевая часть Таганрогского залива были полностью заняты *B. ovate*, тогда как *M. leidyi* остался лишь в самом заливе. Это указывает на более ранний заход *B. ovata* в Азовское море, чем в 2012 г. [5].

Таким образом, в 2012–2014 гг. заход *M. leidyi* в Азовское море происходил по позднему сценарию. *Beroe ovata* также вселялся в водоем в сроки, указанные предыдущими исследователями, то есть в конце лета – начале осени [3]. Однако в 2018–2019 гг. наблюдаемая картина несколько отличалась. Полученные данные позволяют предположить, что освоение *B. ovate* акватории моря происходило в начале – середине лета, что существенно уменьшает временной интервал между появлением двух видов гребневиков. Соответственно, может сократиться период, в течение которого зоопланктонное сообщество испытывает наибольшее влияние со стороны *M. leidyi.* Но при этом возможно смещение сроков захода последнего в Азовское море на более ранний сезон – середину весны, что может оказать негативное влияние на развитие кормового зоопланктона и, как следствие, на условия нагула рыб-планктонофагов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материал собран в ходе 6 рейсов на научно-исследовательском судне «Денеб» в 2018–2019 гг. В 2018 г. экспедиции проведены в августе и ноябре, в 2019 г. – в апреле, июле и августе – сентябре. Район исследований и точки отбора проб показаны на рисунке 1. Всего в 2018 г. было проведено 59 отборов проб на 54 станциях, из них 36 результативных, в 2019 г. – 66 отборов на 54 станциях, из них 55 результативных.

Лов желетелого макрозоопланктона производили при помощи конусной сети ИКС-80 капроновой сети (мельничный газ № 15) с диаметром входного отверстия 80 см по горизонтам дно – поверхность. В каждой пробе определяли видовой состав, индивидуальные размеры пойманных особей, биомассу каждого вида и общую биомассу.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Желетелый макрозоопланктон в период исследований в наших пробах был представлен только двумя видами гребневиков-вселенцев, *Mnemiopsis leidyi* и *Beroe ovata*. Медузы *Aurelia aurita* (Linnaeus, 1758) и *Rhizostoma pulmo* (Macri, 1778), отмечавшиеся в Азовском море другими исследователями [6], в наших пробах отсутствовали, хотя последний вид мы визуально наблюдали в июле и августе 2019 г. Отсутствие *A. aurita* в наших сборах из Азовского моря является обычным начиная с 2014 г., несмотря на то, что в черноморских пробах это доминирующий вид. Возможно, это связано с тем, что массовое развитие этого вида медуз происходит, по литературным данным [6], в весенний и раннелетний сезоны, в то время как наши исследования проходили, как правило, в более позднее время.

В августе и ноябре 2018 г. в наших пробах присутствовали оба вида гребневиков-вселен-

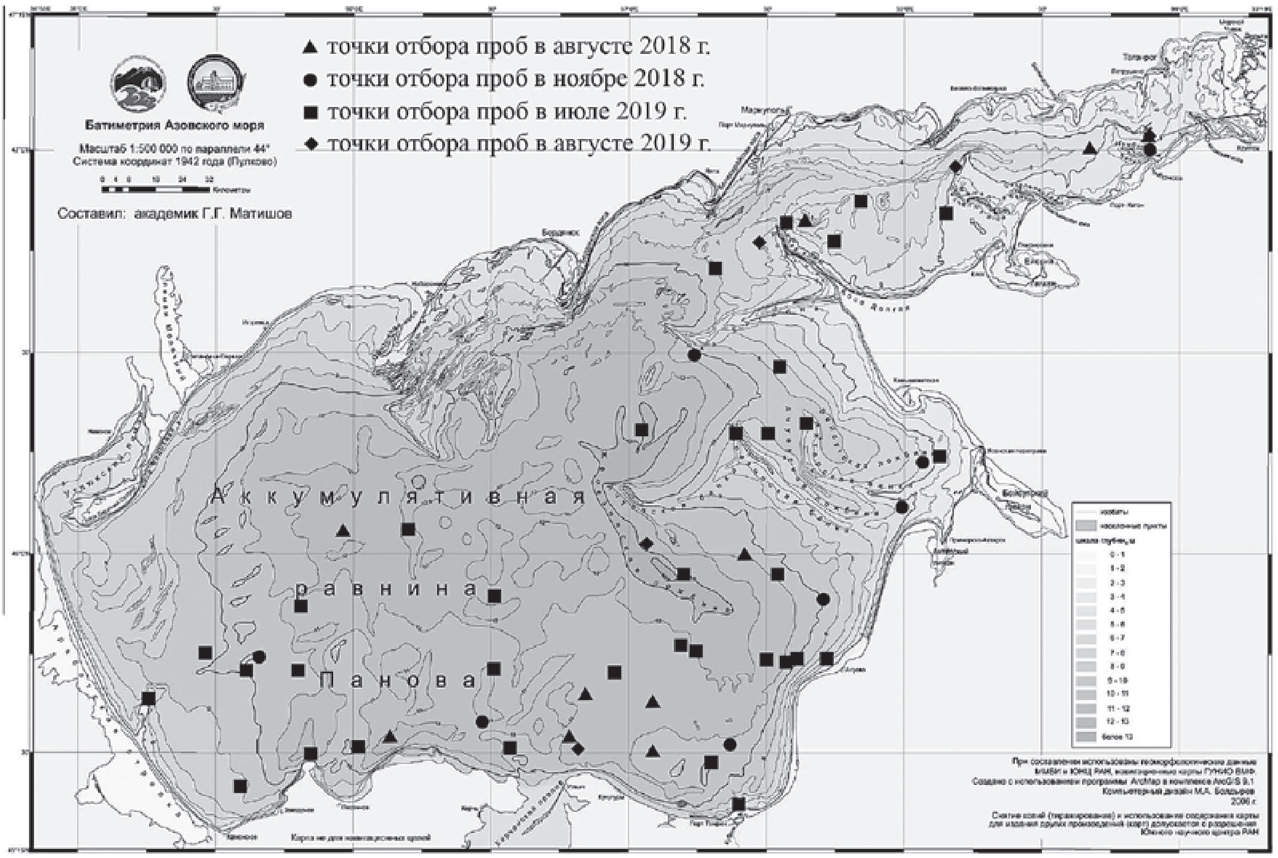


Рис. 1. Район исследований и точки отбора проб желетелого макрозоопланктона в Азовском море в 2018–2019 гг.
Fig. 1. Research area and sampling points of the gelatinous macrozooplankton in the Sea of Azov in 2018–2019.

цев. Безусловным доминантом по биомассе был *M. leidyi*, доля которого колебалась от 51,47 % всей биомассы желетелого макрозоопланктона в конце августа собственно в Азовском море до 100 % в начале ноября в Таганрогском заливе (табл. 1).

В августе значительная биомасса гребневиков наблюдалась в акватории Таганрогского залива, при этом практически повсеместно был представлен только *M. leidyi.* Его средняя по заливу биомасса составила 66,69 г/м^3. *Beroe ovata* был отмечен лишь в устьевой части залива. В начале экспедиции, 21–22 августа 2018 г., *M. leidyi* зарегистрирован западнее Таганрога, примерно на линии Золотая коса – Маргаритово (точка с координатами 47°00.300′ с.ш., E 38°40.740′ в.д.), с большой биомассой. Далее, к устьевой части залива, его биомасса сильно уменьшалась, и начиная с Должанской косы встречались только отдельные экземпляры. Через 10 дней, к концу экспедиции, значительная биомасса *M. leidyi* наблюдалась восточнее, в районе приемного буя Таганрогского рейда, хотя максимальная биомасса оставалась на том же участке, что и раньше. В остальной акватории моря встречались в основном отдельные некрупные экземпляры. Исключение составляла точка с координатами 45°59.700′ с.ш., 37°25.380′ в.д., где зарегистрировано скопление *M. leidyi*, и прикерченский район. Однако биомасса вида здесь была значительно ниже, чем в Таганрогском заливе (табл. 1).

Beroe ovata в период работ в основном был представлен мелкими единичными особями в восточной части моря и прикерченском районе. Значительная биомасса данного вида отмечена только в прикерченском районе. В пробах, отобранных в устьевой части Таганрогского залива и в центральных районах моря, в начале экспедиции этот вид отсутствовал, но в конце рейса крупный одиночный экземпляр был пойман в районе Должанской косы (табл. 1).

В начале ноября, как и в конце августа, значительная биомасса *M. leidyi* наблюдалась в акватории Таганрогского залива. Первый результативный отбор проб был проведен в точке с координатами 47°00.177′ с.ш., 38°53.711′ в.д. Средняя биомасса этого вида здесь значительно снизилась по сравне-

Таблица 1. Биомасса *M. leidyi* и *B. ovata* в Азовском море в различные периоды исследований
Table 1. Biomass of *M. leidyi* and *B. ovata* in the Sea of Azov during various research periods

Район исследований Investigated water area	Средняя биомасса, г/м³ * Average biomass, g/m³ *		Общая биомасса, г/м³ Total biomass, g/m³
	M. leidyi	*B. ovata*	
Август 2018 / August 2018			
Таганрогский залив, восточная часть Taganrog Bay, eastern part	172,640 (145,550–215,230)	–	172,640 (145,550–215,230)
Таганрогский залив, центральная часть Taganrog Bay, central part	47,470 (11,500–99,500)	–	47,470 (11,500–99,500)
Таганрогский залив, западная часть Taganrog Bay, western part	18,096 (от единичных экземпляров до 56,820 / from single specimens to 56,820)	единичные экземпляры / single specimens	18,096 (от единичных экземпляров до 56,820 / from single specimens to 56,820)
Азовское море без Таганрогского залива Sea of Azov without Taganrog Bay	0,870 (от единичных экземпляров до 10,060 / from single specimens to 10,060)	0,820 (от единичных экземпляров до 14,930 / from single specimens to 14,930)	1,690 (от единичных экземпляров до 17,320 / from single specimens to 17,320)
Ноябрь 2018 / November 2018			
Таганрогский залив, восточная часть Taganrog Bay, eastern part	13,33	–	13,33
Таганрогский залив, центральная часть Taganrog Bay, central part	65,880 (35,640–99,000)	–	65,880 (35,640–99,000)
Таганрогский залив, западная часть Taganrog Bay, western part	17,035 (6,800–27,270)	–	17,035 (6,800–27,270)
Азовское море без Таганрогского залива Sea of Azov without Taganrog Bay	2,050 (от единичных экземпляров до 17,330 / from single specimens to 17,330)	0,770 (от единичных экземпляров до 8,000 / from single specimens to 8,000)	2,820 (от от единичных экземпляров до 22,440 / from single specimens to 22,440)
Июль 2019 / July 2019			
Таганрогский залив, восточная часть Taganrog Bay, eastern part	–	–	–
Таганрогский залив, центральная часть Taganrog Bay, central part	20,040	–	20,040
Таганрогский залив, западная часть Taganrog Bay, western part	6,385 (1,970–9,000)	0,92 (0–3,200)	7,305 (1,970–12,200)
Азовское море без Таганрогского залива Sea of Azov without Taganrog Bay	3,300 (0–42,820)	0,900 (0–6,220)	3,890 (0–42,820)
Август – сентябрь 2019 / August – September 2019			
Таганрогский залив, восточная часть Taganrog Bay, eastern part	3,500	–	3,500
Таганрогский залив, центральная часть Taganrog Bay, central part	–	0,333	0,333
Таганрогский залив, западная часть Taganrog Bay, western part	–	–	–
Азовское море без Таганрогского залива Sea of Azov without Taganrog Bay	0,245 (0,015–0,475)	0,240 (0,079–0,400)	0,485 (0,094–0,875)

Примечание. * – В скобках приведены диапазоны показателей биомассы.
Note. * – Ranges of biomass indicators are given in brackets.

нию с таковой в августе. Максимальная биомасса *M. leidyi* наблюдалась в центральной части залива, в устьевой части ее значения вновь снижались.

В акватории собственно Азовского моря общая средняя биомасса обоих видов гребневиков увеличилась более чем в 1,67 раза, при этом снизилась биомасса *B. ovata* и возросла биомасса *M. leidyi* (табл. 1). Также значительные показатели биомассы желетелого зоопланктона отмечены вдоль восточного побережья, особенно в районе Приморско-Ахтарска (точки с координатами 46°13.399′ с.ш., 38°04.137′ в.д. и 46°06.617′ с.ш., 37°59.587′ в.д.) и несколько южнее (45°52.914′ с.ш., 37°42.396′ в.д.). Здесь же находился единственный участок, на котором был отмечен гребневик *B. ovata*. В остальной акватории моря встречались в основном отдельные некрупные экземпляры *M. leidyi* (табл. 1).

В середине апреля 2019 г. в пробах, отобранных в Азовском море, был отмечен единственный экземпляр *M. leidyi* (прикерченский район, 45°30.180′ с.ш., 36°52.260′ в.д.). Уже во второй половине июля в водоеме присутствовали оба вида гребневиков-вселенцев. При этом доминирующим по биомассе являлся *M. leidyi*, как в Таганрогском заливе, так и в среднем в собственно Азовском море. Вид концентрировался в основном в юго-западной части моря, где и наблюдался максимум его биомассы. Также значительная биомасса данного вида была отмечена в центральной и устьевой частях Таганрогского залива и юго-западнее Должанской косы – на траверсе Ясенского залива. В Темрюкском заливе этот вид практически отсутствовал (табл. 1).

Beroe ovata в период исследований был отмечен на значительной части акватории Азовского моря, в основном в восточном его районе вплоть до устьевого участка Таганрогского залива. Этот вид не был отмечен западнее Казантипского залива. Максимум биомассы *B. ovata* наблюдался в Темрюкском заливе и прилегающих районах моря.

В конце августа 2019 г. Азовском море в наших пробах также присутствовали оба вида гребневиков. В кутовой части Таганрогского залива отмечен только *M. leidyi*, и за счет его высокой биомассы здесь он оставался доминирующим видом в целом по морю. В остальной акватории моря биомасса *M. leidyi* и *B. ovata* мало отличалась. Максимальные значения общей биомассы обоих видов отмечены в прикерченском районе. Средние значения биомассы в конце августа сильно уменьшились по сравнению с июльскими. В Таганрогском заливе средняя биомасса *M. leidyi* уменьшилась в 2,92 раза, *B. ovata* – в 7,37 раза (табл. 1).

ОБСУЖДЕНИЕ

В августе и ноябре 2018 г. в Азовском море наблюдалось распределение биомассы *M. leidyi* «пятнами» по акватории водоема, что не характерно для этого вида [1]. Преобладали особи небольших размеров (1–8 мм, отдельные экземпляры до 25 мм). Значения биомассы были очень низки (табл. 1). Несмотря на разницу сезонов и уменьшение биомассы, изменения в характере ее распределения по исследованной акватории были невелики.

В 2019 г. отмечено аномально раннее появление гребневиков *M. leidyi* и *B. ovata* у северной части кавказского побережья Черного моря – в конце февраля [7]. Также зафиксировано присутствие *M. leidyi* в прикерченском районе Азовского моря в середине апреля. Это явление укладывается в известную по литературным данным тенденцию формирования псевдопопуляции *M. leidyi* в северо-восточной части Черного моря [8].

Возможно, это связано с повышением температурных характеристик водных масс в северо-восточной части Черного моря. По литературным данным, в период с 2005 по 2014 г. произошло увеличение средней зимней температуры приповерхностного слоя морской воды на 0,9° С, средней летней – на 1,0° С [9].

Возможно, в последние 2–3 года сроки захода медуз и гребневиков в Азовское море сдвинулись на более ранний период, а также уменьшился временной отрезок между заходами *M. leidyi* и *B. ovata*. В этом случае сразу же за вспышкой численности *M. leidyi* идет массовое развитие *B. ovata*, который выедает первый вид уже к концу лета. Затем следует уменьшение количества *B. ovata* вследствие недостатка корма, и к поздней осени, пока позволяет температура воды, *M. leidyi* немного восстанавливает свою численность. Особенно это касается районов, куда *B. ovata* проникает позже и в меньшем количестве, а исчезает раньше – Таганрогского и Ясенского заливов. Это может привести к картине распределения гребневиков, наблюдавшейся в августе и ноябре 2018 г.

Интересно, что в 2012 и 2013 гг., когда нами наблюдался поздний заход *B. ovata* в Азовское море, этот вид отсутствовал и в наших пробах из северо-восточной части Черного моря, отобранных в весенний период.

Уменьшение временного интервала между сроками захода в Азовское море *M. leidyi* и *B. ovata* при сохранении этой тенденции в течение долго времени может привести к сокращению периода интенсивного выедания кормового зоопланктона гребневиком *M. leidyi*. Следствием этого, в свою очередь, может быть частичное восстановление осеннего пика развития кормового зоопланктона. Вместе с тем возможен сдвиг захода *M. leidyi* в водоем на более ранние сроки, что может стать причиной меньшей выраженности весенне-летнего пика развития зоопланктонного сообщества. Однако проверка справедливости этих предположений требует дальнейших исследований как желетелого, так и кормового зоопланктона.

Исследование выполнено в рамках выполнения ГЗ ЮНЦ РАН, № гр. проекта AAAA-A18-118122790121-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирзоян З.А., Воловик С.П., Корниенко Г.Г., Дудкин С.И., Ложичевская Т.В. 2000. Биология гребневика *Mnemiopsis leidyi* в Азовском море. В кн.: *Гребневик Mnemiopsis leidyi (A. Agassiz) в Азовском и Черном морях*. Ростов н/Д, изд-во БКИ: 101–144.
2. Поважный В.В., Моисеев Д.В. 2006. Современное состояние популяции гребневика *Mnemiopsis leidyi* (A. Agassiz) в Таганрогском заливе. В кн.: *Экосистемные исследования Азовского, Черного, Каспийского морей*. Апатиты, изд-во КНЦ РАН: 132–141.
3. Мирзоян З.А., Мартынюк М.Л., Вязун Е.В. 2006. Особенности развития *Beroe ovata* и *Mnemiopsis leidyi* в Азовском море в современный период. В кн.: *Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна (2004–2005 гг.)*. Ростов н/Д, изд-во АзНИИРХ: 136–148.
4. Поважный В.В. 2009. Особенности динамики зоопланктонного сообщества Таганрогского залива. *Вестник Южного научного центра*. 5(2): 94–101.
5. Саяпин В.В. 2016. Желетелый макрозоопланктон кавказского побережья Черного моря в 2012–2015 гг. В кн.: *Материалы XVIII Международной научной конференции «Биологическое разнообразие Кавказа и юга России» (г. Грозный, 4–5 ноября 2016 г.). Часть II*. Грозный, изд-во Академии наук Чеченской Республики: 373–378.
6. Мирзоян З.А., Мартынюк М.Л., Хренкин Д.В, Афанасьев Д.Ф. 2019. Развитие популяций сцифоидных медуз *Rhizostoma pulmo* и *Aurelia aurita* в Азовском море. *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2(2): 27–35.
7. Саяпин В.В. 2019. О раннем появлении у северной части кавказского побережья Черного моря гребневика-вселенца *Beroe ovata* Bruguière, 1789. *Наука Юга России*. 15(3): 100–102. doi: 10.7868/S25000640190311
8. Мартынюк М.Л. 2017. Особенности развития популяций гребневиков-вселенцев *Mnemiopsis leidyi* (A. Agassiz, 1865) и *Beroe ovata* Mayer, 1912 в северо-восточной части Черного моря. В кн.: *Труды АзНИИРХ (Результаты рыбохозяйственных исследований в Азово-Черноморском бассейне): Сборник научных трудов по результатам исследований за 2014–2015 гг.* Ростов н/Д, изд-во АзНИИРХ: 97–103.
9. Арашкевич Е.Г., Луппова Н.Е., Никишина А.Б., Паутова Л.А., Часовников В.К., Дриц А.В., Подымов О.И., Романова Н.Д., Станичная Р.Р., Зацепин А.Г., Куклев С.Б., Флинт М.В. 2015. Судовой экологический мониторинг в шельфовой зоне Черного моря: оценка современного состояния пелагической экосистемы. *Океанология*. 55(6): 964–970. doi: 10.7868/S0030157415060015

REFERENCES

1. Mirzoyan Z.A., Volovik S.P., Kornienko G.G., Dudkin S.I., Lozhichevskaya T.V. 2000. [Biology of the ctenophore *Mnemiopsis leidyi* in the Sea of Azov]. In: *Grebnevik Mnemiopsis leidyi (A. Agassiz) v Azovskom i Chernom moryakh*. [*Ctenophore Mnemiopsis leidyi (A. Agassiz) in the Sea of Azov and the Black Sea*]. Rostov-on-Don, Bank for Cultural Information: 101–144. (In Russian).
2. Povazhniy V.V., Moiseev D.V. 2006. [Current status of the ctenophore *Mnemiopsis leidyi* (A. Agassiz) population in the Taganrog Bay]. In: *Ekosistemnye issledovaniya Azovskogo, Chernogo, Kaspiyskogo morey*. [*Ecosystem Studies of the Azov, Black, and Caspian Seas*]. Apatity: Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 132–141. (In Russian).
3. Mirzoyan Z.A., Martynyuk M.L., Vyazun E.V. 2006. [Peculiarities of the development of *Beroe ovata* and *Mnemiopsis leidyi* in the Sea of Azov in the modern period]. In: *Osnovnye problemy rybnogo khozyaystva i okhrany rybokhozyaystvennykh vodoemov Azovo-Chernomorskogo basseyna (2004–2005 gg)*. [*Major problems of fisheries and the protection of fishery water bodies in the Azov-Black Sea basin (2004–2005)*]. Rostov-on-Don, Azov Fisheries Research Institute: 136–148. (In Russian).
4. Povazhnyi V.V. 2009. [Peculiarities of Taganrog Bay zooplankton dynamics]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra*. 5(2): 94–101. (In Russian).
5. Sayapin V.V. 2016. [Gelatinous macrozooplankton of the Caucasian coast of the Black Sea in 2012–2015]. In: *Materialy XVIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Biologicheskoe raznoobrazie Kavkaza i yuga Rossii"*. [*Materials of the XVIII international scientific conference "The biological diversity of the Caucasus and the south of Russia" (Grozny, Russia, 4–5 November 2016). Part II*]. Grozny, Academy of Sciences of the Chechen Republic: 373–378. (In Russian).
6. Mirzoyan Z.A., Martynyuk M.L., Khrenkin D.V., Afanasyev D.F. 2019. [Development of the scyphozoan jellyfish *Rhizostoma pulmo* and *Aurelia aurita* poulations in the Azov Sea]. *Aquatic Bioresources & Environment*. 2(2): 27–35. (In Russian).
7. Sayapin V.V. 2019. [Early occurrence of the alien ctenophore *Beroe ovata* Bruguière, 1789 at the northern Caucasian coast of the Black Sea]. *Nauka Yuga Rossii*. 15(3): 100–102. (In Russian). doi: 10.7868/S25000640190311
8. Martynyuk M.L. 2017. [Features of development of invasive ctenophora *Mnemiopsis leidyi* (A. Agassiz, 1865) and *Beroe ovata* Mayer, 1912 in the north-eastern Black Sea]. In: *Trudy*

AZNIIRKh (Rezul'taty rybokhozyaystvennykh issledovaniy v Azovo-Chernomorskom basseyne): Sbornik nauchnykh trudov po rezul'tatam issledovaniy za 2014–2015 gg. [*Proceedings of AzNIIRKH (Results of fisheries studies in the Azov and Black Sea basin): collected papers based on the results of studies over 2014–2015*]. Rostov-on-Don, Azov Fisheries Research Institute: 97–103. (In Russian).

9. Arashkevich E.G., Louppova N.E., Nikishina A.B., Pautova L.A., Chasovnikov V.K., Drits A.V., Podymov O.I., Romanova N.D., Stanichnaya R.R., Zatsepin A.G., Kuklev S.B., Flint M.V. 2015. Marine environmental monitoring in the shelf zone of the Black Sea: assessment of the current state of the pelagic ecosystem. *Oceanology.* 55(6): 871–876. doi: 10.1134/S0001437015060016

Поступила 28.05.2020

УДК 574.587
DOI: 10.7868/S25000640200408

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАКРОЗООБЕНТОСА ПРИПЛОТИННОГО УЧАСТКА ЦИМЛЯНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В 2018–2019 гг.[1]

© 2020 г. Н.И. Булышева[1], В.Л. Сёмин[2]

Аннотация. Рассмотрено влияние на донные сообщества Приплотинного плеса Цимлянского водохранилища экстремального паводка 2018 г., произошедшего на фоне длительного периода маловодья. В ходе исследований в количественных пробах было выявлено 25 таксонов макрозообентоса, в том числе весной 2018 г. – 23, весной 2019 г. – 11, осенью 2019 г. – 13. В 2019 г. отмечено значительное обеднение количественных и качественных показателей макрозообентоса по сравнению с 2018 г. Относительно стабильным оставалось только сообщество *Dreissena polymorpha*, однако и оно достигло значений, сравнимых с таковыми весной 2018 г., лишь к сентябрю 2019 г. На остальных станциях, не занятых сообществом *D. polymorpha*, даже к сентябрю донные сообщества были обеднены как по количеству видов, так и по численности/биомассе. Можно предположить, что снижение количественных показателей и обеднение донных сообществ, отмеченное в 2019 г., явилось последствием половодья 2018 г. и связано со сносом беспозвоночных с поверхности грунтов, размывом верхнего слоя грунта и переотложением донных осадков.

Ключевые слова: Цимлянское водохранилище, макрозообентос, пелофильное сообщество, численность, биомасса.

SPECIFIC FEATURES OF THE DISTRIBUTION OF MACROZOOBENTHOS IN THE DAM WATER AREA OF THE TSIMLYANSK RESERVOIR IN 2018–2019

N.I. Bulysheva[1], V.L. Syomin[2]

Abstract. An attempt was made to assess the impact of the extreme flood in 2018, which occurred after a long period of low water, on the bottom communities of the Priplotinny reach of the Tsimlyansk Reservoir. During the study period, 25 macrozoobenthos taxa were identified in quantitative samples. These included 23 taxa in spring 2018, 11 in spring 2019, and 13 in autumn 2019. In 2019, a significant decrease of quantitative and qualitative characteristics of macrozoobenthos was noted compared to 2018. Only the *Dreissena polymorpha* community remained relatively stable; however, its characteristics reached values comparable to the spring 2018 only by September 2019. At the other stations, not occupied by *D. polymorpha*, benthic communities were depleted in terms of both the number of species and the abundance/biomass even by September 2019. It can be assumed that the decrease in quantitative characteristics and the depletion of bottom communities, noted in 2019, is a consequence of the 2018 flood. It could be a result of washing of invertebrates off the soil surface, erosion of the upper layer and redeposition of bottom sediments.

Keywords: Tsimlyansk Reservoir, macrozoobenthos, pelophilic community, abundance, biomass.

[1] Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006 г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: bulysheva@ssc-ras.ru

[2] Институт океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук (P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences), Российская Федерация, 117997, г. Москва, Нахимовский пр., 36, e-mail: svinovod@yandex.ru

[1] **Оригинальный текст:** *Булышева Н.И., Сёмин В.Л.* Особенности распределения макрозообентоса приплотинного участка Цимлянского водохранилища в 2018–2019 гг. // Наука Юга России. 2020. Т. 16. № 4. С. 73–83.

ВВЕДЕНИЕ

Цимлянское водохранилище – один из крупнейших искусственных водоемов юга европейской части России, важнейший элемент природно-технической системы бассейна Нижнего Дона, который является областью конфликта интересов различных отраслей экономики, связанных с водопользованием и водопотреблением.

Известно, что при формировании водохранилищ замедляется течение, что приводит к аккумуляции значительного количества биогенных и органических веществ, изменяются температурный и световой режимы [1]. Не стало исключением и Цимлянское водохранилище. Начиная с первых лет существования в водоеме активно проходили процессы абразии, что вместе с зарегулированием Дона привело к появлению обширных заиленных площадей, обусловивших специфику развития водных сообществ [2].

Водоем традиционно подразделяется на четыре плеса, отличающихся своими морфометрическими, гидрологическими и промыслово-биологическими особенностями. Приплотинный плес – наиболее глубоководная часть Цимлянского водохранилища, изрезанная балками и заливами. Его акватория является районом аккумуляции продуктов абразии берегов и дна, при этом участок, прилегающий к плотине, характеризуется наибольшими темпами осадконакопления. Основным источником седиментационного материала являются размываемые берега от г. Цимлянска до ст. Хорошевской и мелководье у южного берега площадью 100 км^2 [3]. Помимо заиливания на структуру и показатели сообществ гидробионтов оказывают влияние постоянные колебания уровенного режима, а также гипоксия и аноксия, периодически наблюдающиеся в водохранилище из-за «цветения» микроводорослей, последствия которого иногда носят катастрофический характер [3; 4]. Так, в октябре 2009 г. на водохранилище сложилась чрезвычайная ситуация: вспышка численности фитопланктона в сочетании с гидрометеорологическими условиями (высокая температура воды и продолжительные восточные ветры) привела к тому, что фильтры волгодонского водозабора забились водорослями, главным образом, цианопрокариотами, подача воды в город была остановлена на трое суток [3].

Дефицит водных ресурсов в бассейне Дона, наблюдающийся на протяжении последних десятилетий, возникший вследствие сокращения водного стока, обострил все проблемы водохозяйственного комплекса данной территории [5–8]. Многолетнее экстенсивное использование Цимлянского водохранилища и длительный период низкой водности привели к понижению его уровня, превращению более глубоководных участков в мелководные и стали причиной трансформации экосистемы [9]. Проблема низкого уровня воды водохранилища, его влияние на все звенья гидроэкосистемы активно изучается специалистами, опубликован ряд работ, посвященных оценке состояния сообществ фитопланктона, зообентоса и ихтиофауны в период маловодья [4; 7; 10 и др.].

В 2018 г. на фоне длительного периода маловодья был зарегистрирован эпизод экстремального половодья [11]. Цимлянское водохранилище вследствие высокого притока оказалось заполнено до отметок, близких к нормальному подпорному уровню максимальный уровень был достигнут с 30 мая по 3 июня 2018 г. и составил 35,91 м при нормальном подпорном уровне 36,0 м [12]. Избыток воды от весеннего паводка привел к аварийным попускам воды в конце апреля – начале мая 2018 г. [11]. Эти явления могли оказать воздействие на донные и пелагические сообщества Цимлянского водохранилища. Тем не менее последствия экстремального паводка 2018 г. для водных биоценозов водохранилища пока недостаточно изучены (в работе [13] дана оценка состояния сообщества фитопланкона), поэтому в данной статье сделана попытка проанализировать состояние донных сообществ Цимлянского водохранилища в 2018–2019 гг. Понимание механизмов влияния паводковых явлений на макрозообентос необходимо для прогнозирования возможных изменений в сообществах донных беспозвоночных этого водоема в многоводные годы.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Отбор количественных проб проводили в соответствии со стандартными гидробиологическими методиками в 3-кратной повторности [14]: весной 2018 г. –модифицированным дночерпателем Петерсена с площадью захвата 0,034 м^2; весной и осенью 2019 г. – модифицированным дночерпателем ван Вина с площадью захвата 0,028 м^2. Особое внимание было уделено изучению донных сообществ Приплотинного плеса. Карта-схема отбора проб приведена на рисунке 1.

Для более полного учета видового состава водоема применяли ручной сбор (качественные пробы). Для сравнения показателей макрозообентоса были использованы данные Южного научного центра Российской академии наук (ЮНЦ РАН, Ростов-на-Дону, Россия), полученные в ходе экспедиции в ноябре 2011 г. (период маловодья). Отбор проб проводили дночерпателем Петерсена в прибрежной зоне на глубинах до 1 м. Некоторые результаты съемки 2011 г. опубликованы в работе [15]. Необходимо отметить, что в 2011 г. уровень воды в половодье был ниже отметки 35 м по Балтийской системе высот, то есть водохранилище не заполнялось, площадь водного зеркала сократилась, в осенне-зимний период наблюдались значительные зоны осушки [4; 15].

Определение видового состава, подсчет численности и биомассы проводили в лабораторных условиях.

Статистический анализ проводили в программе PRIMER 6.1.16 с расширением PERMANOVA+ 1.0.6 [16; 17]. Данные по численности и биомассе предварительно лог-трансформировали. Для расчета матриц сходства/дистанций использовали индекс Брея – Кёртиса (по численности и биомассе) и таксономический индекс Theta+, рассчитываемый по присутствию/отсутствию видов и учитывающий таксономические отношения между ними. Ординацию проводили методом главных координат (Primary Coordinates, PCO) и dbRDA (Distance-Based Redundancy Analyses). Достоверность группировок проверяли методами ANOSIM (Analyses of Similarity) и PERMANOVA (Permutational Analyses of Variance). Регрессионный анализ проводили методом DistLM (Distance-Based Linear Models) для численности, биомассы и таксономической структуры (таксономический индекс Theta+); он включал следующие абиотические факторы: географические координаты (как мера расположения станции относительно верхней части водохранилища/плотины), глубина, температура, прозрачность воды, pH, содержание растворенного кислорода и тип грунта. Факторы предварительно нормализовали. Для расчета индексов биоразнообразия (число видов на 100 экз. ES (100), индекс Маргалефа d, выравненность по Пиелу J', индекс Шеннона $H'(\log_e)$, индекс Симпсона (обратная величина) 1-Lambda, таксономическое разнообразие Delta, средняя таксономическая обособленность Delta*) применяли процедуру DIVERSE.

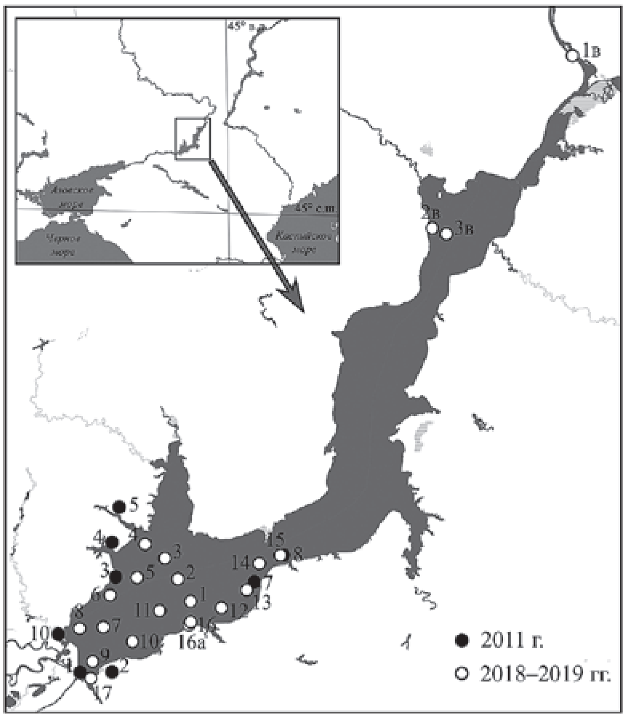


Рис. 1. Карта-схема расположения станций отбора проб.
Fig. 1. Location map of sampling stations.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как в 2018, так и в 2019 г. на большинстве станций были отмечены илистые грунты с примесью раковинного материала и детрита (кроме станций 8 и 9, где донные осадки представлены раковинным материалом – преимущественно створками рода *Dreissena* van Beneden, 1835, и станции 10 – друзы *Dreissena*).

В ходе исследований в количественных пробах было выявлено 25 таксонов макрозообентоса, в том числе весной 2018 г. – 23, весной 2019 г. – 11, осенью 2019 г. – 13 (табл. 1). Кроме того, при ручном сборе были отмечены *Cordylophora caspia*, Pallas 1771 (Hydrozoa), *Dreissena bugensis* (Andrusov, 1897) (Bivalvia), *Lymnaea stagnalis* (Linnaeus, 1758) (Gastropoda), *Pterocuma sowinskyi* (Sars, 1894) (Malacostraca).

В течение всего периода исследований наибольшую встречаемость, в несколько раз превосходившую таковую остальных таксонов, имели *Limnodrilus* cf. *hoffmeisteri* и *Chironomus* aff. *plumosus*. В 2018 г. эти виды были зарегистрированы соответственно на 100 и 81 % станций. Весной 2019 г. оба таксона были отмечены на 88 % станций; осенью 2019 г. их встречаемость составила для

Таблица 1. Таксономический состав макрозообентоса обследуемого участка (по данным количественных проб)
Table 1. Taxonomic composition of macrozoobenthos of the surveyed area (according to quantitative samples)

Таксон Taxon	2018 Весна / Spring	2019 Весна / Spring	2019 Осень / Autumn
Nematoda	+	+	+
Polychaeta			
Hypania invalida (Grube, 1860)	+		
Clitellata			
Tubificidae sp. (*Limnodrilus* cf. *hoffmeisteri* Claparède, 1862 (?))	+	+	+
Helobdella stagnalis (Linnaeus, 1758)	+	+	+
Erpobdella octoculata (Linnaeus, 1758)	+		+
Bivalvia			
Sphaerium corneum (Linnaeus, 1758)	+		
Sphaerium rivicola (Lamarck, 1818)	+	+	
Pisidium amnicum (O.F. Müller, 1774)	+		
Monodacna colorata (Eichwald, 1829)	+	+	+
Dreissena polymorpha (Pallas, 1771)	+	+	+
Gastropoda			
Theodoxus fluviatilis (Linnaeus, 1758)	+		+
Valvata piscinalis (O.F. Müller, 1774)	+		+
Viviparus viviparus (Linnaeus, 1758)	+		
Bithynia tentaculata (Linnaeus, 1758)	+	+	+
Anisus spirorbis (Linnaeus, 1758)			+
Acroloxus lacustris (Linnaeus, 1758)			+
Malacostraca			
Pterocuma pectinata (Sowinsky, 1893)	+	+	
Dikerogammarus haemobaphes (Eichwald, 1841)	+	+	+
Echinogammarus ischnus (Stebbing, 1899)	+		
Paramysis lacustris (Czerniavsky, 1882)	+		
Corophium volutator (Pallas, 1766)	+	+	
Insecta			
Bezzia sp.	+		
Chironomidae (куколки / chrysalis)	+		
Chironomus aff. *plumosus*	+	+	+
Procladius sp.	+		

L. cf. *hoffmeisteri* 88 %, для *C.* aff. *plumosus* 63 %. Количество видов по станциям показано в таблице 2.

Донная фауна обследованных участков Цимлянского водохранилища относилась к двум фаунистическим комплексам: пресноводному (насекомые, олигохеты, ряд моллюсков родов *Lymnaea* (Lamarck, 1799) *Viviparus* Montfort, 1810 и др.) и реликтовому, представленному понтокаспийскими видами (*Cordylophora caspia*, *Dreissena polymorpha*, *Monodacna colorata*, многие ракообразные и др.).

По данным ЮНЦ РАН, осенью 2011 г. на прибрежных станциях было зарегистрировано 9 видов донных беспозвоночных, в том числе *Anodonta cygnea* (Linnaeus, 1758), *Unio pictorum* (Linnaeus, 1758) и *Lithoglyphus naticoides* (C. Pfeiffer, 1828), не отмеченные в количественных пробах в 2018–2019 гг. (тем не менее эти виды были зафиксированы в качественных пробах). В 2011 г. в пробах не были выявлены ракообразные.

Согласно опубликованным данным, в районе сброса воды в Приплотинный плес из водоема-охладителя Ростовской АЭС в ходе регулярного мониторинга в 2010–2016 гг. было отмечено 32 таксона донных беспозвоночных, в том числе олигохет – 6 видов, личинок хирономид – 6, высших ракообразных – 8, полихет – 2, моллюсков – 6, прочих (ручейники и пиявки) – 4 [18]. Различия с данными, полученными в наших исследованиях, вполне объяснимы: в работе [18] приведены результаты многолетних исследований (съемки в течение года проводились систематически), для олигохет и личинок хирономид указана видовая принадлежность.

Таблица 2. Распределение индексов биоразнообразия по станциям
Table 2. Distribution of biodiversity indices by stations

Сезон Season	№ станции Station number	S	ES (100)	d	J'	H'(log_e)	1-Lambda'	Delta	Delta*
Май 2019 May 2019	1В	2	2,0	0,117	0,928	0,6429	0,4507	45,1	100,0
	2В	4	3,4	0,361	0,296	0,4098	0,1914	19,1	99,8
	2	0	0	–	–	–	–	–	–
	3	3	2,4	0,251	0,121	0,1329	0,0485	4,8	100,0
	4	1	1	–	–	–	–	–	–
	5	3	2,8	0,259	0,488	0,5364	0,3102	31,0	100,0
	10	6	5,2	0,588	0,613	1,0981	0,5910	56,9	96,3
	16	3	2,9	0,282	0,241	0,2645	0,1125	11,2	99,5
Сентябрь 2019 September 2019	1В	2	2,0	0,153	0,629	0,4362	0,2663	26,6	100,0
	2В	3	3,0	0,354	0,670	0,7356	0,4077	40,8	100,0
	2	3	2,9	0,273	0,657	0,7223	0,4595	45,7	99,5
	3	3	3,0	0,248	0,734	0,8069	0,5216	52,2	100,0
	4	2	2,0	0,114	0,704	0,4877	0,3091	30,9	100,0
	5	2	2,0	0,126	0,469	0,3251	0,1801	18,0	100,0
	10	11	9,2	1,097	0,534	1,2809	0,5275	46,8	88,8
	16	3	2,8	0,255	0,575	0,6315	0,3956	39,6	100,0
Май 2018 May 2018	1в	2	1,5	0,102	0,065	0,0447	0,0151	1,5	100,0
	2в	3	1,6	0,217	0,041	0,0452	0,0134	1,3	100,0
	3в	2	1,8	0,112	0,127	0,0880	0,0343	3,4	100,0
	1	4	3,4	0,363	0,313	0,4332	0,2070	20,7	100,0
	3	0	0	–	–	–	–	–	–
	4	6	4,7	0,594	0,227	0,4068	0,1569	15,4	98,3
	5	3	2,5	0,228	0,128	0,1406	0,0521	5,2	99,6
	8	1	1	–	–	–	–	–	–
	9	9	6,5	0,827	0,564	1,2387	0,6011	59,3	98,6
	10	7	4,4	0,607	0,319	0,6206	0,3111	30,7	98,8
	12	9	4,8	0,876	0,153	0,3369	0,1144	11,2	97,7
	16	6	3,5	0,508	0,126	0,2249	0,0780	7,8	99,7
	17	8	4,7	0,797	0,156	0,3253	0,1118	10,7	95,3
	18	8	8,0	1,207	0,874	1,8182	0,8031	73,6	91,6
	19	4	3,2	0,330	0,396	0,5490	0,3048	29,3	96,3
	20д	2	2,0	0,254	0,918	0,6365	0,4533	45,3	100,0
	21д	1	1	–	–	–	–	–	–
Ноябрь 2011 November 2011	2	0	0	–	–	–	–	–	–
	3	3	3,0	0,328	0,625	0,6871	0,3796	38,0	100,0
	4	5	4,2	0,495	0,529	0,8514	0,5114	51,1	99,9
	5	3	2,5	0,204	0,529	0,5809	0,3648	36,3	99,5
	7	2	2,0	0,146	0,826	0,5723	0,3845	38,5	100,0
	8	2	2,0	0,237	1,000	0,6931	0,5075	50,7	100,0
	10	2	2,0	0,164	0,621	0,4305	0,2619	26,2	100,0

Примечание. Классические показатели: S – число видов; ES (100) – число видов на 100 экз.; d – индекс Маргалефа, J' – выравненность по Пиелу; H'(log_e) – индекс Шеннона; 1-Lambda – индекс Симпсона (обратная величина). Таксономическое разнообразие: Delta – таксономическое разнообразие; Delta* – средняя таксономическая обособленность. (−) – не определено (организмы отсутствуют или представлены одним видом).

Note. Classic indicators: S – number of species;ES (100) – number of species per 100 specimens; d – Margalef index, J' – Pielou Index; H'(loge) – Shannon Index; 1-Lambda – Simpson Index. Taxonomic richness: Delta – taxonomic diversity; Delta* – average taxonomic distinctness. (−) – not determined (organisms are absent or represented by one species).

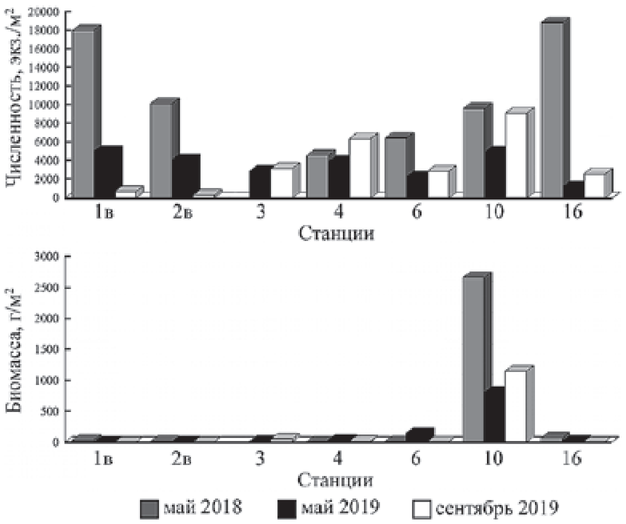


Рис. 2. Распределение численности и биомассы макрозообентоса по станциям.
Fig. 2. Distribution of the abundance and biomass of macrozoobenthos by stations.

В мае 2018 г. биомасса колебалась по станциям от 0,1 (станция 8) до 2651,83 (станция 10) г/м², плотность – от 51 (станция 20д) до 18810 (станция 16) экз./м². В мае 2019 г. показатели биомассы варьировали по станциям от 3,367 (станция 1В) до 803,93 (станция 10) г/м², плотности – от 1214 (станция 16) до 5000 (станция 1В) экз./м². В сентябре 2019 г. наименьшие показатели биомассы плотности отмечены на станции 2В – 0,14 г/м² и 286 экз./м², наибольшие на станции 10 – 1144 г/м² и 9107 экз./м².

На рисунке 2 представлена динамика количественных показателей на станциях, где отбор проб осуществляли во все сроки исследований. Как видно из данного графика, численность и биомасса как в весенний, так и в осенний период 2019 г. была ниже, чем весной 2018 г. Наибольшая биомасса как в 2018, так и в 2019 г. была отмечена на станции 10, приуроченной к дрейссеновой банке, где основной вклад вносили моллюски *Dreissena polymorpha* и *Monodacna colorata.*

В ноябре 2011 г. биомасса организмов макрозообентоса колебалась от 0 (станция 3) до 5059,27 (станция 4) г/м². Ее высокие значения были обусловлены наличием в пробах крупных особей двустворчатых моллюсков *Anodonta cygnea* и *Unio pictorum* (до 95 % от суммарной биомассы на станции). Плотность поселения макрозообентоса также была неоднородна и колебалась от 0 (станция 3) до 74686 (станция 5) экз./м² [15]. Максимальные значения количественных показателей, отмеченные в 2011 г., были выше, чем в 2018 и 2019 гг.

Средние показатели зообентоса по обследованному участку в 2018 г. также были выше, чем в 2019 г. Так, биомасса весной 2018 г. составила 253,54 г/м², весной 2019 г. – 127,5 г/м², осенью 2019 г. – 153,9 г/м²; средняя численность весной 2018 г. – 8159 экз./м²; весной 2019 г. – 3040 экз./м², осенью 2019 г. – 3313 экз./м². В 2011 г. средняя биомасса (649 г/м²) была выше в 2,5 раза, чем в 2018 г., из-за наличия в пробах крупных двустворчатых моллюсков, показатели численности 2011 г. (9934 экз./м²) незначительно превышали таковые 2018 г. Однако следует иметь в виду несовпадение сеток станций (в 2011 г. работы проводили только на мелководье).

Оценка распределения показателей макробентоса и индексов биоразнообразия (кроме Delta*, см. ниже) по акватории водохранилища во всех съемках показала общее повышение всех анализируемых параметров при продвижении от верхней части водохранилища к плотине. Это объясняется в первую очередь тем, что именно к Приплотинному плесу приурочено сообщество *Dreissena polymorpha*, характеризовавшееся наибольшим числом видов и высокой продуктивностью. Кроме того, в нижней части водохранилища представлены наиболее разнообразные грунты. В таблице 2 показано распределение количественных характеристик и индексов биоразнообразия по станциям весной 2018 г., весной и осенью 2019 г. В качестве сравнительного материала использованы данные, полученные осенью 2011 г.

В 2019 г. наблюдалось значительное обеднение перечисленных параметров по сравнению с 2018 г. Относительно стабильным оставалось только сообщество дрейссены, однако и оно достигло показателей, сравнимых с таковыми весной 2018 г., к сентябрю 2019 г. На остальных же станциях даже к сентябрю донные сообщества были обеднены как по количеству видов, так и по численности/биомассе. В то же время таксономическое разнообразие Delta в сентябре 2019 г. выросло по сравнению как с весной 2019, так и с 2018 г., что обусловлено отсутствием в этой съемке станций с одним видом или полным отсутствием макрозообентоса.

Средняя таксономическая обособленность Delta* на всех станциях и во всех съемках принимала значения, близкие к 100, что обусловлено отсутствием в пробах близких видов – каждый таксон высшего ранга (класс или даже тип) был представлен в пробе лишь одним видом, только на дрейссеновой банке значения этого показателя снижались: здесь минимальная таксономическая дистанция между видами была уже на уровне не класса/типа, а семейства/отряда. Таким образом, в Цимлянском водохранилище только дрейссеновые банки представляют собой биотоп с разнообразными экологическими нишами, позволяющий сосуществовать нескольким (относительно) близким видам, в отличие от большей части акватории как на илистых донных осадках, так и на песчаных, где условия не допускают дифференцированного использования ресурсов.

Тем не менее отсутствие статистически достоверных различий между съемками показывает, что все изменения таксономического состава происходили в пределах единого пула видов; вариация количественных показателей также перекрывалась, различаясь только диапазоном (рис. 3), а различия в видовом богатстве были обусловлены главным образом редкими таксонами.

Анализ характера распределения таксонов, как визуальный, так и PCO, позволяет выделить три группы видов, последняя из которых содержит две подгруппы (рис. 4). Первая группа включает двух доминантов сообщества илистых грунтов: личинок хирономид (*Chironomus* aff. *plumosus*) и тубифицид (*Limnodrilus* cf. *hoffmeisteri*). Они являлись наиболее распространенными в акватории и достаточно многочисленными, особенно тубифициды (соответственно 391 ± 546 и 2067 ± 1470), но биомасса их была относительно невысокой на всех станциях (доли грамма – несколько граммов на м^2). Вторая группа включает два вида двустворчатых моллюсков, соответственно доминанта и субдоминанта сообщества дрейссеновой банки: *Dreissena polymorpha* и *Monodacna colorata*. Эти виды единично встречаются и на смешанных грунтах, но на банке достигают на один-два порядка более высокой биомассы (соответственно 100,5 ± 279,2 и 26,3 ± 54,7 г/м^2); первый является эдификатором сообщества. Третья группа содержит второстепенные и редкие виды; при этом в первую подгруппу попадают два вида гастропод, приуроченных к сообществу дрейссеновой банки (*Bithynia tentaculata*, *Anisus spirorbis*), а остальные виды формируют подгруппу случайных таксонов, для которых не выявлена приуроченность к конкретному биотопу.

В регрессионном анализе после исключения недостоверных факторов остались только координаты, прозрачность и тип грунта. Наиболее

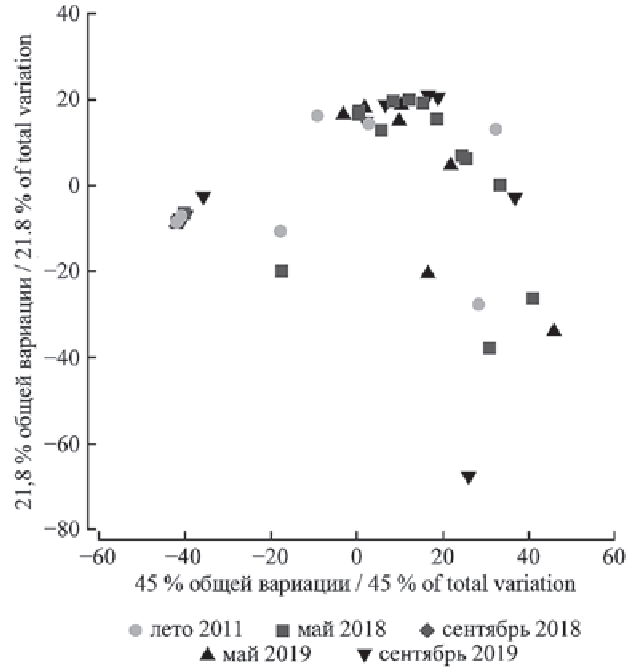


Рис. 3. Ординация станций 2011, 2018 и 2019 гг. по биомассе методом PCO.
Fig. 3. Ordination of stations 2011, 2018 and 2019 by biomass according to Principal Coordinates method.

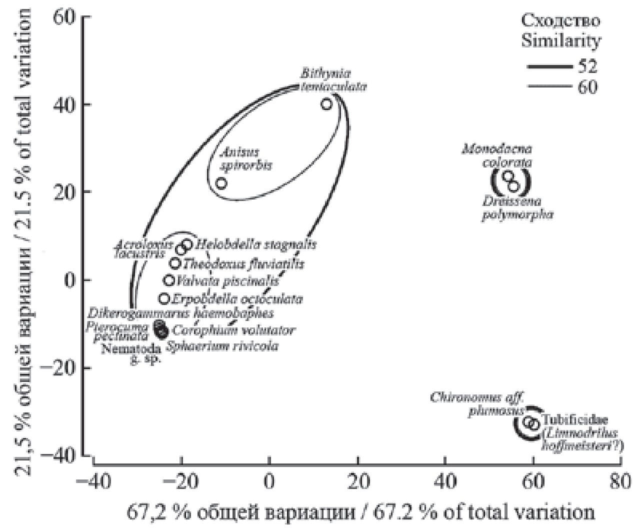


Рис. 4. Ординация видов по биомассе методом PCO.
Fig. 4. Ordination of species by biomass according to Principal Coordinates method.

четкие результаты получились с использованием биомассы. Тип грунта был наиболее достоверным фактором. В маргинальных тестах его P составило 0,001 по всем показателям, так же, как и в последовательных по численности и биомассе. Доля объясненной вариации при этом составила соответственно 29 и 36 %. При анализе таксономической

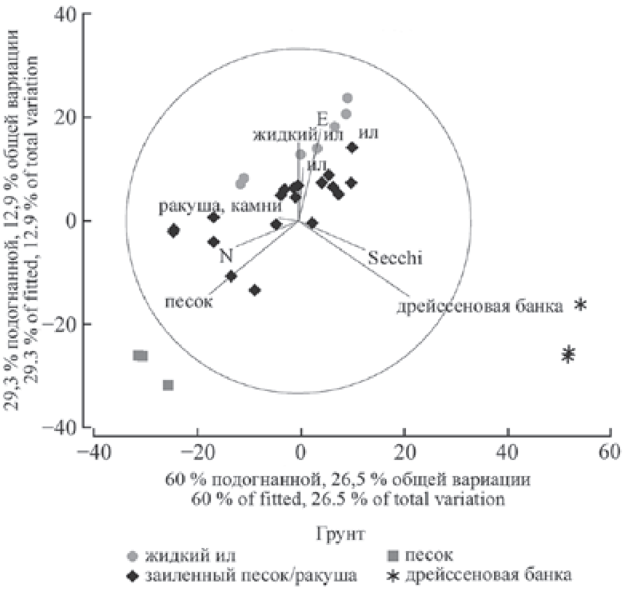


Рис. 5. Результаты DistLM-анализа влияния абиотических факторов на распределение зообентоса по станциям (ординация методом dbRDA). Обозначения факторов: N – широта, E – долгота, Secchi – прозрачность по диску Секки.

Fig. 5. Results of the DistLM analysis of the influence of abiotic factors on the distribution of zoobenthos by stations (ordination by the dbRDA method). Factor notation: N – latitude, E – longitude, Sekki – transparency on the Secchi disk.

структуры влияние этого фактора было несколько менее достоверно (P = 0,002... 0,003), доля объясненной вариации 29 %. Ординация результатов методом dbRDA выявила группировку именно по типу грунта (рис. 5). Выделились три группы станций – дрейссеновая банка, песок, заиленные грунты. При этом внутри группы заиленных грунтов можно вычленить две подгруппы: жидкие илы с наиболее бедной фауной, приуроченные к наибольшим глубинам, и смешанные грунты (заиленный песок/ракуша). Достоверность группировки подтверждается как ANOSIM (Global R = 0,6 и 0,668 при уровне значимости 0,1 % для численности и биомассы соответственно), так и PERMANOVA (Pseudo-F = 7,1535 при P = 0,001).

Для прозрачности воды и координат в разных вариантах анализа достоверность изменялась в достаточно широких пределах (например, PERMANOVA P = 0,001... 0,1), что, по-видимому, говорит о том, что с этими факторами связано распределение лишь части таксонов. Кроме того, достоверность этих факторов резко падала в последовательных тестах по сравнению с маргинальными, что говорит о значительном перекрывании объясненной ими вариации (6–10 %) с другими факторами.

Общая вариация, объясненная данными факторами, составила от 37 % (для численности и Theta+) до 44 % для биомассы.

ВЫВОДЫ

По данным исследований 2011, 2018–2019 гг. на обследованном участке Цимлянского водохранилища можно выделить две группы сообществ: 1) Tubificidae – Chironomidae на илистых грунтах; 2) сообщества банок с доминированием *Dreissena – Monodacna*. Распределение видов, численности и биомассы по акватории водохранилища в общем соответствовало распределению донных осадков – наибольшие значения этих показателей наблюдались на дрейссеновых банках, наименьшие (единичные экземпляры хирономусов и/или тубифицид) – на жидких илах.

В 2019 г. отмечено значительное обеднение количественных и качественных показателей макрозообентоса по сравнению с 2018 г. Относительно стабильным оставалось только сообщество *Dreissena polymorpha*, однако и оно достигло показателей, сравнимых с весной 2018 г., лишь к сентябрю 2019 г. На остальных же станциях даже к сентябрю донные сообщества были обеднены как по количеству видов, так и по численности/биомассе. Тем не менее количественные характеристики 2018 г. были ниже, чем в 2011 г.

Известно, что показатели зообентоса значительно понижаются в многоводные годы, когда водохранилище интенсивно промывается и донные организмы сносятся в нижний бьеф [19]. Можно предположить, что снижение численности, биомассы и обеднение донных сообществ, отмеченные в 2019 г., явились последствием половодья 2018 г., развившегося на фоне длительного маловодного периода, и связано со сносом беспозвоночных с поверхности грунтов. Отбор проб в 2018 г. проводился в период с 17 по 23 мая, когда пик половодья был пройден, но приток вод в водохранилище еще продолжался: сброс через Цимлянский гидроузел 17 мая составил 1650 м^3/с, с 18 мая до момента восстановления максимального запаса воды в Цимлянском водохранилище – 1500 м^3/с [20], а следовательно, в водоеме продолжали складываться гидрологические условия, способствующие дрифту донных беспозвоночных, размыву верхнего слоя грунта и переотложению донных осадков. Увеличение мутности вод за счет увеличения концентрации взвешенных минеральных частиц, отмечаемое при паводках, не оказало существенного влияния на донные сообщества, так как поступавшая в Цимлянское водохранилище со стоком р. Дон взвесь осаждалась на участке г. Калач-на-Дону – Чирский плес [12]. В южной части Приплотинного плеса и на станциях, наиболее удаленных от берега, в период паводка была зафиксирована наибольшая прозрачность по сравнению с другими частями водохранилища и Нижним Доном [12]. Для прибрежных станций Приплотинного плеса невысокая прозрачность вод обусловлена поступлением взвеси за счет абразии берегов, которая наблюдается здесь с момента создания водохранилища [2; 3], что, в свою очередь, привело к формированию на этих участках специфических пелофильных сообществ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и РГО в рамках научного проекта № 17-05-41145 РГО_а «Изучение трансформации среды и биоты Цимлянского водохранилища и Нижнего Дона в условиях изменения климата», а также в рамках темы НИР ГЗ ЮНЦ РАН, № госрегистрации АААА-А18-118122790121-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Денисова А.И. 1979. *Формирование гидрохимического режима водохранилищ Днепра и методы его прогнозирования*. Киев, Наукова думка: 292 с.

2. Мирошниченко М.П. 1982. Структура и продуктивность биоценозов бентоса Цимлянского водохранилища. В кн.: *Сборник научных трудов ГосНИОРХ. № 184*. Л., ГосНИОРХ: 35–48.

3. *Цимлянское водохранилище: состояние водных и прибрежных экосистем, проблемы и пути их решения.* 2011. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 216 с.

4. Булышева Н.И., Клещенков А.В. 2018. Макрозообентос прибрежной зоны Цимлянского водохранилища. *Экология. Экономика. Информатика. Серия: системный анализ и моделирование экономических и экологических систем.* 1(3): 141–145. doi: 10.23885/2500-395x-2018-1-3-141-145

5. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б. 2013. Современные изменения водного режима рек в бассейне Дона. *Водные ресурсы*. 40(6): 544–556. doi: 10.7868/S0321059613060047

6. Матишов Г.Г., Григоренко К.С., Московец А.Ю. 2017. Механизмы осолонения Таганрогского залива в условиях экстремально низкого стока Дона. *Наука Юга России*. 13(1): 35–43. doi: 10.23885/2500-0640-2017-13-1-35-43

7. Киреева М.Б., Илич В.П., Гончаров А.В., Богачев А.Н., Фролова Н.Л., Пахомова О.М., Соловьева В.В. 2018. Влияние маловодья 2007–2015 гг. в бассейне р. Дон на состояние водных экосистем. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 5: 3–13.

8. Матишов Г.Г., Клещенков А.В., Григоренко К.С., Московец А.Ю., Кириллова Е.Э. 2018. Изменение водного баланса в бассейне Нижнего Дона в условиях маловодья. *Наука Юга России*. 14(3): 45–55. doi: 10.7808/S25000040180300

9. Панин Г.Н., Выручалкина Т.Ю., Гречушникова М.Г., Соломонова И.В. 2016. Особенности гидрологического режима Цимлянского водохранилища при климатических изменениях в бассейне Дона. *Водные ресурсы*. 43(2): 111–121.

10. Мартышева Н.А., Хоружая Т.А. 2017. Особенности «цветения» воды Цимлянского водохранилища сине-зелёными микроводорослями. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки.* 2: 136–141. doi: 10.23683/0321-3005-2017-2-136-141

11. Матишов Г.Г. 2019. Экспедиция на научно-исследовательском судне «Профессор Панов» (апрель 2018 г.): предварительные результаты наблюдений за экстремальным паводком на Нижнем Дону и его влияние на гидрологический режим. *Океанология*. 59(1): 163–165. doi: 10.31857/S0030-1574591163-165

12. Клещенков А.В., Московец А.Ю. 2018. Результаты изучения гидролого-гидрохимических характеристик Цимлянского водохранилища и Нижнего Дона в период сильного половодья. *Экология. Экономика. Информатика. Серия: системный анализ и моделирование экономических и экологических систем.* 1(3): 184–187. doi: 10.23885/2500-395x-2018-1-3-184-187

13. Глущенко Г.Ю. 2020. Мониторинговые исследования «цветения» воды на Цимлянском водохранилище и Нижнем Дону в сентябре 2018 и 2019 гг. В кн.: *Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов («Опасные явления – II»): материалы II Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова (г. Ростов-на-Дону, 6–10 июля 2020 г.).* Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 313–317.

14. *Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений*. 1983. Л., Гидрометеоиздат: 239 с.

15. Булышева Н.И. 2012. Зообентос приплотинного участка Цимлянского водохранилища. В кн.: *Материалы Международной научной конференции, посвященной 150-летию Н.М. Книповича «Экологическая безопасность приморских регионов: порты, берегозащита, рекреация, марикультура» (Ростов-на-Дону, 05–08 июля 2012 г.).* Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 78–79.

16. Anderson M.J., Gorley A.M., Clarke K.R. 2008. *PERMANOVA+ for PRIMER: guide to software and statistical methods*. Plymouth, PRIMER-E: 214 p.

17. Clarke K.R., Gorley R.N. 2006. *PRIMER v6: User Manual/Tutorial*. Plymouth, PRIMER-E: 192 p.

18. Горская О.И., Яковлев С.В., Черешнева Л.А., Сапельников В.М. 2017. Результаты многолетнего биологического мониторинга в Цимлянском водохранилище в районе продувки водоема-охладителя Ростовской АЭС. *Глобальная ядерная безопасность*. 2(23): 7–20.

19. Сипко Л.Л. 1998. Особенности экологии бентических и придонных сообществ Новосибирского водохранилища. В кн.: *Материалы научных чтений, посвященных памяти профессора Бодо Германовича Иоганзена «Состояние водных экосистем Сибири и перспективы их использования» (Томск, 22–23 января 1998 г.)*. Томск, изд-во ТГУ: 306–308.

20. О режиме работы Цимлянского водохранилища по состоянию на 28.05.2018 г. 2018. *Донское бассейновое водное управление Федерального агентства водных ресурсов.* URL: http://www.donbvu.ru/news/14038.html (дата обращения: 18.08.2018).

REFERENCES

1. Denisova A.I. 1979. *Formirovanie gidrokhimicheskogo rezhima vodokhranilishch Dnepra i metody ego prognozirovaniya.* [*Formation of the hydrochemical regime of the Dnieper reservoirs and methods of forecasting it*]. Kiev, Naukova dumka: 292 p. (In Russian).

2. Miroshnichenko M.P. 1982. [The structure and productivity of the benthos biocenoses of the Tsimlyansk Reservoir]. In: *Sbornik trudov Gosudarstvennogo nauchno-issledovatel'skogo instituta ozernogo i rechnogo rybnogo hozyaystva. № 184.* [*Collection of Proceedings of the State Scientific Research Institute of Lake and River Fisheries. No 184*]. Leningrad, State Scientific Research Institute of Lake and River Fisheries: 35–48. (In Russian).

3. *Tsimlyanskoye vodokhranilishche: sostoyaniye vodnykh i pribrezhnykh ekosistem, problemy i puti ikh resheniya.* [*The Tsimlyansk Water Reservoir: the Conditions of Water and Coastal Ecosystems, the Problems and the Ways of their Solution*]. 2011. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 216 p. (In Russian).

4. Bulysheva N.I., Kleshchenkov A.V. 2018. [Macrozoobenthos of the coastal zone of the Tsimlyansk Reservoir]. *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: sistemnyy analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh sistem.* 1(3): 141–145. (In Russian). doi: 10.23885/2500-395x-2018-1-3-141-145

5. Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B. 2013. Current changes in river water regime in the Don River basin. *Water Resources*. 40(6): 573–584. doi: 10.1134/S0097807813060043

6. Matishov G.G., Grigorenko K.S., Moskovets A.Yu. 2017. [The salinization mechanisms in the Taganrog Bay under the conditions of the Don River extremely low runoff]. *Nauka Yuga Rossii*. 13(1): 35–43. (In Russian). doi: 10.23885/2500-0640-2017-13-1-35-43

7. Kireeva M.B., Ilich V.P., Goncharov A.V., Bogachev A.N., Frolova N.L., Pakhomova O.M., Solovieva V.V. 2018. [Influence of 2007–2015 extreme low-flow period in the Don River basin on water ecosystems]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 5: 3–13. (In Russian).

8. Matishov G.G., Kleshchenkov A.V., Grigorenko K.S, Moskovets A.Yu., Kirillova E.E. [Water balance changes in the basin of the Lower Don under conditions of lack of water]. *Nauka Yuga Rossii*. 14(3): 45–55. (In Russian). doi: 10.7808/S25000040180300

9. Panin G.N., Vyruchalkina T.Yu., Grechushnikova M.G., Solomonova I.V. 2016. Specific features of the hydrological regime of the Tsimlyansk Reservoir under climate changes in the Don basin. *Water Resources*. 43(2): 249–258. doi: 10.1134/S0097807816020123

10. Martysheva N.A., Horuzhaya T.A. 2017. [Features of the "bloom" of the water of the Tsimlyansk Reservoir with blue-green microalgae]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki*. 2: 136–141. (In Russian). doi: 10.23683/0321-3005-2017-2-136-141.

11. Matishov G.G. 2019. Expedition of the R/V Professor Panov (April 2018): preliminary results of observations of extreme flooding in the Lower Don region. *Oceanology*. 59(1): 151–152. doi: 10.1134/S0001437019010144

12. Kleshchenkov A.V., Moskovets A.Yu. 2018. [Results of studying the hydrological and hydrochemical characteristics of the Tsimlyansk reservoir and the Lower Don during the period of strong floods]. *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: sistemnyy analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh sistem*. 1(3): 184–187. (In Russian). doi: 10.23885/2500-395x-2018-1-3-184-187

13. Glushchenko G.Yu. 2020. [Monitoring of algal bloom in the Tsimlyansk Reservoir and the Lower Don in September 2018 and 2019]. In: *Zakonomernosti formirovaniya i vozdeystviya morskikh, atmosfernykh opasnykh yavleniy i katastrof na pribrezhnuyu zonu RF v usloviyakh global'nykh klimaticheskikh i industrial'nykh vyzovov («Opasnye yavleniya – II»): materialy II Mezhdunarodnoyj nauchnoy konferentsii pamyati chlena-korrespondenta RAN D.G. Matishova*. [*Regularities of Formation and Impact of Marine and Atmospheric Hazardous Phenomena and Disasters on the Coastal Zone of the Russian Federation under the Conditions of Global Climatic and Industrial Challenges ("Dangerous Phenomena – II") in memory of Corresponding Member RAS D.G. Matishov: Proceedings of the International Scientific Conference (Rostov-on-Don, Russia, 6–10 July 2020)*]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 313–317. (In Russian).

14. *Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza poverkhnostnykh vod i donnykh otlozheniy.* [*Guidance on methods of hydrobiological analysis of surface water and bottom sediments*]. 1983. Leningrad, Gidrometeoizdat: 239 p. (In Russian).

15. Bulysheva N.I. 2012. [Zoobenthos of the dam water area of the Tsimlyansk Reservoir]. In: *Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 150-letiyu N.M. Knipovicha "Ekologicheskaya bezopasnost' primorskikh regionov: porty, beregozashchita, rekreatsiya, marikul'tura"*. [*Materials of the International Scientific Conference dedicated to the 150th anniversary of N.M. Knipovich "Environmental safety of coastal regions: ports, coastal protection, recreation, mariculture" (Rostov-on-Don, Russia, 5–8 July 2012)*]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 78–79. (In Russian).

16. Anderson M.J., Gorley A.M., Clarke K.R. 2008. *PERMANOVA+ for PRIMER: guide to software and statistical methods*. Plymouth, PRIMER-E: 214 p.

17. Clarke K.R., Gorley R.N. 2006. *PRIMER v6: User Manual/Tutorial*. Plymouth, PRIMER-E: 192 p.

18. Gorskaya O.I., Yakovlev S.V., Chereshneva L.A., Sapelnikov V.M. 2017. [Results of long-term biological

monitoring in the Tsimlyansk Reservoir in the cooling pond purge of Rostov NPP]. *Global nuclear safety*. 2(23): 7–20. (In Russian).

19. Sipko L.L. 1998. [Features of the ecology of benthic communities of the Novosibirsk Reservoir]. In: *Materialy nauchnykh chteniy, posvyashchennykh pamyati professora Bodo Germanovicha Ioganzena "Sostoyanie vodnykh ekosistem Sibiri i perspektivy ih ispol'zovaniya"*. [*Materials of scientific readings dedicated to the memory of Professor Bodo Germanovich Ioganzen "The state of aquatic ecosystems in Siberia and the prospects for their use" (Tomsk, Russia, 22–23 January 1998)*. Tomsk, Tomsk State University: 306–308. (In Russian).
20. [About the operating mode of the Tsimlyansk Reservoir as of 28.05.2018]. 2018. *Donskoe basseynovoe vodnoe upravlenie Federal'nogo agentstva vodnykh resursov.* Available at: http://www.donbvu.ru/news/14038.html (accessed 18 August 2018). (In Russian).

Поступила 23.09.2020

УДК 594.1
DOI: 10.7868/S25000640200409

НОВЫЕ ДАННЫЕ О РАСПРОСТРАНЕНИИ *MYA ARENARIA* LINNAEUS, 1758 В ТАГАНРОГСКОМ ЗАЛИВЕ АЗОВСКОГО МОРЯ [1]

© 2020 г. А.И. Савикин[1]

Аннотация. Бореальный моллюск *Mya arenaria* Linnaeus, 1758 акклиматизировался в Азовском море в 1977 г. и встречается повсеместно на песчаных и илистых грунтах. До 2005 г. в Таганрогском заливе вид отмечался в самой западной части, образуя небольшие скопления с невысокой биомассой. С 2005 по 2016 г. в этой части акватории не фиксировался. Из-за ежегодного увеличения солености водоема с 2016 г. началось распространение вида на восток. В начале экспансии *M. arenaria* регистрировался только в районе косы Долгая с биомассой 2,6 г/м^2, а к 2019 г. встречался практически повсеместно до косы Кривая с биомассой до 756 г/м^2.

Ключевые слова: бентос, двустворчатые моллюски, *Mya arenaria*, расширение ареала, Таганрогский залив, Азовское море.

NEW DATA ON THE DISTRIBUTION OF *MYA ARENARIA* LINNAEUS, 1758 IN THE TAGANROG BAY OF THE SEA OF AZOV

A.I. Savikin[1]

Abstract. The boreal mollusk *Mya arenaria* Linnaeus, 1758 acclimatized to the Sea of Azov in 1977, and is found everywhere on sandy and silty ground. Until 2005, in Taganrog Bay, it was recorded in the westernmost part, forming small accumulations with a low biomass. From 2005 to 2016, it was not recorded in this area. Due to the annual increase in salinity, the distribution of the range to the east began in 2016. At the beginning of the expansion, *Mya arenaria* Linnaeus, 1758 was found only on the Dolgaya Spit with a biomass of 2.6 g/m^2, and by 2019 it was found almost everywhere up to the Krivaya Spit with a biomass of up to 756 g/m^2.

Keywords: benthos, bivalvia, *Mya arenaria*, distribution of the range, Taganrog Bay, Sea of Azov.

Вторая половина XX – начало XXI века характеризуются интенсификацией процесса вселения чужеродных видов практически во все водоемы Российской Федерации [1]. В связи с высокой биологической емкостью и специфическими гидрологическими условиями Азовского моря этот водоем уязвим для биологических инвазий [2]. Принято считать, что одним из первых видов, вселившихся во второй половине XX столетия в Азовское море и здесь успешно натурализовавшихся, является моллюск *Mya arenaria* Linnaeus, 1758 [3]. Нативный ареал этого вида – Северная Атлантика, Северное, Балтийское, Норвежское, Баренцево моря [4]. В настоящее время вид широко распространен в солоноватых водах на севере Европы и Северной Америки, где образует крупные скопления промыслового значения.

Mya arenaria – моллюск овальной формы с плотной раковиной до 13 см длиной. Вид встречается при солености от 6 до 17 ‰ в грунте на глубине 25–70 см, где ведет малоподвижный образ жизни. Моллюск способен выдерживать изменение факто-

[1] Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: aisavikin@gmail.com

[1] **Оригинальный текст:** *Савикин А.И.* Новые данные о распространении *Mya arenaria* Linnaeus, 1758 в Таганрогском заливе Азовского моря // Наука Юга России. 2020. Т. 16. № 4. С. 84–87.

ров среды в широких диапазонах, включая почти полное отсутствие кислорода [5].

Опыты с акклиматизацией *M. arenaria* в Азовском море как с одним из перспективных промысловых объектов были начаты в 1975 г. в изолированной лагуне на вершине Бердянской косы. Весной, после оттаивания лагуны, живые моллюски в ее акватории обнаружены не были.

Факт успешной акклиматизации *M. arenaria* в Азовском море был официально подтвержден 29.08.1977 г. в ходе обследования верхней части Бердянской косы, где среди выбросов ракуши была обнаружена молодь этого вида, а на глубине 2 м – несколько десятков створок и живые моллюски. Было сделано предположение, что личинки вида через промоину в пересыпи попали в Азовское море, где осели на песчаных грунтах вдоль Бердянской косы [3]. К 2004 г. моллюск стал обычным в зонах с частыми заморами на илисто-песчаных грунтах, в некоторых районах выступая субдоминантным видом в сообществах *Hydrobia* (Draparnaud, 1805) [6; 7]. Таким образом, после быстрой экспансии к началу XXI века *M. arenaria* повсеместно встречался в прибрежных зонах и мелководных лиманах на илистых и песчаных грунтах по всей акватории Азовского моря. В Таганрогском заливе в 2003 г. моллюск отмечался только в самой западной его части, не достигая высокой численности и биомассы (до 20 экз./м^2, 1,7 г/м^2) [8]. Современное распространение вида в Азовском море крайне неравномерное. Наиболее плотные поселения половозрелых особей были отмечены в Ясенском заливе и прилегающей акватории, в юго-восточной части Темрюкского залива. Вид обычен в северо-западной части моря (западные части Обиточной и Бердянской кос), а также в северной части Керченского пролива на глубинах 7–9 м [2]. Начиная с 2005 г. в пробах макрозообентоса, отобранных в акватории Таганрогского залива, *M. arenaria* не был отмечен.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом для исследования послужили пробы макрозообентоса, отобранные в ходе комплексных экспедиций по Таганрогскому заливу и Азовскому морю на научно-исследовательском судне «Денеб» в 2016–2019 гг. На каждой станции (табл. 1) отбирали по три количественных пробы по стандартным гидробиологическим методикам [9] с использованием дночерпателя ван Вина с площадью захвата 0,1 м^2. Пробы, отобранные дночерпателем, первично просеивали через сито (диаметр ячеи 0,5 см), после чего проводили оценку численности крупных представителей макрозообентоса и фиксацию в 70%-м этаноле. Далее пробы промывали в газовом мешке (диаметр ячеи 0,5 мм) и фиксировали в 4%-м формальдегиде.

Предварительные результаты обработки проб приведены в работе [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ

В августе 2016 г. у северной части косы Долгая были обнаружены живые особи *M. arenaria* (песчано-илистый грунт, глубина 4 м). Численность моллюска составила 30 экз./м^2, биомасса – 2,6 г/м^2. Вид в акватории Таганрогского залива отмечен впервые за последние 10 лет.

В 2017 г. биомасса *M. arenaria* в районе косы Долгая увеличилась до 333 г/м^2 при численности 40 экз./м^2. На станциях вблизи кос Кривая и Беглицкая были обнаружены ювенильные особи, напротив косы Кривая с численностью 30 экз./м^2 и биомассой 0,1 г/м^2, напротив косы Беглицкая – 10 экз./м^2, 0,01 г/м^2.

В 2018 г. было отмечено несколько крупных скоплений: напротив г. Ейска с численностью 50 экз./м^2 и биомассой 234,1 г/м^2 и соизмеримое с ним напротив с. Молчановка с численностью 30 экз./м^2 и биомассой 140 г/м^2. В 2019 г. на этих станциях еще

Таблица 1. Координаты станций отбора проб в Азовском море в 2016–2019 гг.
Table 1. Coordinates of sampling stations in the Sea of Azov in 2016–2019

Станция Station	Координаты Coordinates	
	N	E
Коса Должанская / Dolgaya Spit	46,7002	37,7348
Коса Кривая / Krivaya Spit	46,95	38
Коса Беглицкая / Beglitskaya Spit	47,016667	38,57
Ейск / Yeysk	46,833333	38,22
Молчановка / Molchanovka	46,9	38,62

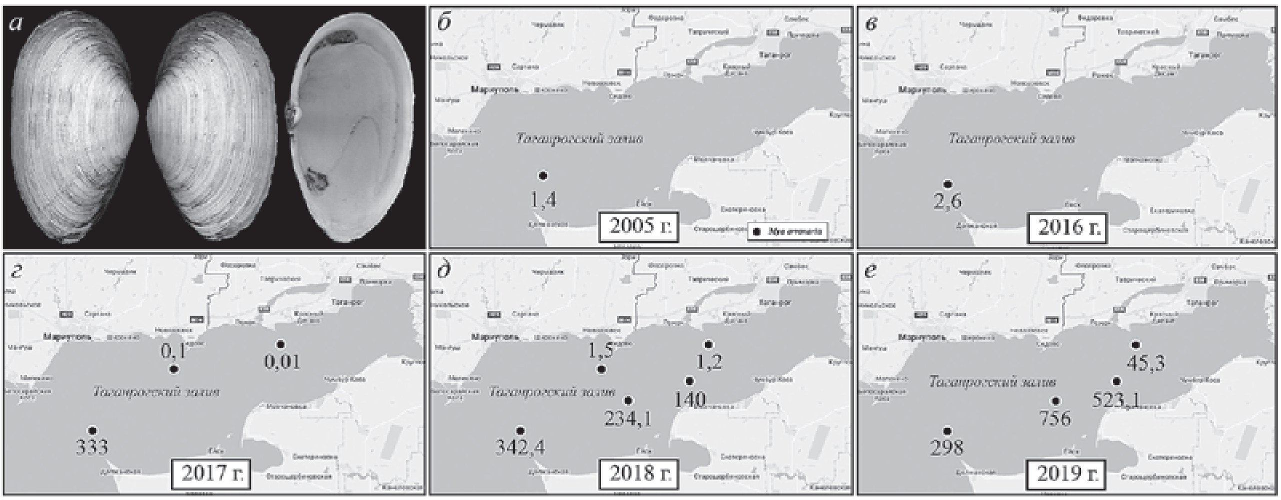


Рис. 1. Расширение ареала и увеличение биомассы *Mya arenaria* в 2005–2019 гг. [10]. *а* – *Mya arenaria* Linnaeus, 1758; *б*–*е* – биомасса (г/м²) в разные годы.
Fig. 1. Expansion of the range and increase of biomass of *Mya arenaria* in 2005–2019 [10]. *а* – *Mya arenaria* Linnaeus, 1758; *б*–*е* – biomass (g/m²) in different years.

больше увеличилась биомасса этого вида – до 756 и 523,1 г/м² при численности 168 и 116 экз./м². В самом восточном местонахождении, напротив косы Беглицкая, биомасса достигла 45,3 г/м² и численность 8 экз./м². На рисунке 1 отображено расширение ареала и рост биомассы этого вида.

Таким образом, к настоящему времени ареал *M. arenaria* занимает бóльшую часть Таганрогского залива. Такие изменения, вероятнее всего, связаны с постепенным увеличением солености, отмечающимся в этой акватории начиная с 2009 г. [11; 12]. Вдоль разреза коса Очаковская – Таганрог во все сезоны начиная с 2009 г. фиксировалась соленость воды от 4–6 до 8–11 ‰ [11–13]. Эти величины в несколько раз выше среднемноголетних значений (1,2–1,6 ‰) [13]. В результате увеличения солености произошло изменение ареалов и количественных характеристик некоторых ценозообразующих видов [14]. С одной стороны, в условиях хронической гипоксии *M. arenaria* замещает в сообществах более требовательные к содержанию растворенного кислорода аборигенные виды. С другой – предположительно, может заметно потеснить автохтонные виды. Принимая во внимание, что *M. arenaria* прекрасно адаптирован к заморам и придонному дефициту кислорода – явлениям, характерным для Азовского моря, – необходимо продолжить дальнейшие наблюдения за изменением границ ареала этого вида в Таганрогском заливе в условиях осолонения.

Работа выполнена в рамках ГЗ НИР ЮНЦ РАН № АААА-А18-118122790121-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Самые опасные инвазионные виды России (ТОП-100).* 2018. М., Товарищество научный изданий КМК: 688 с.
2. Набоженко М.В., Шохин И.В., Булышева Н.И. 2010. Зообентос. В кн.: *Роль вселенцев в формировании структуры, биоразнообразия и продуктивности эстуарных экосистем Азовского и Чёрного морей.* Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 20–27.
3. Савчук М.Я. 1980. *Mya arenaria* L. – новый элемент в фауне Азовского моря. *Вестник зоологии.* 5: 11–15.
4. Strasser M. 1999. *Mya arenaria* – an ancient invader of the North Sea coast. *Helgoländer Meeresuntersuchungen.* 52: 309–324. doi: 10.1007/BF02908905
5. Савчук М.Я. 1976. Акклиматизация двустворчатого моллюска *Mya arenaria* в Черном море. *Биология моря.* 6: 40–46.
6. Набоженко М.В., Шохин И.В., Сарвилина С.В., Коваленко Е.П. 2006. Современное состояние макрозообентоса Азовского моря. *Вестник Южного научного центра.* 2(2): 83–92. doi: 10.23885/1813-4289-2006-2-2-83-92
7. Шохин И.В., Набоженко М.И., Сарвилина С.В., Титова Е.П. 2006. Современное состояние и закономерности распределения донных сообществ Таганрогского залива. *Океанология.* 46(3): 432–441.
8. Шохин И.В., Набоженко М.В., Титова Е.П., Сарвилина С.В. 2005. Современное состояние макрозообентоса Таганрогского залива. В кн.: *Экосистемные исследования среды и биоты Азовского бассейна и Керченского пролива. Т. VII.* Апатиты, изд-во КНЦ РАН: 152–185.
9. *Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений.* 1983. Л., Гидрометеоиздат: 239 с.

10. Савикин А.И. 2020. Увеличение ареала *Mya arrenaria* Linnaeus, 1758 в Таганрогском заливе Азовского моря. В кн.: *Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов («Опасные явления – II»). Материалы II Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова (г. Ростов-на-Дону, 6–10 июля 2020 г.).* Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 341–342.

11. Матишов Г.Г., Григоренко К.С. 2017. Причины осолонения Таганрогского залива. *Доклады Академии наук.* 477(1): 92–96. doi: 10.7868/S086956521731019X

12. Дашкевич Л.В., Бердников С.В., Кулыгин В.В. 2017. Многолетнее изменение средней солености Азовского моря. *Водные ресурсы.* 44(5): 563–572. doi: 10.7868/S0321059617040046

13. Матишов Г.Г., Григоренко К.С., Московец А.Ю. 2017. Механизмы осолонения Таганрогского залива в условиях экстремально низкого стока Дона. *Наука Юга России.* 13(1): 35–43. doi: 10.23885/2500-0640-2017-13-1-35-43

14. Булышева Н.И., Сёмин В.Л., Шохин И.В., Савикин А.И., Коваленко Е.П., Бирюкова С.В. 2020. 7.6. Чужеродные виды зообентоса в экосистемах Нижнего Дона и Азовского моря на рубеже XX–XXI вв. В кн.: *Труды Южного научного центра Российской академии наук. Т. VIII. Моделирование и анализ опасных природных явлений в Азовском регионе.* Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 256–273. doi: 10.23885/1993-6621-2020-8-256-273

REFERENCES

1. *Samye opasnye invazionnye vidy Rossii (TOP-100).* [*The most dangerous invasive species in Russia (TOP-100)*]. 2018. Moscow, KMK Scientific Press Ltd.: 688 p. (In Russian).

2. Nabozhenko M.V., Shokhin I.V., Bulysheva N.I. 2010. [Zoobenthos]. In: *Rol' vselentsev v formirovanii struktury, bioraznoobraziya i produktivnosti estuarnykh ekosistem Azovskogo i Chernogo morey.* [*The introducers in the biodiversity and productivity of the Sea of Azov and the Black Sea*]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 20–27. (In Russian).

3. Savchuk M.Ya. 1980. [*Mya arenaria* L. – a new element in the fauna of the Sea of Azov]. *Vestnik zoologii.* 5: 11–15. (In Russian).

4. Strasser M. 1999. *Mya arenaria* – an ancient invader of the North Sea coast. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*. 52: 309–324. doi: 10.1007/BF02908905

5. Savchuk M.Ya. 1976. [Acclimatization of the bivalve mollusk *Mya arenaria* in the Black Sea]. *Biologiya morya.* 6: 40–46. (In Russian).

6. Nabozhenko M.V., Shokhin I.V., Sarvilina S.V., Kovalenko E.P. 2006. [Current condition of the macrozoobenthos of Azov Sea]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra.* 2(2): 83–92. (In Russian). doi: 10.23885/1813-4289-2006-2-2-83-92

7. Shokhin I.V., Nabozhenko M.V., Sarvilina S.V., Titova E.P. 2006. The present-day condition and regularities of the distribution of the bottom communities in Taganrog Bay. *Oceanology.* 46(3): 401–410. doi: 10.1134/S000143700603012X

8. Shokhin I.V., Nabozhenko M.V., Titova E.P., Sarvilina S.V. 2005. [The current state of the macrozoobenthos of the Taganrog Bay]. In: *Ekosistemnye issledovaniya sredy i bioty Azovskogo basseyna i Kerchenskogo proliva. T. VII.* [*Ecosystem research environment and biota of the Azov basin and the Kerch Strait. Vol. VII.*]. Apatity, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences: 152–185. (In Russian).

9. *Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza poverkhnostnykh vod i donnykh otlozheniy.* [*Guidance on methods of hydrobiological analysis of surface water and bottom sediments*]. 1983. Leningrad, Gidrometeoizdat: 239 p. (In Russian).

10. Savikin A.I. 2020. [Extension of *Mya arrenaria* Linnaeus, 1758 geographic range in the Taganrog bay of the Sea of Azov]. In: *Zakonomernosti formirovaniya i vozdeystviya morskikh, atmosfernykh opasnykh yavleniy i katastrof na pribrezhnuyu zonu RF v usloviyakh global'nykh klimaticheskikh i industrial'nykh vyzovov ("Opasnye yavleniya – II"). Materialy II Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii pamyati chlena-korrespondenta RAN D.G. Matishova (g. Rostov-na-Donu, 6–10 iyulya 2020 g.).*[*Regularities of formation and impact of marine and atmospheric hazardous phenomena and disasters on the coastal zone of the Russian Federation under the conditions of global climatic and industrial challenges ("Dangerous Phenomena – II"). Proceedings of the II International Scientific Conference in memory of Corresponding Member RAS D.G. Matishov (Rostov-on-Don, Russia, 6–10 July 2020)*]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 341–342. (In Russian).

11. Matishov G.G., Grigorenko K.S. 2017. Causes of salinization of the Gulf of Taganrog. *Doklady Earth Sciences.* 477(1): 1311–1315. doi: 10.1134/S1028334X17110034

12. Dashkevich L.V., Kulygin V.V., Berdnikov S.V. 2017. Many-year variations of the average salinity of the Sea of Azov. *Water resources.* 44(5): 749–757 doi: 10.1134/S0097807817040042

13. Matishov G.G., Grigorenko K.S., Moskovets A.Yu. 2017. [The salinization mechanisms in the Taganrog Bay under the conditions of the Don River extremely low runoff]. *Nauka Yuga Rossii.* 13(1): 35–43. (In Russian). doi: 10.23885/2500-0640-2017-13-1-35-43

14. Bulysheva N.I., Semin V.L., Shokhin I.V., Savikin A.I., Kovalenko E.P., Biryukova S.V. 2020. [Non-native species of zoobenthos in the ecosystems of the Lower Don and the Sea of Azov at the turn of the 20th-21st centuries]. In: *Trudy Yuzhnogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. T. VIII. Modelirovanie i analiz opasnykh prirodnykh yavleniy v Azovskom regione.* [*Proceedings of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences. Vol. VIII. Modeling and analysis of natural hazards in the Azov region*]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 256–273. (In Russian). doi: 10.23885/1993-6621-2020-8-256-273

Поступила 11.08.2020

УДК 597.2/.5:576.8(282.247.36)
DOI: 10.7868/S25000640210109

АНАЛИЗ ЭПИЗООТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЫБ ДЕЛЬТЫ ДОНА И ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ТАГАНРОГСКОГО ЗАЛИВА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ[1]

© 2021 г. А.В. Казарникова[1]

Аннотация. Обобщены сведения по зараженности паразитами сельди *Alosa immaculate*, тарани *Rutilus rutilus*, судака *Sander lucioperca*, сазана *Cyprinus carpio*, карася серебряного *Carassius gibelio*, леща *Abramis brama*, бычка-сирмана *Ponticola syrman*, бычка-песочника *Neogobius fluviatilis*, бычка-кругляка *N. melanostomum* на основании собственных и литературных данных. Спектр паразитических организмов у рыб в дельте р. Дон и восточной части Таганрогского залива в 2019–2020 гг. включал представителей 9 классов: по 1 виду Myxrosporea, Peritricha, Bivalvia, по 3 вида Myxosporidia и Cestoda, 10 видов Monogenea, 6 видов Trematoda, 4 вида Nematoda и 5 видов Crustacea. В общей сложности у представителей азовской ихтиофауны выявлено 33 вида и не определенных до вида паразитов, из которых доминирующее положение (81 %) занимали пресноводные виды. Состав паразитов обследованных рыб отличался низким видовым разнообразием, количественные показатели – широкой вариабельностью. Выявлены потенциально патогенные для здоровья рыб виды (*Myxobolus sandrae*, *Dactylogyrus extensus*, *D. vastator*, *Diplozoon paradoxum*, *Gyrodactylus sprostonae*, *Ancyrocephalus paradoxus*, *Caryophyllaeus laticeps*, *Khawia sinensis*, *Diplostomum spathaceum*, Unionidae gen. sp., *Achtheres percarum*). Дан анализ эпизоотологической ситуации в дельте р. Дон и в восточной части Таганрогского залива и выделены возбудители, вызывающие заболевания рыб (*Ligula intestinalis*, *Digramma interrupta*), животных и человека (*Apophallus donicus*, *Cryptocotyle concava*, *C. lingua*, *Hysterothylacium aduncum*, *Eustrongylides excisus*).

Ключевые слова: паразиты, заболевания, рыбы, Таганрогский залив, дельта Дона.

THE ANALYSIS OF THE EPIZOOTIC SITUATION IN THE DON RIVER DELTA AND THE EASTERN PART OF THE TAGANROG BAY UNDER PRESENT CONDITIONS

A.V. Kazarnikova[1]

Abstract. Information on parasite infestation of herring *Alosa immaculate*, roach *Rutilus rutilus*, pike perch *Sander lucioperca*, carp *Cyprinus carpio*, silver carp *Carassius gibelio*, bream *Abramis brama*, Syrman-goby *Ponticola syrman*, sand-goby *Neogobius fluviatilis*, round-goby *N. melanostomum* is generalized on the basis of own and literature data. The spectrum of fish parasitic organisms in the delta of the Don River and the eastern part of the Taganrog Bay included representatives of 9 classes: 1 species each in Myxrosporea, Peritricha, Bivalvia, 3 species each in Myxosporidia and Cestoda, Monogenea – 10 species, Trematoda – 6 species, Nematoda – 4 species, and Crustacea – 5 species. In total, among representatives of the Azov ichthyofauna, 33 species taxa of parasites were found including unidentified ones, with freshwater forms dominating (81 %). The qualitative composition of the parasites of the examined fish was characterized by low species diversity, quantitative indicators – by wide variability. Potentially pathogenic species for fish health have been identified (*Myxobolus sandrae*, *Dactylogyrus extensus*, *D. vastator*, *Diplozoon paradoxum*, *Gyrodactylus sprostonae*, *Ancyrocephalus paradoxus*, *Caryophyllaeus laticeps*, *Khawia sinensis*, *Diplostomum spathaceum*, Unionidae gen. sp., *Achtheres percarum*). The analysis of the epizootological situation in the Don

[1] Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: kazarnikova@ssc-ras.ru

[1] **Оригинальный текст:** *Казарникова А.В.* Анализ эпизоотического состояния рыб дельты Дона и восточной части Таганрогского залива в современных условиях // Наука Юга России. 2021. Т. 17. № 1. С. 97–108.

River delta and the eastern part of the Taganrog Bay was given, and the parasites that cause diseases of fish (*Ligula intestinalis*, *Digramma interrupta*), animals and humans (*Apophallus donicus*, *Cryptocotyle concava*, *C. lingua*, *Hysterothylacium aduncum*, *Eustrongylides excisus*) were identified.

Keywords: parasites, diseases, fish, Taganrog Bay, Don River delta.

Азовское море в недалеком прошлом характеризовалось высоким уровнем вылова и воспроизводства ценных промысловых видов рыб. Под воздействием множества факторов, как природных, так и антропогенных, произошли изменения в экосистеме моря и всего бассейна. С 2009 по 2015 г. средний показатель солености для Азовского моря увеличился с 11 до 12,8 ‰. Средняя величина солености по Таганрогскому заливу в 2015 г. составила 6,4 ‰. Причины увеличения солености кроются во внутривековой цикличности климата (30, 60 лет), в уменьшении стока после перекрытия Дона Цимлянской плотиной в 1952 г. и учащении лет с аномально низким стоком [1]. Все это не могло не оказать влияния на кормовую базу, запасы и уловы промысловых рыб.

Согласно опубликованным данным [1] величина вылова с начала 1980-х гг. по настоящее время снизилась в 3–4 раза. Если в 1980-х гг. наряду с другими видами рыб значимыми были уловы леща *Abramis brama* (Linnaeus, 1758), судака *Sander lucioperca* (Linnaeus, 1758), тарани *Rutilus rutilus* (Linnaeus, 1758), сазана *Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758, сельди *Alosa immaculata* Bennett, 1835, то в настоящее время доминируют бычки семейства Gobiidae (бычок-кругляк *Neogobius melanostomum* (Pallas, 1814), бычок-сирман *Ponticola syrman* (Nordmann, 1840), бычок-песочник *Neogobius fluviatilis* (Pallas, 1814) и др.) и серебряный карась *Carassius gibelio* (Bloch, 1782).

Фауна паразитов рыб р. Дон, Таганрогского залива и Азовского моря хорошо изучена [2–10]. Согласно проведенным исследованиям у сельди было обнаружено 18, у тарани – 29, у судака – 37, у сазана – 27, у карася серебряного – 31, у леща – 32, у бычка-сирмана – 20, у бычка-песочника – 19, у бычка-кругляка – 24 вида-паразита (рис. 1). Наибольшее видовое разнообразие было зарегистрировано для простейших, трематод и нематод.

Поскольку перечисленные выше виды рыб являются промысловыми и играют важную роль в рационе человека, большой теоретический и практический интерес представляет изучение их паразитов – видового состава, жизненных циклов, степени патогенности, медицинского и эпизоотологического значения.

Постоянно меняющаяся экологическая обстановка оказывает влияние как на видовое разнообразие, так и на численность паразитов. Выявляются потенциально патогенные виды, представляющие угрозу для здоровья рыб не только в естественных водоемах, но и при выращивании в аквакультуре. Важно знать, является ли водоем природным очагом паразитарных болезней, а также определить наличие в нем круга промежуточных и резервуарных хозяев возбудителей. Известны случаи распространения возбудителей болезней при миграции проходных и полупроходных рыб, птиц.

Целью настоящего исследования было изучить фауну паразитов рыб, выделить патогенные виды и

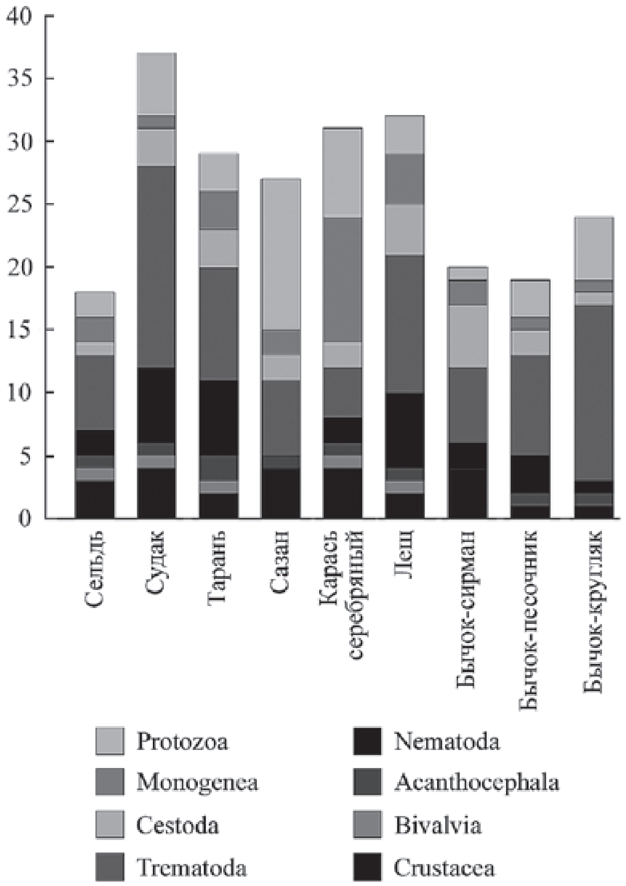


Рис. 1. Таксономический состав паразитов рыб дельты р. Дон, Таганрогского залива и Азовского моря.
Fig. 1. Taxonomic structure of fish parasites from delta of the Don River, the Taganrog Bay and the Sea of Azov.

заболевания рыб, провести анализ эпизоотической ситуации в водоемах дельты р. Дон и в восточной части Таганрогского залива в современных условиях.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом для настоящей работы послужили паразитологические исследования, проводившиеся сотрудниками Южного научного центра Российской академии наук в 2019–2020 гг. в дельте р. Дон (Свиное гирло) и Таганрогском заливе (восточная часть), а также данные, опубликованные в литературе.

Методом неполного (1207 экз.) и полного (225 экз.) паразитологического вскрытия обследовано 9 видов рыб из четырех семейств: Сельдевых (Clupeidae) – сельдь черноморско-азовская проходная (30 экз.); Карповых (Cyprinidae) – лещ (15), карась серебряный (30), сазан (15), полупроходная форма плотвы (тарань) (30); Окуневых (Percidae) – судак (15); Бычковых (Gobiidae) – бычок-кругляк (30), бычок-сирман (30), бычок-песочник (30).

Вскрытие рыб, сбор, фиксацию и дальнейшую обработку паразитов производили по общепринятым методикам [11]. Определение паразитов проводили по трехтомному «Определителю паразитов пресноводных рыб фауны СССР» [12–14]. Номенклатура таксонов приведена согласно Всемирному реестру морских видов (World Register of Marine Species (WoRMS), http://www.marinespecies.org/).

В работе использованы традиционные показатели зараженности: экстенсивность инвазии (ЭИ) – доля зараженных рыб в выборке (%); интенсивность инвазии (ИИ) – число особей паразита в отдельной инвазированной рыбе (экз.); средняя интенсивность инвазии (ИИср.) – сумма всех паразитов одного вида, деленная на число зараженных особей-хозяев одного вида (экз.); индекс обилия (ИО) – среднее число паразитов на одну особь в изученной выборке хозяина (экз.).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Спектр паразитических организмов в рыбах в дельте р. Дон и в восточной части Таганрогского залива включал представителей 9 классов: по 1 виду Myxrosporea, Peritricha, Bivalvia, по 3 вида Myxosporidia и Cestoda, 10 видов Monogenea, 6 видов Trematoda, 4 вида Nematoda и 5 видов Crustacea (табл. 1). В общей сложности у представителей азовской ихтиофауны выявлено 33 вида и не определенных до вида паразитов, из которых доминирующее положение (81 %) занимают пресноводные виды.

Паразитофауна черноморско-азовской проходной сельди была представлена 8 видами: по 1 виду миксоспоридий, моногеней, нематод, моллюсков, ракообразных и 3 вида трематод. При этом 3 вида – *Mazocraes alosae* Hermann, 1782, *Pseudopentagramma simmetricum* (Chulkova, 1939) и *Mothocya taurica* (Czerniavsky, 1868) – являются специфичными для сельдевых.

Немногочисленных жаберных паразитов, принесенных сельдью из моря и обладающих специфичностью к морским сельдям – рачков *Mothocya taurica* (ЭИ = 6,7 %, ИИср. = 1 экз.) и моногеней *Mazocraes alosae* (ЭИ = 13,3 %, ИИср. = 1 экз.), – отмечали в конце апреля – начале мая в период массового захода сельди из Таганрогского залива в дельту р. Дон. В более позднее время – в конце мая и начале июня – эти виды паразитов на жабрах не обнаружены. Также на жабрах 13 % сельдей были отмечены единичные миксоспоридии *Myxobolus* sp.

По данным работы [4], В.П. Каменев, изучавший изменение фауны паразитов сельди в связи с миграцией рыб из Черного моря в Азовское и в р. Дон, установил прямую зависимость между показателями инвазии и миграцией. Сельдь освобождается от эктопаразитов при длительном нахождении в дельте реки и невозможности дальнейшей миграции в реку из-за низких температур воды.

В отличие от моногеней, обладающих специфичностью к определенным видам рыб, кишечные трематоды и нематоды регистрируются у многих черноморских сельдевых, преимущественно пелагических планктофагов. Такую гостальную приуроченность можно объяснить особенностями жизненного цикла трематод и круглых червей, которые должны включать в качестве дополнительного хозяина планктонных беспозвоночных.

Как и в предыдущие годы, у обследованных рыб наиболее часто встречались трематоды *Pseudopentagramma simmetricum* (66,7 %), *Hemiurus appendiculatus* (Rudolphi, 1802) (33,3%) и нематоды *Hysterothylaceum aduncum* (Rudolphi, 1802) (33,3 %), уровень заражения данными видами был достаточно высоким (ИИср. = 51,6 ± 26,06 экз. / ИО = 27,5 ± 19,03 экз., ИИср. = 13 ± 5,21 экз. / ИО = 4,3 ± 3,01 экз., ИИср. = 63,4 ± 24,04 экз. / ИО = 21,1 ± 4,13 экз. соответственно). У отдельных рыб в кишечнике было обнаружено до 144 экз. нематод и 208 экз. трематод. Пики численности пе-

Таблица 1. Встречаемость паразитических видов у некоторых промысловых рыб в дельте р. Дон и в восточной части Таганрогского залива в 2020 г.
Table 1. The occurrence of parasitic species in some commercial fish in the delta of the Don River and in the eastern part of the Taganrog Bay in 2020

№	Виды паразитов Parasite species	Экологическая группа / Environmental group	Сельдь Herring	Тарань Roach	Лещ Bream	Серебряный карась / Silver carp	Сазан Carp	Судак Pike perch	Бычок-кругляк Round goby	Бычок-сирман Syrman goby	Бычок-песочник Sand goby
	Microsporea										
1	*Glugea* sp.	–	–	–	–	–	–	–	+	+	+
	Myxosporidia										
2	*Myxobolus* sp.	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–
3	*Myxobolus muelleri*	Пр.	–	–	+	+	+	–	–	–	–
4	*Myxobolus sandrae*	Пр.	–	–	–	–	–	+	–	–	–
	Peritricha										
5	*Trichodina* sp.	–	–	–	–	+	–	+	+	+	+
	Monogenea										
6	*Dactylogyrus wunderi*	Пр.	–	–	+	–	–	–	–	–	–
7	*D. anchoratus*	Пр.	–	–	–	–	+	–	–	–	–
8	*D. vastator*	Пр.	–	–	–	+	–	–	–	–	–
9	*D. crucifer*	Пр.	–	+	–	–	–	–	–	–	–
10	*D. spyrna*	Пр.	–	–	+	–	–	–	–	–	–
11	*D. extensus*	Пр.	–	–	–	+	+	–	–	–	–
12	*Diplozoon paradoxum*	Пр.	–	+	–	–	+	–	–	–	–
13	*Gyrodactylus sprostonae*	Пр.	–	–	–	+	–	–	–	–	–
14	*Mazocraes alosae*	М.	+	–	–	–	–	–	–	–	–
15	*Ancyrocephalus paradoxus*	Пр.	–	–	–	–	–	+	–	–	–
	Trematoda										
16	*Bucephalus polymorphus*	Пр.	–	–	–	–	–	+	–	+	+
17	*Pseudopentagramma simmetricum*	М.	+	–	–	–	–	–	–	–	–
18	*Hemiurus appendiculatus*	М.	+	–	–	–	–	–	–	–	–
19	*Paracoenogonimus ovatus*	Пр.	–	–	+	–	–	–	–	–	–
20	*Diplostomum spathaceum* met.	Пр.	–	–	–	–	–	–	–	+	+
21	*Diplostomum* sp. met.	Пр.	+	–	+	+	–	–	–	–	–
	Cestoda										
22	*Caryophyllaeus laticeps*	Пр.	–	–	+	–	–	–	–	–	–
23	*Khawia sinensis*	Пр.	–	–	–	–	+	–	–	–	–
24	*Digramma interrupta* pler.	Пр.	–	+	–	–	–	–	–	–	–
	Nematoda										
25	*Hysterothylacium aduncum*	М.	+	–	–	–	–	–	–	–	–
26	*Eustrongylides excisus* l.	Пр.	–	–	–	–	–	+	+	+	+
27	*Dichelyne minutus*	М.	–	–	–	–	–	–	–	+	+
28	*Nematoda* sp. l.	–	–	–	–	–	+	–	–	–	–
	Bivalvia										
29	Unionidae gen. sp.	Пр.	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Crustacea										
30	*Ergasilus lizae*	Пр.	–	–	–	–	–	–	–	+	+
31	*Achtheres percarum*	Пр.	–	–	–	–	–	+	–	–	–
32	*Caligus lacustris*	Пр.	–	–	–	+	+	–	–	–	–
33	*Mothocya taurica*	М.	+	–	–	–	–	–	–	–	–
Всего / In total			8	4	7	8	8	7	4	7	8

Примечание. Пр. – пресноводный; М. – морской.
Note. Пр. – freshwater; М. – marine.

речисленных видов отмечались в мае. В начале и середине лета уровень зараженности ими заметно снижался, а ближе к осени рыбы были практически свободны от паразитов.

А.И. Солонченко [4] сообщала о зараженности сельди *Hysterothylaceum aduncum* в 1953 г. на 33,3 % (ИИ = 3–8 экз.) в Азовском море, в 1982 г. – на 85,7 % (ИИ = 2–30 экз.) в Керченском проливе и на 14 % (ИИ = 5–9 экз.) в центральной части моря. В 2004 г. Г.А. Низова и Е.А. Лебедева [15] отмечали 100%-ю зараженность сельди нематодами в центральной части Азовского моря с максимальными показателями инвазии в 300 экз.

Паразит является патогенным для рыб и при высокой численности вызывает заболевание. В Черном море хозяином личиночной стадии нематоды могут быть представители ихтиофауны, ракообразные, моллюски и др. (разные экологические группы), участвующие в реализации жизненного цикла паразита [16].

На старте жизненного цикла *H. aduncum* первыми промежуточными хозяевами выступают многочисленные представители кормового зоопланктона. Вопрос об обязательности данной экологической группы в жизненном цикле нематоды не вызывает сомнения по причине многочисленных экспериментов по искусственному заражению копеподами *H. aduncum*, проведенных зарубежными исследователями на материале из разных регионов Мирового океана [16].

Функцию второго промежуточного хозяина в акватории Черного моря выполняют массовые виды планктофагов, в числе которых шпрот *Sprattus sprattus* (Linnaeus, 1758), хамса *Engraulis encrasicolus* (Linnaeus, 1758) и др. [17].

Роль окончательного хозяина *H. aduncum* в Черном море выполняют 29 видов хищников-ихтиофагов, но роль основных массовых видов принадлежит ставриде *Trachurus mediterraneus* (Steindachner, 1858) (ставрида играет роль как второго промежуточного, так и окончательного хозяина), сельди *Alosa immaculata*, мерлангу *Merlangius merlangus* (Linnaeus, 1758), калкану *Scophthalmus maeoticus* (Pallas, 1814) и морскому ершу *Scorpaena porcus* Linnaeus, 1758 [17]. Гистеротиляциум в отдельных публикациях рассматривается как возможный патоген для человека [18].

В дельте р. Дон сельдь приобрела 2 пресноводных вида – метацеркариев трематод *Diplostomum* sp. (ЭИ = 6,7 %, ИИср. = 1 экз.) и глохидий беззубок Unionidae gen. sp. (ЭИ = 6,7 %, ИИср. = 3 экз.), – которые были отмечены с низкой экстенсивностью и интенсивностью инвазии.

Паразиты полупроходной формы плотвы (тарани). Среди четырех видов паразитов у тарани доминировали специфичные для карповых рыб жаберные моногенеи *Diplozoon paradoxum* von Nordmann, 1832 (ЭИ = 46,7 %, ИИср. = 2,1 ± 0,34 экз.) и *Dactylogyrus crucifer* Wagener, 1857 (ЭИ = 26,7 %, ИИср. = 3,7 ± 1,37 экз.). Единичные личинки глохидий были отмечены также на жабрах 6,7 % рыб.

Ремнецы *Digramma interrupta* (Rudolphi, 1810) были обнаружены в полости тела двух из пяти обследованных тараней только осенью 2020 г. Вспышка численности данного вида (ЭИ = 100 %, ИИ = 1–6 экз., ИО = 2,3 ± 0,16 экз.) была зарегистрирована в летние месяцы 2012 г. в дельте р. Дон и в восточной части Таганрогского залива [8]. Было отмечено снижение темпа роста зараженных рыб на 10 %, а показателей массы на 61 %.

Ранее очаги диграммоза тарани в Таганрогском заливе и Азовском море отмечал П.А. Терехов [3]. В 1964–1965 гг. зараженность двух- и трехлеток достигала 80 %, в 1970–1971 гг. – 22 %, в 1972–1974 гг. – 8 % (при интенсивности инвазии 1–4 экз.). А.И. Солонченко [4] в прибрежной зоне Приморско-Ахтарска регистрировала *Ligula intestinalis* (Linnaeus, 1758) (ИИ = 1–2 экз.) у 100 % тарани в возрасте 3–4 года.

Зараженная рыба встречается преимущественно в более опресненной воде вследствие того, что веслоногие ракообразные, являющиеся первыми промежуточными хозяевами ремнецов, относятся с пресноводному – слабосолоноватоводному комплексу организмов. Тарань – второй промежуточный хозяин для представителей семейства Ligulidae. Инвазия рыб лигулидами происходит в раннем возрасте. Максимум заражения приходится на трехлетний возраст, что делает тарань более доступной рыбоядным птицам (большому баклану *Phalacrocorax carbo* (Linnaeus, 1758), хохотунье *Larus cachinnans* Pallas, 1811, черноголовому хохотуну *Ichthyaetus ichthyaetus* (Pallas, 1773), речной крачке *Sterna hirundo* Linnaeus, 1758, серой цапле *Ardea cinerea* Linnaeus, 1758).

Паразиты леща. У леща зарегистрировано 7 видов паразитов, которые относились к миксоспоридиям (1 вид), моногенеям (2 вида), цестодам (1 вид), трематодам (2 вида), моллюскам (1 вид), среди которых специфичными для карповых рыб являются *Dactylogyrus wunderi* Bychowsky, 1931, *D. sphyrna* Linstow, 1878 и *Caryophyllaeus laticeps* (Pallas, 1781).

Цисты миксоспоридий *Myxobolus muelleri* Bütschli, 1882 были отмечены на жабрах 26,7 % рыб со средней интенсивностью инвазии 24,0 ± 19,03 экз. У отдельных лещей зараженность достигала 81 экз.

Моногенеи были представлены типичными для леща *Dactylogyrus wunderi* и более типичными для густеры *D. spyrna*. Частота встречаемости *D. wunderi* была выше (ЭИ = 80 %), чем *D. spyrna* (ЭИ = 26,7 %). Уровень заражения обоими видами не был высоким: ИИср. = 7,8 ± 1,48 экз. / ИО = 6,2 ± 1,32 экз. для *D. wunderi* и ИИср. = 6,2 ± 1,97 экз. / ИО = 6,7 ± 1,01 экз. для *D. spyrna* при максимальном уровне заражения 15 экз. для *D. wunderi*. Ранее данные виды были отмечены у леща и другими авторами [6; 10] в р. Дон и восточной части Таганрогского залива.

Единичные (2–3 экз.) метацеркарии трематод *Diplostomum* sp. и глохидии беззубок Unionidae gen. sp. зарегистрированы у 6,7 % рыб.

Метацеркарии трематод *Diplostomum* sp. паразитируют в хрусталике глаза и при высокой численности могут вызывать заболевание рыб – диплостомоз. Возбудители широко распространены как в естественных водоемах, так и в рыбоводных хозяйствах Азовского бассейна. При диплостомозе мальков леща наблюдается снижение темпа роста на 12–24 % от нормы при интенсивности инвазии 3–12 экз. [9]. Жизненный цикл паразита протекает с участием трех хозяев: промежуточных – моллюсков семейства Lymnaeidae, рыб и круглоротых и окончательных – рыбоядных птиц, преимущественно чайковых и утиных.

Метацеркарии трематоды *Paracoenogonimus ovatus* Katsurada, 1914 были обнаружены в мышцах спины (30–62,5 %; 0,35–2,9 экз./1 г мышечной ткани), а также в жабрах и стекловидном теле леща из восточной части Таганрогского залива. В середине 2000-х гг. экстенсивность инвазии *P. ovatus* была 30 %, интенсивность 33,3 экз. [19]. Цикл развития *P. ovatus* сложный, происходит с участием трех хозяев: двух промежуточных (моллюсков и рыб) и окончательного (птицы, млекопитающие). При высокой интенсивности инвазии паразиты провоцируют гиперемию и резко выраженную инфильтрацию мышечных волокон рыб лейкоцитами, наблюдается повышенная микробная обсемененность мышечной ткани.

Т.В. Стрижакова с соавторами [9] выделяла метацеркарий у производителей (весна 2012 г.) и двухлеток (осень 2012–2013 гг.) леща. Зараженность рыб характеризовалась высокими показателями экстенсивности (ЭИ = 91,7–100 %) и низкими значениями интенсивности инвазии (ИИ = 0,4–3,9 экз.) и определялась как паразитоносительство.

Paracoenogonimus ovatus широко распространен среди донских рыб. Во время их нагульных миграций паразит может быть занесен в Таганрогский залив. Согласно опубликованным данным [4; 9] в круг вторых промежуточных хозяев, обеспечивающих циркуляцию *P. ovatus* в биоценозах р. Дон и Таганрогского залива, входят не только лещ, но и судак, карась, бычок-песочник, рыбец, сазан, тарань и пиленгас.

Личинки представителей класса двустворчатых моллюсков, Unionidae gen. sp., заражают рыб в разное время. Прикрепляясь к жабрам, глохидии вызывают разрастание жаберного аппарата, а при высокой интенсивности инвазии могут вызвать заболевание рыб.

Гвоздичник *Caryophyllaeus laticeps* был зарегистрирован в кишечнике 13,3 % рыб с невысокой интенсивностью заражения (ИИср. = 3,0 ± 1,00 экз. / ИО = 0,4 ± 0,36 экз.).

В прежние годы (1970-е, 1990-е, 2000-е) экстенсивность заражения гвоздичниками леща разных возрастных групп колебалась от 60 до 80 % при средней интенсивности инвазии до 46,2 экз. и максимальной 250 экз. [15]. Промежуточным хозяином *C. laticeps* являются олигохеты, которые с возрастом потребляются лещом гораздо интенсивнее. В кишечнике рыб гельминты становятся половозрелыми. Вид является патогенным и при высокой интенсивности заражения может вызывать гибель рыб.

С 1951 по 1969 г. лигулидозная инвазия леща была ведущей в водоемах Азовского бассейна. В 1970-е гг. наметилась тенденция к ее сокращению. В 2020 г. лентецы у леща зарегистрированы не были. С 2000 г. была отмечена тенденция снижения инвазии леща личинками нематод *Eustrongylides excisus* Jägerskiöld, 1909 [6]. В 2020 г. у леща паразит не обнаружен.

Паразиты серебряного карася. У карася отмечено 8 видов паразитов, принадлежащих к простейшим – 2 вида, моногенеям – 3 вида, трематодам, моллюскам, ракообразным – по 1 виду. Группа специфичных для карповых рыб паразитов была представлена моногенеями *Dactylogyrus vastator* Nybelin, 1924, *D. extensus* Mueller et Van Cleave, 1932 и *Gyrodactylus sprostonae* Ling, 1962.

Единичные миксоспоридии *Myxobolus muelleri*, триходины *Trichodina* sp., личинки глохидий Unionidae gen. sp. и ракообразные *Caligus lacustris* Steenstrup et Lütken, 1861 встречались на жабрах 13,3–20 % рыб. Интенсивность заражения этими видами не превышала 5 экз.

Доминирующее положение в фауне паразитов занимала группа моногеней, среди которых 40 % приходилось на *D. vastator* и *D. extensus* и 33,3 % на *Gyrodactylus sprostonae.* Интенсивность заражения жабр данными видами колебалась в пределах 3,8 ± 1,86... 8,6 ± 4,36 экз. и для взрослых рыб явной опасности не представляла.

Следует обратить внимание на наличие в паразитофауне карася таких патогенных для карповых рыб видов, как *D. vastator* и *D. extensus.* Паразиты нередко вызывают заболевание рыб [20] и чаще локализуются на жабрах особей серебряного карася, сазана и карпа старше 1 года. Оптимальной для развития является температура выше 20 °C, которая была отмечена в период исследований.

Моногенея *Gyrodactylus sprostonae* паразитирует на у серебряном карасе, сазане и других видах карповых рыб. Нередко вызывает гибель карпа в прудовых хозяйствах. При массовом заражении гиродактилюсами отмечаются патологические изменения в покровных и жаберных тканях. Ввиду простого жизненного цикла, бесполого размножения непосредственно на теле хозяина, живорождения инвазия гиродактилюсами у карася, широко распространившегося в водоемах Нижнего Дона и в восточной части Таганрогского залива, закономерна.

Паразиты сазана. Фауна паразитов сазана была представлена 8 видами, относящимися к миксоспоридиям – 1 вид, моногенеям – 3 вида, цестодам – 1 вид, нематодам – 1 вид, моллюскам – 1 вид, ракообразным – 1 вид. Доминирующее положение занимали специфичные для карповых рыб виды моногеней – *Dactylogyrus extensus*, *D. anchoratus* (Dujardin, 1845), *Diplozoon paradoxum* – и цестода *Khawia sinensis* Hsü, 1935.

Моногенеи *Dactylogyrus extensus* встречались на жабрах 33,3 %, *D. anchoratus* – 60 % и *Diplozoon paradoxum* – 53,3 % рыб. Индекс обилия и средняя интенсивность инвазии этими паразитами были невысокими: ИИср. = 13,0 ± 2,64 экз. / ИО = 4,3 ± 1,52 экз., ИИср = 10,4 ± 2,68 экз. / ИО = 6,1 ± 2,04 экз. и ИИср. = 2,0 ± 0,25экз. / ИО = 1,0 ± 0,18 экз. соответственно. Вышеперечисленные виды дактилогирусов представляют опасность для карповых хозяйств и нередко вызывают гибель культивируемых рыб. Известно, что *D. extensus* более интенсивно заражает старшие возрастные группы карпа и сазана при их переходе к придонному образу жизни, и при инвазии в 20–30 экз. может вызвать гибель карпа длиной 4–4,5 см [18]. Заболеваний, вызываемых представителями рода *Diplozoon* von Nordmann, 1832, у карповых рыб пока отмечено немного.

Единичные личинки нематод Nematoda sp. были замечены в полости тела 13,3 % рыб.

Цестоды *Khawia sinensis* зарегистрированы в кишечнике 13,3 % сазанов. Общая зараженность исследуемой выборки была невысокой и составила ИИср = 2,0 ± 1,00 экз. / ИО = 0,26 ± 0,37 экз. Инвазия сазана цестодами происходит при переходе молоди на активное питание олигохетами – промежуточными хозяевами паразитов [14]. Половой зрелости *Kh. sinensis* достигает в кишечнике карпа, сазана и их гибридов, нередко вызывая их заболевание в прудовых хозяйствах. Гибель рыб происходит при заражении несколькими десятками гвоздичников.

Остальные 3 вида паразитов – миксоспоридии *Myxobolus muelleri*, личинки глохидий Unionidae gen. sp. и паразитический рачок *Caligus lacustris* – были обнаружены на жабрах у 6,7–13,3 % рыб с невысокой интенсивностью заражения (ИИ = 7–9 экз.).

Паразиты судака. У судака зарегистрировано 7 видов паразитов, принадлежащих к простейшим (2 вида) и к моногенеям, трематодам, цестодам, ракообразным и моллюскам (по 1 виду). Группа специфичных паразитов судака была представлена *Ancyrocephalus paradoxus* Creplin, 1830 и *Achtheres percarum* Nordmann, 1832.

Единичные цисты миксоспоридий *Myxobolus sandrae* Reuss, 1906 и паразитические инфузории *Trichodina* sp. были обнаружены на поверхности тела и жабрах 13,3 % рыб.

Из многоклеточных, наиболее часто встречающихся в Таганрогском заливе, как и в прошлые годы, регистрировались паразитирующие на жабрах моногенеи *Ancyrocephalus paradoxus*, рачки *Achtheres percarum* и кишечные трематоды *Bucephalus polymorphus* (Baer, 1827). Все перечисленные виды встречались у 33,3–46,7 % рыб. Зараженность ими не была высокой и составила ИИср. = 9,2 ± 3,71 экз. / ИО = 3,36 ± 1,86 экз., ИИср. = 3,1 ± 0,59 экз. / ИО = 1,5 ± 0,41 экз. и ИИ ср. = 6,8 ± 1,82 экз. / ИО = 2,2 ± 1,05 экз. соответственно. Максимальные показатели инвазии были отмечены для *Ancyrocephalus paradoxus* – 20 экз.

Моногенеи *Ancyrocephalus paradoxus* и рачки *Achtheres percarum* являются специфичными для судака видами. В 1990–2000 гг. зараженность этими паразитами колебалась от 50 до 100 %, а интенсивность заражения от единиц до нескольких сотен экземпляров [15]. При высокой зараженности паразиты вызывали патологические изменения в жаберном аппарате рыб, что приводило к негативным изменениям в составе крови (анизоцитоз, наличие клеток в состоянии митотического деления), снижению темпа роста и упитанности рыбы, ее чувствительности к различным стрессовым факторам внешней среды и воздействию вторичных грибковых и бактериальных инфекций [21]. В последние годы уровень инвазии названными видами снизился, что связано с сокращением популяции судака в Азовском море.

В полости тела 26,7 % судаков были обнаружены личинки нематоды *Eustrongylides excisus* (ИИср. = 1,2 ± 0,25 экз. / ИО = 0,3 ± 0,12 экз.). В последние годы, согласно нашим и литературным данным [10], паразит регистрируется в основном у азовских бычков. Максимум зараженности судака (возраст 2–3 года) в прежние годы [5] приходился на весеннее время и составлял ЭИ = 46,2 % при ИИср. = 1,3 экз. и ИО = 0,6 экз. Паразит был зарегистрирован у леща, тарани, рыбца и карася. Первыми промежуточными хозяевами паразита служат олигохеты и мелкие ракообразные, а окончательными – рыбоядные птицы и в некоторых случаях человек.

В последние годы прослеживается тенденция снижения зараженности судака эустронгилидами, что проявляется как в уменьшении числа видов рыб, инвазированных нематодами, так и показателей инвазии. Это может быть связано с изменением водно-термического режима, развитием кормовой базы (олигохет) и структурой популяции доминирующих видов рыб.

Немногочисленные личинки глохидий Unionidae gen. sp. были выделены с жабр 46,7 % судаков. Интенсивность заражения отельных рыб не превышала 7 экз. при ИИср = 5,1 ± 2,89 экз. и ИО = 2,3 ± 1,84 экз.

Паразиты бычка-кругляка, бычка-песочника и бычка-сирмана. Фауна паразитов бычков была представлена 8 видами, принадлежащими к простейшим – 2 вида, трематодам – 2 вида, нематодам – 2 вида, ракообразным – 1 вид, моллюскам – 1 вид. Обнаруженные виды паразитов являются широко специфичными и способны заражать широкий круг хозяев.

На поверхности тела рыб и на жабрах бычков были отмечены триходины *Trichodina* sp. и глохидии беззубок Unionidae gen. sp. Инфузории были зарегистрированы в количестве единичных экземпляров у 33,3–60 % рыб. Личинки моллюсков отмечались у всех видов бычков в весенне-летний период (ИИ = 12–33 экз., ИИср. = 3,4 ± 1,13... 4,1 ± 2,02 экз., ИО = 5,1 ± 0,81... 7,8 ± 2,16 экз.).

Паразитический рачок *Ergasilus lizae* Krøyer, 1863 был зарегистрирован на жабрах 40 % бычков-песочников и 26,7 % бычков-сирманов летом. Интенсивность инвазии колебалась в пределах 2–17 экз. при ИИср = 3,7 ± 2,78... 4,8 ± 1,24 экз. и ИО = 5,1 ± 0,81... 7,8 ± 2,16 экз.

Среди полостных паразитов с наибольшей экстенсивностью и интенсивностью заражения была отмечена нематода *Dichelyne minutus* (Rudolphi, 1819) у бычка-песочника в кишечнике (ЭИ = 46,7 %, ИИср. = 4,3 ± 1,74 экз. / ИО = 2,2 ± 0,57 экз.) и нематода *Eustrongylides excisus* у бычка-кругляка в полости тела (ЭИ = 100,0 %, ИИср. = 4,0 ± 1,74 экз., ИИ = 3–5 экз.). Зараженность бычка-песочника *E. excisus* была ниже: (ЭИ = 40,0 %, ИИср. = 1,5 ± 1,5 экз. / ИО = 0,2 ± 0,55 экз.), так же как и бычка-сирмана – *D. minutus* (ЭИ = 33,3 %, ИИср. = 9,0 ± 2,49 экз. / ИО = 3,0 ± 1,44 экз.).

Потенциально опасные для здоровья человека личиночные формы нематоды *E. excisus* были зарегистрированы в полости тела, серозных покровах кишечника, паренхиме печени и почек, реже – в мышцах брюшной стенки или спины бычков. После вылова рыб паразит нередко мигрировал через мускулатуру к поверхности тела.

Одним из факторов, определяющих уровень заражения бычков *E. excisus*, является присутствие в их кормовом рационе олигохет – первых промежуточных хозяев паразита. Согласно нашим и литературным данным [10] с 2009 г. бычок-кругляк является одним из основных носителей *E. excisus*, что подтверждается наиболее высокими показателями экстенсивности его заражения нематодой в Таганрогском заливе и дельте р. Дон: ЭИ = 20–100 %, ИИ = 1,4–9,5 экз., ИО = 0,2–9,5 экз.

Миксоспоридии *Glugea* sp. были зарегистрированы в кишечнике обследованных бычков (ЭИ = 13,3–20 %) летом при невысоком индексе обилия (ИО = 0,3 ± 0,37 – 0,4 ± 0,26 экз.).

Летом в хрусталиках глаз бычка-песочника (20 %) и бычка-сирмана (26,7 %) были отмечены метацеркарии трематод *Diplostomum spathaceum* (Rudolphi, 1819) (ИИ = 3–6 экз.). *Bucephalus polymorphus* был обнаружен в мышцах 46,7 % бычков-песочников и 33,3 % бычков-сирманов с интенсивностью заражения 2–7 экз.

В дельте р. Дон нами не были обнаружены представители семейства Heterophyidae – *Apophallus donicus* (Skrjabin et Lindtrop, 1919), *Cryptocotyle concava* (Creplin, 1825), *C. lingua* (Creplin, 1825). Т.В. Стрижакова с соавторами [9] обнаруживала их на поверхности тела и плавниках бычка-кругляка и бычка-сирмана в Таганрогском заливе (Обиточная коса), в южном и западном районах Азовского моря, где соленость выше. В 2009–2013 гг. авторы зарегистрировали 100 % заражение бычков во всех пробах, отобранных в море. По-видимому, распространение представителей рода *Cryptocotyle* Lühe, 1899 связано с соленостью, так как виды являются морскими. В Таганрогском заливе наиболее высокие показатели интенсивности с максимумом более 550 экз. и индексом обилия около 150 экз. были отмечены в восточной его части (район с. Весело-Вознесенка) летом 2013 г. В западной части залива (Долгая коса) в аналогичный период этого же года значение индекса обилия было ниже в 2,4 раза.

В 70-е гг. прошлого века интенсивность заражения бычков в Азовском море *C. concavum* и *C. lingua* доходила до нескольких тысяч [2]. *Apophallus donicus* является пресноводным видом и чаще регистрировался в реках и лиманах бассейна Азовского моря.

В пищевой рацион рассматриваемых видов бычков входят моллюски родов *Littorina* Férussac, 1822, *Hydrobia* W. Hartmann, 1821, *Lithoglyphus* C. Pfeiffer, 1828 – первые промежуточные хозяева паразитов. Окончательными хозяевами паразитов служат рыбоядные птицы, а для *Apophallus donicus* – плотоядные млекопитающие. При высокой зараженности рыб метацеркариями трематод снижается упитанность рыб. При внедрении церкариев в кожу молоди рыб возникает острый церкариоз, нередко приводящий к гибели до 80 % молоди на нерестилищах. При хроническом течении заболевания масса инкапсулированных личинок трематод вызывает механическое сжатие тканей, нарушает кожное дыхание, ослизнение, при локализации на роговице глаз паразит вызывает слепоту.

Изменение солености Азовского моря, которое затронуло Таганрогский залив и дельту р. Дон, привело к неоднородности запасов фитопланктона, зоопланктона и зообентоса. Это усложнило для проходных и полупроходных рыб (леща, судака, тарани и др.) доступ к большей части кормовых ресурсов, что не могло не сказаться на их численности. В настоящее время преобладают короткоцикловые солоноватоводные виды рыб – тюлька, хамса, бычковые, – формирующие основу промысловых уловов в Азовском море.

Эпизоотическая ситуация находится под влиянием гидролого-гидрохимических факторов, которые могут вызывать как увеличение, так и уменьшение заболеваемости рыб. В общей сложности в районе исследований у представителей азовской ихтиофауны выявлено 32 вида паразитических организмов, из которых 81 % принадлежит к пресноводной фауне. При дальнейшем повышении солености воды в Таганрогском заливе и дельте р. Дон можно предполагать уменьшение числа пресноводных видов и замену их эвригалинными, а далее и морскими.

Проведенные исследования показывают, что паразитарные сообщества сельди, тарани, леща, карася, сазана, судака и бычков были представлены как широко распространенными, так и характерными для определенного круга рыб видами паразитов, имеющими прямой (51 %) и сложный (49 %) цикл развития. Состав паразитов обследованных рыб отличался низким видовым разнообразием, количественные показатели – широкой вариабельностью. При этом видовой состав паразитов зависел от пищевых предпочтений рыб, динамика заражения – от условий среды обитания, биологических особенностей паразитов и их хозяев.

В числе инвазий с показателями экстенсивности 60–100 % и со сравнительно высокими значениями интенсивности и максимальной величиной более 200 экз. зарегистрированы трематоды *Pseudopentagramma simmetricum* – морской вид, пришедший с сельдью из Черного моря (ЭИ = 66,7 %, ИИср. = 51,6 ± 26,06 экз., ИО = 27,5 ± 19,03 экз.). Далее следует инвазия леща эвригалинным видом *Dactylogyrus wunderi* (ЭИ = 80,0 %, ИИср. = 7,8 ± 1,48 экз., ИО = 6,2 ± 1,32 экз.), сазана пресноводным видом *D. anchoratus* (ЭИ = 60 %, ИИср. = 10,4 ± 2,68 экз., ИО = 6,1 ± 2,04 экз.) и бычка-кругляка пресноводным видом *Eustrongylides excisus* (ЭИ = 100,0 %; ИИср. = 4,0 ± 1,74 экз., ИИ = 3–5 экз.).

Цестоды *Caryophyllaeus laticeps* и *Digramma interrupta* в изменившихся условиях сохраняют свою численность благодаря отсутствию у них узкой специфичности ко второму промежуточному хозяину – рыбе.

Уменьшение численности судака привело к сокращению контактов между паразитом и хозяином, что выразилось в снижении уровня заражения специфичными к нему моногенеями *Ancyrocephalus paradoxus* и рачками *Achtheres percarum*.

К условно-патогенными видам паразитов относятся по 1 виду миксоспоридий (*Myxobolus sandrae*), трематод (*Diplostomum spathaceum*), моллюсков (Unionidae gen. sp.) и ракообразных (*Achtheres percarum*), 5 видов моногеней (*Dactylogyrus extensus*, *D. vastator*, *Diplozoon paradoxum*, *Gyrodactylus sprostonae*, *Ancyrocephalus paradoxus*), 2 вида цестод (*Caryophyllaeus laticeps*, *Khawia sinensis*). Это важно учитывать при анализе эпизоотической ситуации в дельте р. Дон, так как здесь находятся рыбоводные хозяйства, объектами выращивания которых являются проходные и полупроходные рыбы.

Зарегистрированы паразитарные болезни, приносящие вред организму хозяина (рыбе), вызываемые ремнецами семейства Ligulidae (*Ligula intestinalis* и *Digramma interrupta*), а также потенциально опасные для животных и человека, провоцируемые представителями семейств Heterophyidae (*Apophallus donicus*, *Cryptocotyle concava*, *C. lingua*), Anisakidae (*Hysterothylacium aduncum*) и Eustrongylidae (*Eustrongylides excisus*).

Дальнейшее осолонение Таганрогского залива может привести к проникновению в него морских видов паразитов и их хозяев. Могут получить более широкое распространение патогенные виды. В связи с обилием рыбоядных птиц в дельте р. Дон возможно появление и распространение заболеваний, вызываемых паразитами, которые заканчивают в этих птицах свой жизненный цикл. В сложившихся условиях необходим систематический мониторинг эпизоотической ситуации и контроль паразитологического состояния рыб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балыкин П.А., Куцын Д.Н., Орлов А.М. 2019. Изменения солености и видового состава ихтиофауны в Азовском море. *Океанология*. 59(3): 396–404. doi: 10.31857/S0030-1574593396-404

2. Найденова Н.Н. 1974. *Паразитофауна рыб семейства Бычковых Черного и Азовского морей.* Киев, Наукова думка: 185 с.

3. Терехов П.А. 1977. Паразиты некоторых промысловых рыб Таганрогского залива и Азовского моря. *Труды ВНИРО*. 127А: 172–185.

4. Солонченко А.И. 1982. *Гельминтофауна рыб Азовского моря.* Киев, Наукова думка: 153 с.

5. Шестаковская Е.В., Стрижакова Т.В., Низова Г.А., Казарникова А.В., Подзорова А.А., Ахметова Б.А. 1998. Оценка эпизоотического состояния популяции основных промысловых рыб Азовского бассейна. В кн.: *Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна. Сборник научных трудов АзНИИРХ*. Ростов н/Д, АзНИИРХ: 454–461.

6. Сыроватка Н.И., Низова Г.А. 2002. Инвазионные болезни рыб и значение паразитарного фактора для рыбного промысла в Азовском море. *Вопросы рыболовства.* 1(2–3): 132–133.

7. Казарникова А.В., Шестаковская Е.В., Стрижакова Т.В., Подзорова А.А. 2006. Паразиты и заболевания некоторых видов промысловых рыб Азовского бассейна в современных условиях. В кн.: *Экосистемные исследования Азовского, Черного, Каспийского морей. Т. 8.* Апатиты, КНЦ РАН: 207–208.

8. Матишов Г.Г., Казарникова А.В., Куцын Д.Н. 2013. Вспышка численности плероцеркоидов *Digramma interrupta* у азовской тарани (*Rutilus rutilus heckeli*). *Вестник Южного научного центра.* 9(1): 53–60.

9. Стрижакова Т.В., Мирзоян А.В., Шевкоплясова Н.Н., Бортников Е.С. 2014. Паразиты промысловых рыб Нижнего Дона и Азовского моря, потенциально опасные для человека. В кн.: *Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна. Сборник научных трудов (2012–2013 гг.).* Ростов н/Д, АзНИИРХ: 236–254.

10. Бортников Е.С., Стрижакова Т.В., Шевкоплясова Н.Н. 2017. Состояние паразитофауны основных промысловых рыб Азовского и Черного морей в 2016 г. В кн.: *Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 75-летию рыбохозяйственного образования на Камчатке (12–14 апреля 2017 г.). Часть I.* Петропавловск-Камчатский, КамчатГТУ: 46–49.

11. Быховская-Павловская И.Е. 1985. *Паразитологическое исследование рыб*. Л., Наука: 109 с.

12. *Определитель паразитов пресноводных рыб фауны СССР. Т. 1. Паразитические простейшие.* 1984. Л., Наука: 428 с.

13. *Определитель паразитов пресноводных рыб фауны СССР. Т. 2. Паразитические многоклеточные (первая часть).* 1985. Л., Наука: 425 с.

14. *Определитель паразитов пресноводных рыб фауны СССР. Т. 3. Паразитические многоклеточные (вторая часть).* 1987. Л., Наука: 583 с.

15. Низова Г.А., Лебедева Е.А. 2004. Современное эпизоотическое состояние промысловых рыб Азово-Черноморского бассейна. В кн.: *Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна. Сборник научных трудов АзНИИРХ.* Ростов н/Д, АзНИИРХ: 309–314.

16. Завьялов А.В. 2015. Структурно-функциональная организация паразструктуры паразитарной системы нематоды

Hysterothylacium aduncum (Nematoda: Ascaridata) в морских биоценозах крымского прибрежья. *Экосистемы*. 2(32): 8–14.

17. Гаевская А.В., Корнейчук Ю.М., Мачкевский В.К., Пронькина Н.В., Полякова Т.А., Мордвинова Т.Н., Попюк М.П. 2010. Особенности функционирования паразитарной системы нематоды *Hysterothylacium aduncum* (Nematoda: Ascaridata) в Черном море. *Морской экологический журнал*. 9(2): 37–50.
18. Гаевская А.В. 2005. *Анизакидные нематоды и заболевания, вызываемые ими у животных и человека.* Севастополь, ЭКОСИ-Гидрофизика: 223 с.
19. Матишов Г.Г., Пономарева Е.Н., Лужняк В.А., Старцев А.В. 2014. *Результаты ихтиологических исследований устьевого взморья Дона.* Ростов н/Д, ЮНЦ РАН: 160 с.
20. Бауер О.Н., Мусселиус В.А., Стрелков Ю.А. 1981. *Болезни прудовых рыб.* М., Легкая и пищевая промышленность: 320 с.
21. Обухова О.В., Ларцева Л.В. 2017. Микробная обсемененность судака при разной степени его инвазированности *Achtheres percarum*. В кн.: *Водные биоресурсы, аквакультура и экология водоемов. V Балтийский морской форум. Всероссийская научная конференция. Труды (Калининград, 23–24 мая 2017 г.).* Калининград, КГТУ: 291–294.

REFERENCES

1. Balykin P.A., Kutsyn D.N., Orlov A.M. 2019. Changes in salinity and species composition of ichthyofauna in the Sea of Azov. *Oceanology.* 59(3): 358–366. doi: 10.1134/S0001437019030020
2. Naydenova N.N. 1974. *Parazitofauna ryb semeystva Bychkovykh Chernogo i Azovskogo morey.* [*Parasite fauna of fish of the Gobidae family of the Black and Azov seas*]. Kiev, Naukova dumka: 185 p. (In Russian).
3. Terekhov P.A. 1977. [Parasites of some commercial fish of the Taganrog Bay and the Azov Sea]. *Trudy VNIRO*. 127A: 172–185. (In Russian).
4. Solonchenko A.I. 1982. *Gel'mintofauna ryb Azovskogo morya.* [*Helminth fauna of fish of the Azov Sea*]. Kiev, Naukova dumka: 153 p. (In Russian).
5. Shestakovskaya E.V., Strizhakova T.V., Nizova G.A., Kazarnikova A.V., Podzorova A.A., Akhmetova B.A. 1998. [Assessment of the epizootic state of the population of the main commercial fish of the Azov basin]. In: *Osnovnye problemy rybnogo khozyaystva i okhrany rybokhozyaystvennykh vodoemov Azovo-Chernomorskogo basseyna. Sbornik nauchnykh trudov AzNIIRKh.* [*The main problems of fisheries and the protection of fishery reservoirs of the Azov-Black Sea basin. Collection of scientific works of AzNIIRKh*]. Rostov-on-Don, Azov Research Institute for Fisheries: 454–461. (In Russian).
6. Syrovatka N.I., Nizova G.A. 2002. [Invasive fish diseases and the significance of the parasitic factor for fishing in the Sea of Azov]. *Voprosy rybolovstva.* 1(2–3): 132–133. (In Russian).
7. Kazarnikova A.V., Shestakovskaya E.V., Strizhakova T.V., Podzorova A.A. 2006. [Parasites and diseases of some species of commercial fish of the Azov basin in modern conditions]. In: *Ekosistemnye issledovaniya Azovskogo, Chernogo, Kaspiyskogo morey. T. 8.* [*Ecosystem studies of the Azov, Black, Caspian seas. Vol. 8*]. Apatity, Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 207–208. (In Russian).
8. Matishov G.G., Kazarnikova A.V., Kutsyn D.N. 2013. [The outbreak of plerocercoids *Digramma interrupta* in Azov roach (*Rutilus rutilus heckeli*)]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra.* 9(1): 53–60. (In Russian).
9. Strizhakova T.V., Mirzoyan A.V., Shevkoplyasova N.N., Bortnikov E.S. 2014. [Parasites of commercial fish in the Lower Don and the Azov Sea, potentially dangerous to humans]. In: *Osnovnye problemy rybnogo khozyaystva i okhrany rybokhozyaystvennykh vodoemov Azovo-Chernomorskogo basseyna. Sbornik nauchnykh trudov (2012–2013 gg.).* [*The main problems of fisheries and the protection of fishery reservoirs of the Azov-Black Sea basin. Collection of scientific papers (2012–2013)*]. Rostov-on-Don, Azov Research Institute for Fisheries: 236–254. (In Russian).
10. Bortnikov E.S., Strizhakova T.V., Shevkoplyasova N.N. 2017. [The status of parasite fauna of commercially important fish species of the Azov and Black seas in 2016]. In: *Prirodnye resursy, ikh sovremennoe sostoyanie, okhrana, promyslovoe i tekhnicheskoe ispol'zovanie: materialy VIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 75-letiyu rybokhozyaystvennogo obrazovaniya na Kamchatke (12–14 aprelya 2017 g.) Chast' I.* [*Natural resources, their current state, protection, commercial and technical use: materials of the VIII All-Russian scientific and practical conference, dedicated to the 75th anniversary of fisheries in Kamchatka. Part I (Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 12–14 April 2017)*]. Petropavlovsk-Kamchatsky, Kamchatka State Technical University: 46–49. (In Russian).
11. Bykhovskaya-Pavlovskaya I.E. 1985. *Parazitologicheskoe issledovanie ryb.* [*Parasitological research of fish*]. Leningrad, Nauka: 109 p. (In Russian).
12. *Opredelitel' parazitov presnovodnykh ryb fauny SSSR. T. 1. Paraziticheskie prosteyshie.* [*Keys to parasites of freshwater fish. Vol. 1. Parasitic protozoa*]. 1984. Leningrad, Nauka: 428 p. (In Russian).
13. *Opredelitel' parazitov presnovodnykh ryb fauny SSSR. T. 2. Paraziticheskie mnogokletochnye (pervaya chast').* [*Keys to parasites of freshwater fish. Vol. 2. Parasitic metazoan (part one)*]. 1985. Leningrad, Nauka: 425 p. (In Russian).
14. *Opredelitel' parazitov presnovodnykh ryb fauny SSSR. T. 3. Paraziticheskie mnogokletochnye (vtoraya chast').* [*Keys to parasites of freshwater fish. Vol. 3. Parasitic metazoan (part two)*]. 1987. Leningrad, Nauka: 583 p. (In Russian).
15. Nizova G.A., Lebedeva E.A. 2004. [The modern epizootic state of commercial fish in the Azov-Black Sea basin]. In: *Osnovnye problemy rybnogo khozyaystva i okhrany rybokhozyaystvennykh vodoemov Azovo-Chernomorskogo basseyna. Sbornik nauchnykh trudov AzNIIRKh.* [*The main problems of fisheries and the protection of fishery reservoirs of the Azov-Black Sea basin. Collection of scientific works of AzNIIRKh*]. Rostov-on-Don, Azov Research Institute for Fisheries: 309–314. (In Russian).
16. Zavyalov A.V. 2015. [Structural and functional organization of parastructure of parasitic system of nematode *Hysterothylacium aduncum* (nematoda: ascaridata) in the conditions of marine biocenosis of Krimean coastal waters]. *Ekosistemy.* 2(32): 8–14. (In Russian).

17. Gaevskaya A.V., Kornyichuk J.M., Machkevsky V.K., Pronkina N.V., Polyakova T.A., Mordvinova T.N., Popyuk M.P. 2010. [Characters of parasite system function of *Hysterothylacium aduncum* (Nematoda: anisakidae) in the Black Sea]. *Morskoy ekologicheskiy zhurnal.* 9(2): 37–50. (In Russian).

18. Gaevskaya A.V. 2005. *Anizakidnye nematody i zabolevaniya, vyzyvaemye imi u zhivotnykh i cheloveka.* [*Anisakid nematodes and diseases caused by them in animals and humans*]. Sevastopol, EKOSI-Gidrofizika: 223 p. (In Russian).

19. Matishov G.G., Ponomareva E.N., Luzhnyak V.A., Startsev A.V. 2014. *Rezul'taty ikhtiologicheskikh issledovaniy ust'evogo vzmor'ya Dona.* [*Results of ichthyological studies of the Don estuarine seashore*]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 160 p. (In Russian).

20. Bauer O.N., Musselius V.A., Strelkov Yu.A. 1981. *Bolezni prudovykh ryb.* [*Diseases of pond fish*]. Moscow, Legkaya i pishchevaya promyshlennost': 320 p. (In Russian).

21. Obukhova O.V., Larcsteva L.V. 2017. [Microbial separation of sudac with different degrees of its invasion *Achtheres percarum*]. In: *Vodnye bioresursy, akvakul'tura i ekologiya vodoemov. V Baltiyskiy morskoy forum. Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya. Trudy.* [*Aquatic biological resources, aquaculture and ecology of reservoirs. 5th Baltic Maritime Forum. All-Russian Scientific Conference. Proceedings (Kaliningrad, Russia, 23–24 May 2017)*]. Kaliningrad, Kaliningrad State Technical University: 291–294. (In Russian).

Поступила 29.12.2020

ОХРАНА ПРИРОДЫ

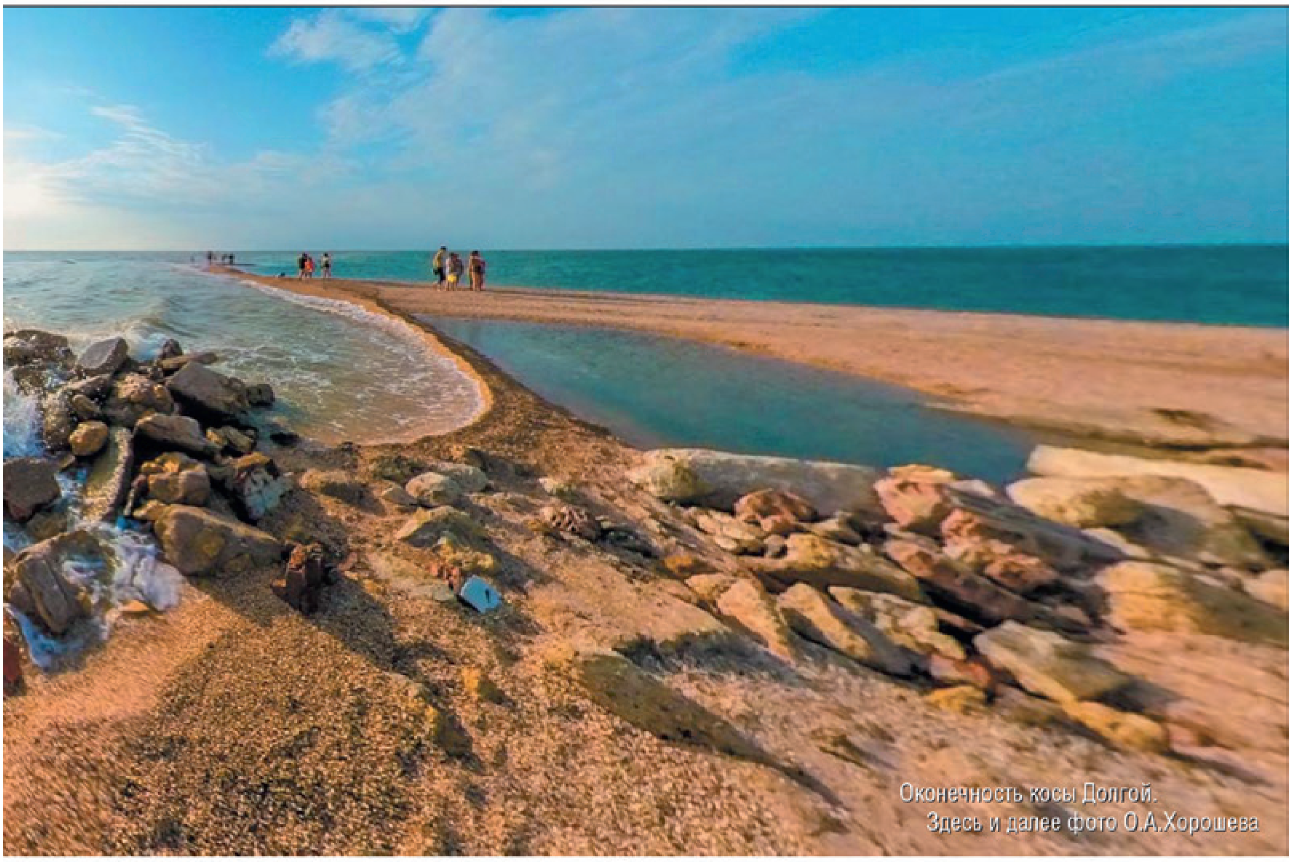
Коса Долгая — уникальный природный объект Азовского моря[1]

Г.Г.Матишов[1], О.В.Степаньян[1], О.А.Хорошев[1], К.С.Григоренко[1], Р.М.Савицкий[1]

[1]Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН (Ростов-на-Дону, Россия)

Рассказывается о природе и истории косы Долгой, а также о результатах экспедиции, организованной Русским географическим обществом в июне—июле 2021 г. Проведена аэрофотосъемка косы, измерены морфометрические параметры береговых валов, формирующих ее аккумулятивное тело. На морской акватории изучено поле течений и термохалинная структура вод. Исследовано строение различных участков косы и состав современных и ископаемых (из кернов и береговых отложений) моллюсков, проведен отбор раковинного материала для определения абсолютного возраста береговых валов. Проводились орнитологические наблюдения. Выявлено, что пластиковый мусор становится ведущим фактором, влияющим на состояние популяций птиц, в том числе редких видов. Археологические находки на островах косы Долгой показали возможность их переноса течениями из разрушаемых памятников коренного берега. Выявлены многочисленные свалки мусора в местах «дикого» отдыха туристов, отмечено размывание свалок 1950–1960-х годов.

Ключевые слова: коса Долгая, Азовское море, палеогеография, экосистема, Русское географическое общество.



Оконечность косы Долгой.
Здесь и далее фото О.А.Хорошева

[1] **Оригинальный текст:** *Матишов Г.Г., Степаньян О.В., Хорошев О.А., Григоренко К.С., Савицкий Р.М.* Коса Долгая – уникальный природный объект Азовского моря // Природа. 2021. № 10. С. 30–43.

На побережьях Азовского моря особое место занимают песчаные косы. Они есть повсюду — от керченско-таманских обрывов до Таганрогского залива. На северном берегу моря вытянулись косы Бирючья (Федотьева, Бирючий Остров), Обиточная, Бердянская, Белосарайская, Кривая и Беглицкая. Это так называемые косы азовского типа. Их длина составляет соответственно 40, 30, 18, 13, 6 и 4 км, она уменьшается по мере сокращения разгона волны восточных румбов. В Таганрогском заливе расположены косы Долгая, Камышеватская, Чумбурская и Очаковская (14, 7, 4 и 3 км соответственно). Все они состоят из береговых валов, которые последовательно причленяются к коренному берегу. Многие косы имеют подводные продолжения в виде петлевидных валов-отмелей длиной до 20 км. Очертания кос часто меняются, и, несмотря на неплохую изученность, особенности их строения и развития нередко остаются под вопросом.

Историческая местность и памятник природы

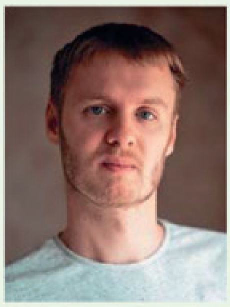
Один из самых крупных и интересных географических объектов Азовского моря — это коса Долгая. Она фактически отгораживает Таганрогский залив от основной части моря. Когда-то в этом месте находилась дельта Дона. Длина собственно косы более 10 км, ширина до 4 км, а общая протяженность системы коса — подводное поднятие цоколя составляет более 30 км. Современный облик косы сложился около 5 тыс. лет назад [1].

Во время стремительной греческой колонизации 2.5 тыс. лет назад коса служила одним из основных ориентиров для греков в плаваниях по древней Меоти-

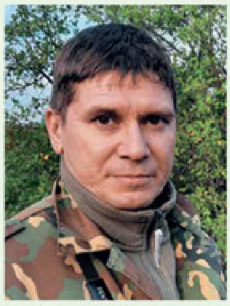
Геннадий Григорьевич Матишов, академик, научный руководитель Южного научного центра РАН (Ростов-на-Дону), член Президиума РАН, руководитель секции океанологии, физики атмосферы и географии Отделения наук о Земле РАН. Область научных интересов — полярная океанология, экология моря, геоморфология и палеогеография океана, радиоэкология Арктики и южных морей России.
e-mail: matishov_ssc-ras@ssc-ras.ru

Олег Владимирович Степаньян, кандидат биологических наук, океанолог, заведующий лабораторией прикладной океанографии того же научного центра. Занимается исследованием донной растительности южных морей России.
e-mail: step@ssc-ras.ru

Олег Анатольевич Хорошев, кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории прикладного научного приборостроения того же центра. Изучает проблемы природопользования в регионах юга России.
e-mail: ourregion@mail.ru



Клим Сергеевич Григоренко, кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории гидрологии и гидрохимии того же центра. Океанолог. Исследует проблемы маловодья и изменения водного баланса реки Дон, термохалинную структуру и течения Азовского моря.
e-mail: klim_grig@mail.ru



Рамиз Мамедович Савицкий, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории наземных экосистем того же центра. Орнитолог. Изучает орнитофауну юга России.
e-mail: ramiz_sav@mail.ru

Азовское море. Цифрами показаны крупнейшие косы: 1 — Долгая, 2 — Бирючий Остров, 3 — Обиточная, 4 — Бердянская, 5 — Белосарайская, 6 — Кривая, 7 — Беглицкая, 8 — Камышеватская, 9 — Чумбурская, 10 — Очаковская, 11 — Арабатская Стрелка, 12 — Чушка.

чезали подводные мели и отмели, возникали и пропадали смертельные водовороты и стремительные течения, именно в этом месте была своя, меотическая, «Сцилла и Харибда», где погибли десятки кораблей греков, генуэзцев, турок и русов. Что же влекло искателей приключений в столь опасные путешествия? Ответ прост: зерно и рыба, особенно осетровые, из которых добывали черную икру и делали балык. Еще одной статьей экспорта была азовская хамса, греки придумали изготавливать из нее питательный и терпкий соус, использовавшийся как приправа к блюдам средиземноморской кухни для всех слоев населения Древней Греции и Римской им-

де и при заходах в Большой Рамбит (р.Ея) и Малый Рамбит (р.Бейсуг). Здесь был коварный вход в крупнейший залив Меотийского болота (Азовского моря) на пути в богатый зерном и рыбой г.Танаис — самый северный и восточный форпост греков перед бескрайней степью. Во времена освоения греками побережья Азовского моря климат здесь был существенно влажней и теплей, чем сегодня [2]. Но как в настоящее время, так и тысячи лет назад в районе косы Долгой то появлялись, то ис-

перии (пряности Востока тогда еще не были столь известны и доступны). Танаис, а позднее и Азак (Азов) считались одними из ключевых пунктов Великого шелкового пути, мимо них шли бесчисленные караваны — как на Запад, так и на Восток. Экспорт зерна и рыбы, а также рабов продолжился и во времена Османской империи.

Позднее, уже для казаков, коса Долгая стала ключевым форпостом для контроля азовского побережья при набегах османов и татар и одновре-

Вид на косу Долгую с высоты 200 м.

менно основной факторией для рыболовства. Добывали здесь как «красную» рыбу, т.е. осетров, так и «белую» — чебака (леща), сазана, сулу (судака).

В наше время коса Долгая — это памятник природы. Здесь сохраняются уникальные формы рельефа и связанные с ними природные ландшафты, а также редкие виды растений. Коса относится к ключевым орнитологическим территориям для сохранения местообитаний разнообразных видов птиц в период гнездования, линьки, на зимовке или отдыхе во время миграций (в том числе малой крачки, кулика-сороки, морского зуйка, черноголового хохотуна, черноголовой чайки, шилоклювки).

Кроме всего прочего, коса Долгая — один из основных рекреационных ресурсов Краснодарского края, в частности Ейского р-на. В летний период в это замечательное место устремляются тысячи отдыхающих со всей страны и из ближнего зарубежья. Мелководное и хорошо прогреваемое море позволяет начинать купальный сезон раньше, чем на черноморском побережье, а сильные ветра и отличные волны сделали это место любимым для активного отдыха парапланеристов и серфингистов.

Важно отметить, что острова на продолжении косы Долгой располагаются вблизи государственной границы и судового хода. Они попадают в пограничную зону, и доступ к ним исследователей в настоящее время существенно ограничен. Это значит, что научные данные, полученные из этого уникального места, всегда ценятся особенно.

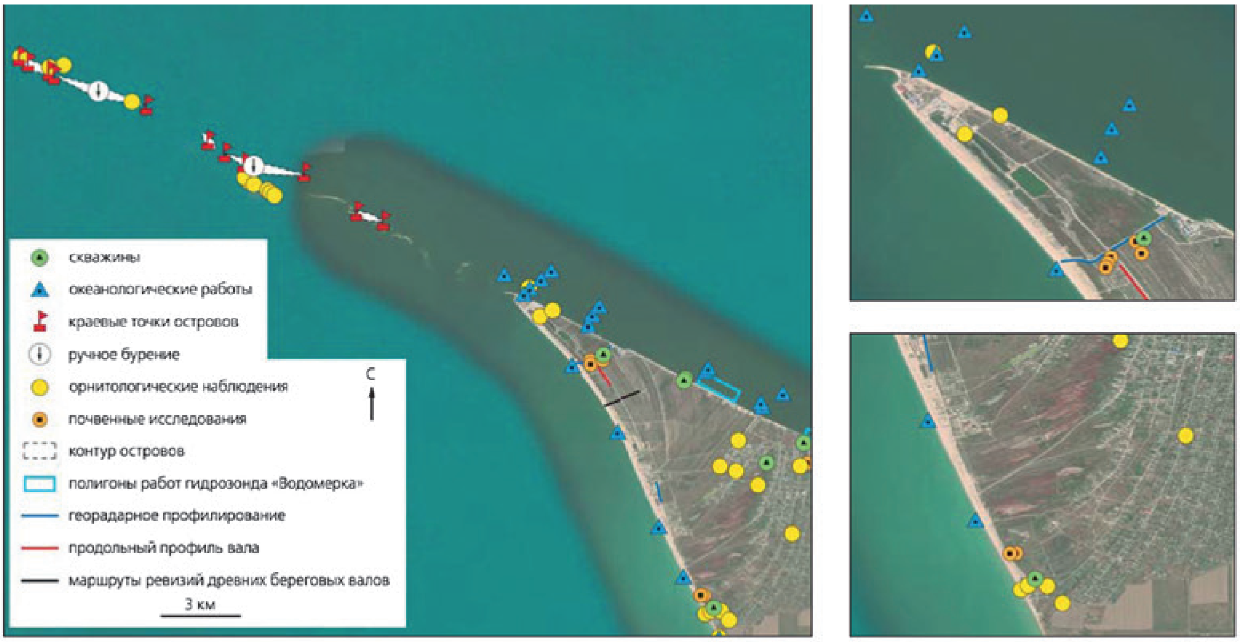
Экспедиция РГО

В июне—июле 2021 г. косу Долгую посетила комплексная экспедиция Южного научного центра РАН, организованная при поддержке Русского географического общества*. Среди ученых были географы, литологи, гидрологи, палеонтологи, почвоведы и ГИС-специалисты. Целью полевых исследований стало изучение механизмов и факторов образования и трансформации кос Азовского моря. Необходимо было знать, как поведут себя берега при изменениях климата и уровня моря, и разработать средства и подходы для создания таких прогнозов. Работы проводились на всей площади косы Долгой (от коренного уступа в районе оз.Лебединого до ее дистального окончания), а также на прилегающей морской акватории — на участках, граничащих с западным и восточным берегами косы, а также вокруг ее островной части.

Участникам экспедиции удалось выполнить колоссальный объем научных работ. С помощью беспилотных летательных аппаратов проводилась аэрофотосъемка для составления ортофотопланов

* Участники экспедиции выражают благодарность Пограничному управлению ФСБ России по Краснодарскому краю, МЧС России по Краснодарскому краю и руководству станицы Должанской (Ейский р-н Краснодарского края) за поддержку и содействие при проведении работ. Мы признательны также участникам экспедиции В.В.Титову, И.В.Толочко, Ю.И.Юрасову, Е.П.Коваленко, С.А.Мисирову, К.С.Сушко и В.В.Польшину за помощь в полевых работах и подготовке публикации.

Работы у оконечности косы.



Карта-схема районов экспедиционных исследований на косе Долгой в июне-июле 2021 г.

и цифровых моделей рельефа косы. Заложены контрольные геодезические точки для фиксации мест бурения скважин, привязки ортофотопланов и измерения морфометрических параметров береговых валов, формирующих аккумулятивное тело косы. Для изучения геологического строения косы на различных участках выполнены буровые работы с отбором керна. Из вскрытых геологических разрезов отобран раковинный материал для определения абсолютного возраста береговых валов радиоуглеродным методом. Выполнено биостратиграфическое (малакологическое) изучение песчано-ракушечных обнажений на самой косе и в ее островной части. Измерены поля течений, а на мелководных участках акватории Азовского моря отобраны пробы поверхностных осадков и донных организмов.

Получены самые новые и современные данные о состоянии природной системы косы Долгой. С результатами этих экспедиционных работ мы и хотим познакомить читателя.

Строение косы и анализ ее отложений

Для исследования микрорельефа прибрежной зоны и древних береговых валов мы выбрали участок на юго-западном берегу косы. Именно здесь береговые валы особенно хорошо различимы. Отметки высот получили с помощью высокоточного геодезического приемника «EFT M4 GNSS» вдоль пеших маршрутов, проложенных по гребню одного из валов, и перпендикулярно им. Для анализа состояния ландшафтно-морфологической структуры косы мы выполнили также аэрофотосъемку участка пеших маршрутов. Для этого использовался беспилотный летательный аппарат «Phantom 4». По результатам всех промеров построены профили рельефа, которые позволили уточнить расположение известных ранее береговых валов и обнаружить новые, не выявленные в ходе визуального осмотра.

Также мы изучили строение аккумулятивных островов у оконечности косы. Интересно, что их количество, размеры и форма меняются ежегодно. В прошлом году были зафиксированы GPS-координаты оконечностей двух крупных островов, ближайший к косе имел длину 3.6 км, второй — 1.7 км. В 2021 г. на этом месте мы обнаружили цепь из мелких островков длиной около 0.5 км (первый) и 1.5 км (второй и третий). В поперечном сечении первого острова выделяется до пяти береговых валов, а на его южной оконечности — около 10 боковых валов. Второй длинный остров отличается твердой поверхностью, которая представляет собой ракушу, сцементированную птичьим гуано. Твердое покрытие и обилие птичьих гнезд позволяют предположить, что остров меньше размывается и меняет форму в период сильных штормов. Микрорельеф острова отличается значительной динамикой, здесь параллельно береговой линии образовалось множество грядовых цепочек и валов. Предположительно, важнейшую роль в пере-

Работа с георадаром при изучении рельефа косы Долгой.
Здесь и далее фото Г.Г.Матишова

мещении наносов играет волновое воздействие, а также отчасти эоловый перенос.

Вдоль западного побережья Ейского п-ова, южнее станицы Должанской (со стороны Азовского моря), на многие километры протягивается непрерывная полоса береговых обрывов, а это не что иное, как естественные, готовые геологические разрезы. Мы исследовали их на протяжении около 5 км. Обнаженность разрезов полная, что говорит о постоянной и достаточно равномерной береговой абразии. Мощность отложений мало изменяется по простиранию и составляет 7–8 м. В обнажениях вскрываются субаэральные отложения лессово-почвенной серии, включающие несколько погребенных почв, которые предварительно можно интерпретировать как мезинский (начало позднего неоплейстоцена) и каменский (конец среднего неоплейстоцена) педокомплексы. Таким образом, низы террасы, к которой примыкает коса Долгая, предположительно датируются второй половиной неоплейстоцена (около 240–200 тыс. лет назад). В ходе предварительного осмотра слоев мы не обнаружили остатков ископаемых организмов (*in situ*). На осыпи была найдена нижняя челюсть суслика *Spermophilus* sp., который в настоящее время в районе Ейского п-ова не обитает. Можно предположить, что остатки грызуна происходят из кротовин в слое валдайского лесса (ниже современной почвы).

Первый («Длинный»; вверху) и второй («Птичий») острова косы Долгой.

Двадцатиметровый керн из скважины, пробуренной на косе Долгой.

На разных участках косы нам удалось пробурить шесть скважин и отобрать керны. Всего в ходе буровых работ пройдено почти 120 погонных метров. Максимальная глубина скважины составила 23 м, а минимальная — 15.5 м.

В кернах скважин была изучена малакофауна (раковины моллюсков) — важный показатель условий и времени формирования отложений. При первичном анализе отмечены наиболее часто встречающиеся виды. Практически во всех колонках максимальное количество раковин присутствовало на глубине до 2.5–3 м в песчано-ракушечных отложениях. Малакофауна в этом интервале преимущественно представлена створками *Cerastoderma* разного размера и разной степени сохранности. Обычными были крупные обломки *Mytilus galloprovincialis*, створки *Chamelea gallina*, раковины *Tritia*, реже в пробах присутствовали раковины *Bittium*, единично встречались *Hydrobia* и *Theodoxus*, а также обломки створок Pholadidae. В более глубоких горизонтах моллюски были приурочены к серым илам, а на глубине 20 м и более — к пескам.

Слоистое строение отложений в шурфе на острове.

Малакологическое исследование островов косы позволило выявить различия в их строении и структуре. Надводная часть первого от косы острова сложена в основном целыми створками раковин, имеет рыхлую сыпучую структуру, легко деформируется в результате волновой активности. Фоновый вид моллюска здесь — *Cerastoderma*, его створки покрывают всю поверхность острова. Кроме него, часто встречается *Mya arenaria* и крупные обломки *Mytilus galloprovincialis*, в зоне прибоя на берегу мы нашли целые раковины этих моллюсков со скрепленными лигаментом створками. Равномерно по всей площади острова (хотя и в небольшом количестве) распределены створки *Chamelea gallina* и *Gastrana fragilis*. Найдено множество *Tritia reticulata* разной степени сохранности. Со стороны Азовского моря часто встречается *Solen vagina*. В выбросах была обнаружена раковина пресноводного моллюска *Viviparus viviparus*. Второй от косы остров сложен мелким раковинным детритом с песком. Его поверхность довольно плотная и мало подвержена деформации. Здесь мы заложили шурф, чтобы оценить морфологическое строение острова. Оказалось, что островные отложения сформированы из створок раковин моллюсков, ракушечного детрита и ракушечного песка при небольшом количестве аллювиальных песков в нижней части профиля. В строении разреза хорошо различимы отдельные слои. На глубине 13 см начинается слой крупных обломков раковин, преимущественно *Cerastoderma*, мощностью 8 см. Ниже он сменяется мощным слоем перетертой ракуши, а на глубине 40 см переходит в слой (мощностью 7 см), состоящий в основном из целых створок. Наличие здесь створок вселенца *Mya arenaria* говорит о его формировании не ранее середины прошлого века. Третий остров со стороны Азовского

Обрывы, сложенные ракушей, на островах косы Долгой.

моря пологий, похож на второй, состоит из спрессованного раковинного детрита, со стороны Таганрогского залива берег высокий, обрывистый (до 1.5 м). Отсутствие некоторых видов в горизонтах может быть связано с их небольшими размерами, и при более детальном изучении материала возможна корректировка видовых списков.

Морские исследования

Коса Долгая и ее подводное продолжение играют важную роль в водообмене между Таганрогским заливом и собственно Азовским морем. Особенно это важно сейчас, в условиях прогрессирующего осолонения моря и затянувшегося маловодья на Дону и Кубани [3, 4].

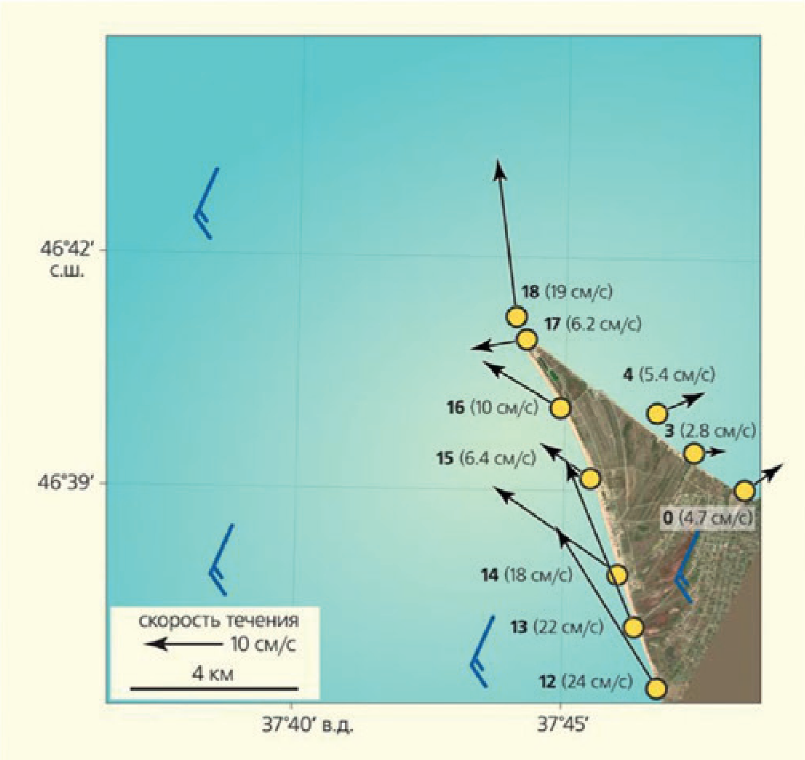
Работы на акватории косы Долгой.

Фото О.А.Хорошева

Мы провели гидрологическую съемку прибрежной части косы. С помощью буйковой станции «Aanderaa RCM 9LW» измерили скорость, направление течений, температуру и соленость Азовского моря. Выполнено 10 океанографических станций со стороны Таганрогского залива и Азовского моря. Дискретность измерений варьировала от 30 с до 10 мин. Постановка и снятие станций во время всей экспедиции проводились в условиях юго-юго-западного ветра со скоростью 6–9 м/с. Максимальные скорости течений, в соответствии с полем ветра, наблюдались с западной стороны косы и достигали 22–24 см/с. В центральной и северной частях западного берега косы они понижались до 6–10 см/с. Станция 12 расположена у коренного берега, течение здесь было направлено вдоль берега в сторону оконечности косы, его максимальная скорость составила 24 см/с. Коренной берег активно размывается волнами, и при таком направлении ветра и течения материал переносится вдоль берега на север. На станции 14 течения ослабевают до 18 см/с и поворачивают вместе с направлением береговой линии. На станции 15 зафиксирована наименьшая скорость течения на западном берегу (6.4 см/с). Ближе к оконечности косы, на станции 16, скорость снова возрастает до 10 см/с. На станции 17 измерено обратное течение, образованное в результате завихрений в дистальной части. При западном ветре восточный берег косы находится в ветровой тени, поэтому течения с этой стороны были слабее, их максимальная скорость составила 5.4 см/с. На станции 3 получена наименьшая для всего периода измерений скорость — 2.8 см/с. Все течения у восточного берега косы были направлены на северо-восток. В дистальной части скорость течения достигла 19 см/с.

Соленость морской воды, также измеренная аппаратом «Aanderaa RCM 9LW», достигла минимума (13.2 епс) на станции 0 у коренной части восточного берега. Для средней части восточного берега характерны значения 13.5–13.6 епс. У оконечности с восточной стороны соленость оказалась максимальной и превысила 14 епс. С западной стороны и в проливе между островами воды Азовского моря были сильно перемешаны ветром, поэтому значения солености изменялись в узких пределах: 13.7–13.8 епс.

Температура воды была понижена у коренной части обоих берегов. У восточного (25.9°C) это, возможно, связано с притоком подземных вод, а у западного (25.7°C) — с перемешиванием всей азовоморской водной толщи. У оконечности косы заметен прогрев воды. На станции 16 температура поднялась до 27.01°C.



Течения у берегов косы. Желтыми значками показаны океанографические станции (скорости течения указаны в скобках), синими — направление ветра (6–9 м/с).

Съемки полей течений в течение двух лет при разном направлении ветра позволяют сделать вывод о существовании у западного (азовоморского) берега косы постоянного вдольберегового переноса как при западном, так и при восточном ветре. Если в первом случае это течение дрейфовое, то во втором — компенсационное. Оно способствует переносу донных осадков с Еленинской и Железинской банок, а также продуктов абразии западного коренного берега. В условиях слабого (4–6 м/с) восточного ветра скорости течений у западного берега в 2–3 раза выше, чем у восточного. Острова косы ежегодно сильно меняются, при этом дальние, расположенные на расстоянии около 10 км от дистали косы, имеют более стабильные размеры, расположение и форму.

В ходе экспедиции мы отобрали пробы макрозообентоса и изучили выбросы живых организмов на берегах косы. У коренного берега на пляже были обнаружены живые макрозообентосные организмы: *Mya arenaria*, *Mytilus galloprovincialis* с кладками *Rapana venosa* и колониями *Balanus improvisus*, *Rhithropanopeus harrisi*. Кроме того, отмечен массовый выброс на берег двустворчатого моллюска *Barnea candida*, обитающего на выходах известняков и мергелей и на других плотных грунтах, где он строит норы (поэтому его редко удается встретить в живом виде). Были найдены раки *Upogebia pusilla*, также обитающие в норах в прибрежной части моря, и кишечнополостное *Actinia equine*.

Современные представители зообентоса на мелководье косы Долгой: *Mytilus galloprovincialis* в колониях *Balanus improvisus* с прикрепленной кладкой *Rapana venosa*.

Фото Г.Г.Матишова

Находясь на косе, мы провели испытания нового прибора, разработанного в Южном научном центре РАН. Это беспилотный роботизированный гидрозонд «Водомерка», способный в условиях мелководной акватории собирать данные об электропроводности и температуре воды, а также о глубине моря. «Водомерка» показала хорошую устойчивость с подветренной стороны косы при удалении от берега до 300 м при постоянной связи пульта управления с контроллером хода. Для контроля за работой прибора мы использовали очки виртуальной реальности с системой телеметрии. Результаты измерений в целом устойчиво передавались на сайт научного центра. Работа «Водомерки» на трех отдельных участках вдоль береговой линии косы со стороны Таганрогского залива в условиях слабого волнения показала, что источники поступления более пресной воды в этих местах отсутствуют.

Роботизированный беспилотный гидрозонд «Водомерка» в прибрежной акватории Азовского моря.

Наблюдения за птицами

Наши орнитологические наблюдения заключались в изучении видового разнообразия птиц и в определении наличия или отсутствия редких и охраняемых видов. Все места обнаружения птиц и их гнезд мы нанесли на карту. Было выявлено 60 видов птиц из 13 отрядов: аистообразные (Ciconiiformes) — 2 вида, гусеобразные (Anseriformes) — 2, соколообразные (Falconiformes) — 3, курообразные (Galliformes) — 1, ржанкообразные (Charadriiformes) — 6, голубеобразные (Columbiformes) — 4, кукушкообразные (Cuculiformes) — 1, совообразные (Strigiformes) — 3, стрижеобразные (Apodiformes) — 1, ракшеобразные (Coraciiformes) — 2, удодообразные (Upupiformes) — 1, дятлообразные (Piciformes) — 1 и воробьинообразные (Passeriformes) — 33. Орнитокомплекс в летний период представлен в основном гнездящимися птицами. При этом доминирующие виды наземных биотопов (кольчатая горлица, домовый воробей, грач и обыкновенный скворец) предпочитают антропогенные ландшафты, поэтому встречались в населенных пунктах. Массовые лимнофильные виды (большой баклан, пестроносая крачка и хохотунья) приурочены к островам и морскому побережью.

Хохотунья с птенцами (вверху) и колония большого баклана на островах косы Долгой.

Фото Р.М.Савицкого

Археологические находки

На островной части косы в песчано-ракушечных отложениях были обнаружены артефакты, относящиеся к различным археологическим эпохам (II в. до н.э. и XIII–XIV вв.). Находка, датируемая II в. до н.э., представляет собой верхнюю профильную часть греческой родосской амфоры с клеймом. Она, вероятно, происходит из разрушенного береговой абразией раннесарматского кургана (курганная группа Должанская I). К XIII–XIV вв. относятся фрагменты гончарных сосудов и амфор, предположительно из разрушенных слоев поселений Должанское I или Должанское II.

Курганные группы Должанская I–III датируются II–I вв. до н.э. и были оставлены носителями раннесарматской археологической культуры — кочевниками, жившими зимой поблизости от морского побережья. Сохранившиеся остатки поселений, датируемые средневековым временем (XIII–XIV вв.), могут быть соотнесены с венецианскими портоланами — морскими картами с указаниями портов и поселений.

Археологические находки различных эпох, обнаруженные на островной части косы Долгой в июне 2021 г.: *а*, *б* — верхняя профильная часть греческой родосской амфоры с клеймом (II в. до н.э.), *в* — фрагменты сосудов (XIII–XIV вв.).

Фото Г.Г.Матишова

Геоморфологическая характеристика береговой зоны Ейского п-ова в эпоху нимфейской трансгрессии свидетельствует об активных эрозионных процессах в рыхлых береговых толщах, сопровождавшихся расширением речных долин. Частые шторма приводили к размыву суглинисто-глинистых берегов. Темпы волнового разрушения могли достигать 15–20 м/год, а возможно, и более. Согласно предварительным расчетам, за последние 2 тыс. лет могло разрушиться около 2 км прибрежной зоны Ейского лимана. Исходя из сформированной базы данных археологических памятников и впервые произведенного комплексного анализа размещения памятников раннего железного века в северо-восточном Приазовье и Нижнем Подонье, можно предложить следующую модель расселения. Наиболее вероятно, что по долине р.Ея проходили маршруты перекочевок прикубанских номадов. Причиной сравнительно слабого освоения территории оседлым населением, предположительно, может быть дефицит качественной питьевой воды, так как в р.Ея повышена ее минерализация (увеличивается от истока реки к устью). Такая же ситуация с качеством воды у рек Челбас и Бейсуг, в отличие, например, от малых степных рек Кирпили и Понура, общая минерализация которых не превышает допустимого уровня.

Антропогенное воздействие на косу

За весь период работы экспедиции мы наблюдали значительные скопления отдыхающих и их машин на косе. На погонный километр приходилось до 50 автомобилей и до 300 человек. Люди приезжают сюда «дикарем», как правило, на один день. Конечно, отсутствие организованного отдыха приводит к образованию мусорных очагов в прибрежной зо-

Мусорные кучи (преобладает пластик) после «диких» отдыхающих на косе Долгой в июле 2021 г.

Фото О.А.Хорошева

Кладка хохотуньи. Птицы используют пластиковый мусор для строительства своих гнезд.

Фото Р.М.Савицкого

не. Значительная часть мусора (до 80%) представлена пластиковыми отходами (пакетами, одноразовой посудой, бутылками, флаконами и т.п.). Замечено, что некоторые птицы (например, большой баклан и хохотунья) активно используют пластиковый мусор при строительстве гнезд. Это опасно для кладок, так как ведет к перегреву яиц, а также для птенцов, ведь они могут проглатывать пластиковые частицы вместе с едой. Наряду с фактором беспокойства от отдыхающих все это негативно сказывается на состоянии популяций многих видов птиц, в том числе занесенных в Красную книгу РФ

Абразионные берега и старая (1950–1960-е годы) свалка мусора, сползающая в море.

Фото О.А.Хорошева

и региональные красные книги. Мы обнаружили и старые свалки мусора, сохранившиеся здесь с 1950–1960-х годов. В настоящее время они интенсивно разрушаются береговой абразией, и их содержимое попадает на пляж и в воду.

* * *

Исследование кос Азовского моря — интересный и увлекательный научный процесс, продолжающийся уже несколько лет. Мы проделали большую работу, но не собираемся на этом останавливаться. Отметим, что в 2021 г. к нашим исследованиям проявили самый живой интерес местные жители, особенно узнав, что работы организованы в рамках проекта Русского географического общества. Участники экспедиции провели несколько увлекательных образовательных лекций для местных жителей и гостей станицы Должанской, рассказали о задачах экспедиции и о предварительных результатах полевых работ.■

Работа выполнена при поддержке Русского географического общества (проект 07/2020-И «Берега и косы Азовского моря: прошлое, настоящее и будущее»).

Литература / References

1. *Матишов Г.Г., Польшин В.В.* Новые результаты по истории Азовского моря в голоцене. Доклады академии наук. 2019; 489(2): 190–194. DOI:10.31857/S0869-56524892190-194. [*Matishov G.G., Polshin V.V.* New results on the history of the Sea Of Azov in the Holocene. Doklady Earth Sciences. 2019; 489(1): 1339–1344.]
2. *Матишов Г.Г., Дашкевич Л.В., Кириллова Е.Э.* Цикличность климата в Приазовье: голоцен и современный период (XIX–XXI вв.). Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021; 498(1): 96–100. DOI:10.31857/S2686739721050091. [*Matishov G.G., Dashkevich L.V., Kirillova E.E.* Cyclicity of climate in the Sea of Azov Region: the Holocene and the current period (19–21 Centuries). Doklady Earth Sciences. 2021; 498(1): 96–100. (In Russ.).]
3. *Матишов Г.Г., Дашкевич Л.В., Титов В.В., Кириллова Е.Э.* Анализ внутривековой природной изменчивости в Приазовье и на Нижнем Дону: причина маловодья. Наука Юга России. 2021; 17(1): 13–23. DOI:10.7868/S25000640210102. [*Matishov G.G., Dashkevich L.V., Titov V.V., Kirillova E.E.* Analysis of intracentury environmental variability in the Sea of Azov and Lower Don Regions: the cause of low water period. Science of the South of Russia. 2021; 17(1): 13–23. (In Russ.).]
4. *Матишов Г.Г., Григоренко К.С., Московец А.Ю.* Механизмы осолонения Таганрогского залива в условиях экстремально низкого стока Дона. Наука Юга России. 2017; 13(1): 35–43. DOI:10.23885/2500-0640-2017-13-1-35-43. [*Matishov G.G., Grigorenko K.S., Moskovets A.Yu.* The salinization mechanisms in the Taganrog Bay under the conditions of the Don River extremely low runoff. Science of the South of Russia. 2017; 13(1): 35–43. (In Russ).]

Dolgaya Spit — a Unique Natural Object of the Sea of Azov

G.G.Matishov[1], O.V.Stepanyan[1], O.A.Khoroshev[1], K.S.Grigorenko[1], R.M.Savitsky[1]
[1]Southern Scientific Center, RAS (Rostov-on-Don, Russia)

The article describes the nature and history of the Dolgaya Spit, as well as the results of the expedition organized by the Russian Geographical Society in June—July 2021. Aerial photography of the Dolgaya Spit has been carried out; morphometric parameters of the coastal shafts that form the accumulative body of the spit have been measured. The field of currents and the thermohaline structure of waters have been studied in the marine water area of the Dolgaya Spit. The structure of various parts of the Dolgaya Spit, as well as the composition of modern and fossil (from cores and coastal sediments) mollusks have been studied; shell material for the radiocarbon-determination of the absolute age of coastal shafts has been sampled. Bird observations revealed that plastic garbage is the leading factor affecting the state of bird populations, including rare species. Archaeological finds on the islands of the Dolgaya Spit have shown the possibility of their transfer by currents from the destroyed monuments of the indigenous coast. Numerous landfills in wild camping areas have been identified; the erosion and scouring of the landfills of the 1950s and 1960s has been recorded.

Keywords: Dolgaya Spit, Sea of Azov, paleogeography, ecosystem, Russian Geographical Society.

УДК 504.4 : 332.144
DOI: 10.7868/S25000640210208

ОЦЕНКА МАТЕРИАЛЬНОГО УЩЕРБА ОТ ПРОЯВЛЕНИЯ АБРАЗИОННЫХ И ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ В МУНИЦИПАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЯХ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ АЗОВСКОГО МОРЯ[1]

© 2021 г. А.Д. Хаванский[1], О.А. Хорошев[2], Ю.Ю. Меринова[1]

Аннотация. Произведена оценка материального ущерба от проявления абразионных и оползневых процессов в муниципальных образованиях береговой зоны Азовского моря на примере Ростовской области. По среднемноголетним скоростям абразии в перспективе на 20-летний период выявлена зона воздействия абразионных процессов, в пределах которой установлено 73 объекта капитального строительства и сооружения различного назначения, подверженных риску полного или частичного разрушения. В среднем потеря земель от абразии в береговой зоне Ростовской области, включающей прибрежные Неклиновский и Азовский сельские административные районы, составляет 23 м² на 1 погонный км за 20 лет. Величина прогнозируемого суммарного ущерба социально-экономическим объектам оценивается в 150 млн рублей. В Неклиновском районе основной ущерб от абразии связан с возможным разрушением объектов строительства и инфраструктуры, а в Азовском районе – земельных участков различного хозяйственного назначения. Наибольший суммарный ущерб может быть причинен Поляковскому и Новобессергеневскому сельским поселениям Неклиновского района Ростовской области с большим количеством объектов капитального строительства, инфраструктуры и высокой кадастровой стоимостью земель, а также Семибалковскому сельскому поселению Азовского района, в пределах которого основной ущерб может принести абразионное разрушение земель населенных пунктов. По удельной величине потери земель населенных пунктов лидируют Семибалковское, Новобессергеневское и Натальевское сельские поселения. Результаты работы могут быть использованы для принятия управленческих решений по борьбе с опасными береговыми процессами на региональном уровне и местными администрациями.

Ключевые слова: опасные береговые процессы, береговая абразия, береговая зона Азовского моря, ущерб социально-экономическим объектам, Ростовская область.

ASSESSMENT OF MATERIAL DAMAGE OF ABRASIVE AND LANDSLIDE PROCESSES EFFECT IN MUNICIPALITIES IN THE COASTAL ZONE OF THE SEA OF AZOV

A.D. Khavanskiy[1], O.A. Khoroshev[2], Yu.Yu. Merinova[1]

Abstract. The paper deals with assessing of the material damage caused by the occurrence of abrasion and landslide processes in the municipalities of the Sea of Azov coastal zone on the example of the Rostov Region. The authors identified a zone of impact of abrasive processes according to the average long-term abrasion rates in the future for a 20-year period, within which 73 capital construction objects and structures for various purposes are subject to the risk of complete or partial destruction. The loss of land from abrasion in the coastal zone of the Rostov Region, including the coastal Neklinovskiy and Azov rural administrative districts, averages 23 m² per 1 running km over 20 years. The value of the projected total damage to socio-economic

[1] Южный федеральный университет (Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 40
[2] Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: ourregion@mail.ru

[1] **Оригинальный текст:** *Хаванский А.Д., Хорошев О.А., Меринова Ю.Ю.* Оценка материального ущерба от проявления абразионных и оползневых процессов в муниципальных образованиях береговой зоны Азовского моря // Наука Юга России. 2021. Т. 17. № 2. С. 74–82.

objects is 150 million rubles. The main damage from abrasion in the Neklinovskiy district is associated with the possible destruction of construction facilities and infrastructure, while in the Azov district – with the land plots for various economic purposes. Polyakovskoe and Novobessergenevskoe rural settlements in the Neklinovskiy district of the Rostov Region with a large number of capital construction objects, infrastructure, and high cadastral value of land can be endamaged to the maximum extent. The main damage of Semibalkovskoe rural settlement in the Azov district can be caused by the abrasive destruction of the land of settlements. Semibalkovskoe, Novobessergenevskoe and Natalyevskoe rural settlements are the leaders in terms of the specific value of land loss. Administrations can use the results of the work for making management decisions to prevent dangerous coastal processes at the regional and local levels.

Keywords: hazardous coastal processes, coastal abrasion, coastal zone of the Sea of Azov, damage to socio-economic objects, Rostov Region.

ВВЕДЕНИЕ

Многолетними исследованиями [1–5] установлено, что берега Азовского моря подвержены опасным абразионным и оползневым процессам. Последствия проявления опасных береговых процессов выражаются в причиняемом материальном ущербе социально-экономическим (СЭ) объектам, к которым относятся как жилые постройки, так и объекты социально-хозяйственного назначения, культурного наследия, участки земель различных категорий использования.

В предыдущих работах [6; 7] авторами разработана методика и выполнена оценка материального ущерба для всей береговой зоны Азовского моря по функциональным участкам, не совпадающим с административными границами районов. Однако управленческие решения по защите береговой зоны принимаются в рамках административных границ на региональном уровне и местными администрациями. В связи с этим при принятии последними управленческих решений по борьбе с опасными береговыми процессами и их последствиями актуальной является оценка прогнозируемого ущерба СЭ-объектам в масштабе приморских сельских районов и отдельных поселений. Полученную информацию можно использовать для корректировки схем территориального планирования и генеральных планов развития приазовских муниципалитетов.

Цель работы – оценка прогнозируемого на 20-летний период ущерба СЭ-объектам приморских муниципальных образований Ростовской области от последствий воздействия опасных абразионных и оползневых процессов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Идентификацию и анализ СЭ-объектов, подверженных влиянию абразионных процессов, авторы исследования производили по разработанной ранее методике [6] в пределах административных границ приморских сельских поселений, входящих в состав Неклиновского и Азовского районов Ростовской области.

Используя данные по среднемноголетней скорости абразии [5], полученные на мониторинговых участках реперной сети Южного федерального университета (ЮФУ) (точках многолетнего наблюдения за абразией №№ 1–20), в пределах каждого сельского поселения определяли контуры расчетных участков, соответствующих зонам воздействия абразионных процессов в перспективе на два ближайших десятилетия.

Для идентификации СЭ-объектов в зонах прогнозируемого абразионного воздействия использовали материалы полевых экспедиционных работ 2018–2020 гг. (фото- и видеоизображения объектов, в том числе в панорамном (VR 360°) формате, данные аэровизуальных наблюдений), спутниковые снимки, схемы территориального планирования Неклиновского и Азовского районов Ростовской области [8; 9], а также генеральные планы составляющих их сельских поселений. В разрезе расчетных участков, выделенных в пределах каждого приморского сельского поселения с использованием инструментария интерактивной публичной кадастровой карты Росреестра [10], выявлены и проанализированы все отмеченные на ней СЭ-объекты, в частности, определены их площади, кадастровая стоимость, произведен укрупненный расчет возможного ущерба для земельных участков различного назначения, а также объектов капитального строительства, инфраструктуры и пр. Все расчеты возможного материального ущерба СЭ-объектам приморских сельских поселений выполнены по кадастровым ценам на начало 2020 г.

В данном исследовании не производился расчет прогнозируемого ущерба СЭ-объектам, расположенным на прибрежных участках, где отсутствовали действующие станции многолетнего наблюдения за абразией (реперные точки ЮФУ), а также объектам капитального строительства и сооружениям различного назначения, не отмеченным на публичных кадастровых картах Росреестра.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В приазовских административных районах Ростовской области подвержены абразии более 38 км берегов Неклиновского и более 48 км Азовского района. При этом в первом из них в перспективе на два ближайших десятилетия абразионному разрушению могут подвергнуться преимущественно площади земель населенных пунктов, а во втором – земли сельскохозяйственного назначения. В целом же по региону разрушению от абразии в несколько большей степени могут быть подвержены земли населенных пунктов, нежели земли сельскохозяйственного назначения.

По результатам расчетов, в перспективе на 20-летний период море может разрушить почти 200 га земель. Так, Неклиновский район может лишиться 111 га земель различного хозяйственного использования, Азовский – более 88 га. В среднем потеря земель от абразии в регионе может составить 23 м² на 1 погонный км морского берега за 20 лет.

Величина прогнозируемого суммарного ущерба СЭ-объектам береговой зоны Азовского моря в пределах региона от последствий воздействия абразионных процессов может достигнуть 148,7 млн рублей, из которых более 95 % составит ущерб землям населенных пунктов с расположенными на них объектами строительства и инфраструктуры. Всего на участках прогнозируемого абразионного разрушения было выявлено 73 объекта капитального строительства и сооружения различного назначения, отмеченных на картах Росреестра. Из них подавляющее большинство (94,5 %) расположено на землях наиболее плотно заселенного в береговой зоне Неклиновского района.

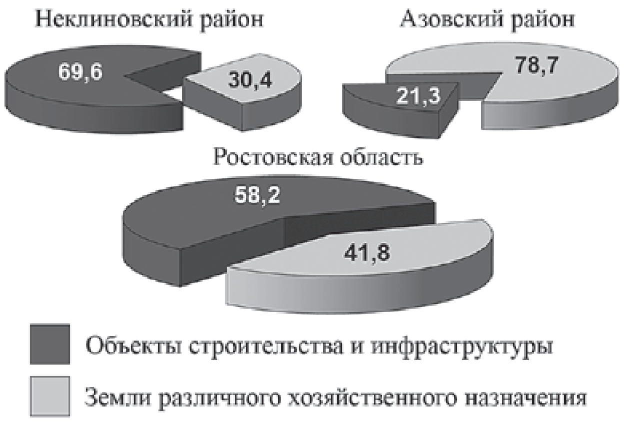


Рис. 1. Структура прогнозируемого суммарного ущерба социально-экономическим объектам от последствий проявления абразионных процессов в приморских административных районах и по региону в целом, %.

Fig. 1. The structure of the predicted total damage to socio-economic objects from the consequences of abrasion processes, in the context of coastal administrative districts and in the region as a whole, %.

В структуре объектов, для которых прогнозируется ущерб, на объекты строительства и инфраструктуры в целом по региону приходится 58,2 %, по Неклиновскому району – почти 70 %, по Азовскому – 21,3 % (рис. 1). Основной ущерб от абразии в Неклиновском районе может быть связан с возможным разрушением объектов строительства и инфраструктуры, а в Азовском – земельных участков различного хозяйственного назначения.

Прогнозируемый ущерб только земельным участкам (без учета строений и инфраструктуры) от последствий абразии в пределах азовского побережья Ростовской области может превысить 62 млн рублей в абсолютном выражении, или 41,8 %. При этом основной ущерб (почти 90 %) придется на земли населенных пунктов. Для исследуемых районов можно отметить практически аналогичное соотношение подверженных угрозе земель, при этом прогнозируемый ущерб землям сельскохозяйственного назначения в Азовском районе немного больше.

Показатели прогнозируемого суммарного ущерба от проявления абразионных процессов в сельских поселениях приморских районов представлены в таблице 1 и на рисунке 2.

В пределах Неклиновского района наибольший суммарный ущерб (68,1 млн рублей) от последствий абразии может быть причинен Поляковскому сельскому поселению. Практически все побережье данного муниципального образования (на протяжении более 13 км) подвержено активному проявлению абразионных процессов, средняя интенсивность которых достигает 3,7 м/год в районе с. Боцманово. Берег данного сельского поселения в зоне возможного разрушения представляет плотно заселенную территорию с большим количеством объектов капитального жилищного строительства, значительная часть которых отмечена на кадастровых картах Росреестра (55 % от всех объектов строительства и инфраструктуры Неклиновского района, отмечен-

Таблица 1. Итоговый расчет прогнозируемого ущерба социально-экономическим объектам сельских поселений приморских районов Ростовской области от последствий воздействия абразионных процессов (без учета социально-экономических объектов береговой зоны г. Таганрога и Миусского лимана, а также объектов капитального строительства и прочих сооружений, не отмеченных на публичных кадастровых картах Росреестра)
Table 1. The final calculation of the predicted damage to the socio-economic objects of rural settlements in the coastal districts of the Rostov region from the effects of the abrasion processes impact (excluding the socio-economic objects of the coastal zone of Taganrog and the Miussky estuary, as well as capital construction objects and other structures not marked on public cadastral maps of Rosreestr)

Сельское поселение административного района Rural settlement of the administrative district	Функциональные участки берега Азовского моря (или их отрезки) в границах сельских поселений, № / Functional sections of the coast of the Sea of Azov (or their segments) within the boundaries of the rural settlements, No	Вид хозяйственной деятельности и характер поселения на участках, подверженных абразии / Type of economic activity and the nature of the settlement in areas prone to coastal abrasion	Соотношение площадей земель различного использования, подверженных абразии, % / The ratio of the areas of lands of various uses, subject to coastal abrasion, %	Расчетная площадь участков земель, подверженных абразии, в перспективе на 20 лет, тыс. м² / Estimated area of land plots subject to coastal abrasion in the future for 20 years, thousand m²	Прогнозируемый ущерб земельным участкам, млн рублей в абсолютном выражении / Forecasted damage to land plots, million rubles in absolute terms	Удельная величина ущерба земельным участкам, млн рублей на 1 погонный километр / Specific value of damage to land plots, million rubles on 1 running kilometer	Количество объектов капитального строительства и прочих сооружений в зоне прогнозируемого абразионного разрушения, единиц / Number of capital construction objects and other structures in the zone of predicted coastal abrasion destruction, units	Прогнозируемый ущерб объектам капитального строительства и прочим сооружениям, млн рублей в абсолютном выражении / Forecasted damage to capital construction objects and other structures, mln. rubles in absolute terms	Прогнозируемый суммарный ущерб земельным участкам, объектам капитального строительства, сооружениям и пр., млн рублей в абсолютном выражении / Predicted total damage to land plots, capital construction objects, structures, etc., mln. rubles in absolute terms
Неклиновский район / Neklinovskiy district									
Платовское Platovskoe	1–4	НП + СХН LS + AL	–	421,9	6,8	–	7	1,4	8,2
		НП / LS	32,6	137,4	4,9	1,3	7	1,4	6,3
		СХН / AL	67,4	284,5	1,9	0,25	–	–	1,9
Натальевское Natalievskoe	4–6	НП + СХН LS + AL	–	106,9	3,8	–	3	1,6	5,4
		НП / LS	85,1	91,0	3,7	1,8	3	1,6	5,3
		СХН / AL	14,9	15,9	0,1	0,13	–	–	0,1
Лакедемоновское Lakedemonovskoe	7–8	НП + СХН LS +AL	–	49,9	2,0	–	–	–	2,0
		НП / LS	73,8	36,9	1,9	0,42	–	–	1,9
		СХН / AL	26,2	13,0	0,1	0,05	–	–	0,1
Поляковское Polyakovskoe	9–12	НП / LS	–	457,4	18,9	–	38	49,2	68,1
		НП / LS	100	457,4	18,9	1,4	38	49,2	68,1
Новобессергеневское Novobessergenevskoe	12–13	НП / LS	–	62,8	2,4	–	21	27,4	29,9
		НП / LS	100	62,8	2,4	1,73	21	27,4	29,9

Окончание табл. 1

Сельское поселение административного района Rural settlement of the administrative district	Функциональные участки берега Азовского моря (или их отрезки) в границах сельских поселений, № / Functional sections of the coast of the Sea of Azov (or their segments) within the boundaries of the rural settlements, No	Вид хозяйственной деятельности и характер поселения на участках, подверженных абразии / Type of economic activity and the nature of the settlement in areas prone to coastal abrasion	Соотношение площадей земель различного использования, подверженных абразии, % / The ratio of the areas of lands of various uses, subject to coastal abrasion, %	Расчетная площадь участков земель, подверженных абразии, в перспективе на 20 лет, тыс. м² / Estimated area of land plots subject to coastal abrasion in the future for 20 years, thousand m²	Прогнозируемый ущерб земельным участкам, млн рублей в абсолютном выражении / Forecasted damage to land plots, million rubles in absolute terms	Удельная величина ущерба земельным участкам, млн рублей на 1 погонный километр / Specific value of damage to land plots, million rubles on 1 running kilometer	Количество объектов капитального строительства и прочих сооружений в зоне прогнозируемого абразионного разрушения, единиц / Number of capital construction objects and other structures in the zone of predicted coastal abrasion destruction, units	Прогнозируемый ущерб объектам капитального строительства и прочим сооружениям, млн рублей в абсолютном выражении / Forecasted damage to capital construction objects and other structures, mln. rubles in absolute terms	Прогнозируемый суммарный ущерб земельным участкам, объектам капитального строительства, сооружениям и пр., млн рублей в абсолютном выражении / Predicted total damage to land plots, capital construction objects, structures, etc., mln. rubles in absolute terms
Вареновское Varenovskoe	14	НП / LS	–	9,4	0,7	–	–	–	0,7
		НП / LS	100	9,4	0,7	0,28	–	–	0,7
Приморское Primorskoe	15–16	НП / LS	–	1,5	0,2	–	–	–	0,2
		НП / LS	100	1,5	0,2	0,22	–	–	0,2
Азовский район / Azov district									
Круглянское Kruglyanskoe	17–18	НП + СХН LS + AL	–	129,9	4,8	–	–	–	4,8
		НП / LS	29,8	38,7	4,1	0,42	–	–	4,1
		СХН / AL	70,2	91,2	0,7	0,18	–	–	0,7
Семибалковское Semibalkovskoe	19–20	НП + СХН LS + AL	–	320,9	13,6	–	2	5,7	19,3
		НП / LS	49,2	157,7	12,5	2,15	2	5,7	18,2
		СХН / AL	50,8	163,2	1,1	0,16	–	–	1,1
Маргаритовское Margaritovskoe	20–26	НП + СХН LS + AL	–	432,8	8,9	–	2	1,3	10,3
		НП / LS	23,2	100,3	6,4	0,95	2	1,3	7,8
		СХН / AL	76,8	332,5	2,5	0,17	–	–	2,5

Примечание. НП – земли населенных пунктов; СХН – земли сельскохозяйственного назначения.
Note. LS – lands of settlements; AL – agricultural lands.

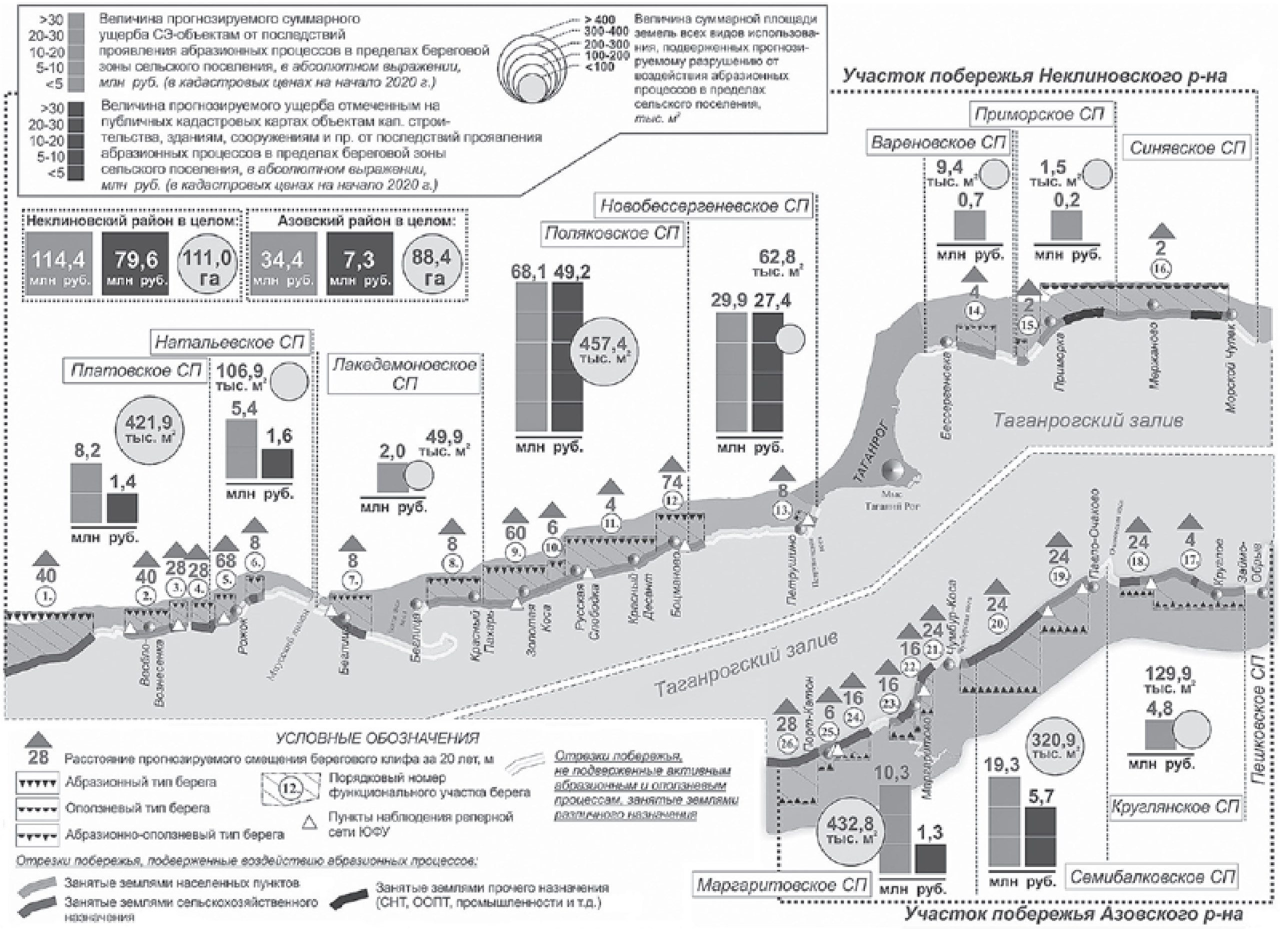


Рис. 2. Картосхема распределения прогнозируемого ущерба социально-экономическим объектам в сельских поселениях приморских районов Ростовской области от последствий воздействия абразионных процессов (без учета социально-экономических объектов береговой зоны Таганрога и Миусского лимана, а также объектов капитального строительства и прочих сооружений, не отмеченных на публичных кадастровых картах Росреестра).

Fig. 2. Schematic map of the distribution of the predicted damage to socio-economic objects in the context of rural settlements of the coastal districts of the Rostov region from the consequences of the abrasion processes impact (excluding the socio-economic objects of the coastal zone of Taganrog and the Miussky estuary, as well as capital construction objects and other structures not marked on public cadastral maps of Rosreestr).

ных на картах Росреестра и расположенных в зоне прогнозируемого абразионного разрушения). Кроме того, кадастровая стоимость приморских земель данного муниципалитета является самой высокой среди сельских поселений к западу от Таганрога.

Значительный ущерб СЭ-объектам от последствий воздействия абразии может быть нанесен соседнему – Новобессергеневскому – сельскому поселению (рис. 3). Несмотря на то, что в пределах данного муниципалитета подверженные активным абразионным процессам берега имеют малую протяженность (всего 1,4 км), в зону прогнозируемого разрушения может попасть 21 отмеченный на картах Росреестра объект, преимущественно жилищного строительства.

Достаточно высокий суммарный ущерб СЭ-объектам (8,2 млн рублей) прогнозируется и для крайнего западного, приграничного сельского поселения района – Платовского. Здесь, несмотря на преобладание в структуре подверженных абразии земель сельхозугодий (67,4 %), отличающихся невысокой (6,37 рубля за 1 м²) кадастровой стоимостью, разрушению за 20-летний период могут подвергнуться 7 объектов жилищного строительства и инфраструктуры с. Весёло-Вознесенка. При этом в прибрежной полосе данного села (в зоне возможного разрушения) авторами исследования выявлено еще как минимум 5 объектов строительства и инфраструктуры, не отмеченных на публичных кадастровых картах.

Рис. 3. Распределение прогнозируемого суммарного ущерба социально-экономическим объектам от последствий воздействия абразионных процессов по сельским поселениям Неклиновского района, %.
Fig. 3. Distribution of the predicted total damage to socio-economic objects from the consequences of the abrasion processes impact in rural settlements of the Neklinovskiy district, %.

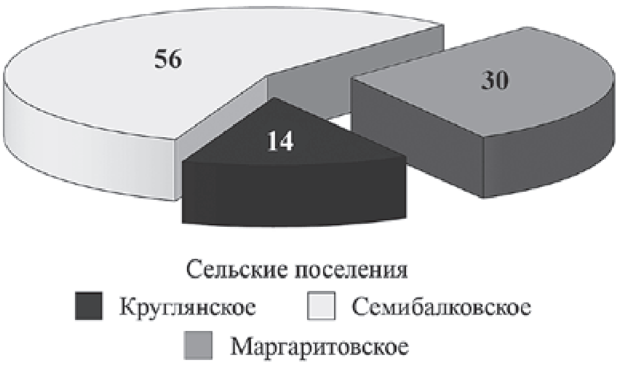


Рис. 4. Распределение прогнозируемого суммарного ущерба социально-экономическим объектам от последствий воздействия абразионных процессов по сельским поселениям Азовского района, %.
Fig. 4. Distribution of the predicted total damage to socio-economic objects from the consequences of the abrasion processes impact in rural settlements of the Azov district, %.

Наибольшая удельная величина прогнозируемого ущерба от последствий проявления абразионных процессов как землям населенных пунктов, так и землям сельскохозяйственного назначения в Неклиновском районе приходится на крайние западные сельские поселения – Платовское (земли населенных пунктов – 1,3 млн рублей/погонный км; земли сельскохозяйственного назначения – 0,25 млн рублей/погонный км) и Натальевское (земли населенных пунктов – 1,8 млн рублей/погонный км; земли сельскохозяйственного назначения – 0,13 млн рублей/погонный км) (табл. 1).

В пределах Азовского района наибольший суммарный ущерб (19,3 млн рублей) от последствий абразии может быть причинен Семибалковскому сельскому поселению, большая часть побережья которого подвержена активному проявлению береговой абразии со средней интенсивностью, достигающей 1,2 м/год. В структуре прибрежных земель данного сельского поселения с небольшим перевесом преобладают земли сельскохозяйственного назначения с относительно невысокой (6 рублей за 1 м^2) кадастровой стоимостью. При этом 94 % прогнозируемого ущерба будет приходиться на 5,8 км земель населенных пунктов с двумя объектами жилищного строительства, отмеченными на картах Росреестра.

Относительно весомый ущерб СЭ-объектам от последствий воздействия абразии может быть нанесен Маргаритовскому сельскому поселению (10,3 млн рублей) (рис. 4). В пределах данного муниципалитета основной прогнозируемый ущерб (более 75 %) придется на земли населенных пунктов с расположенными на них двумя объектами жилищного строительства.

Наибольшая удельная величина прогнозируемого ущерба от последствий проявления абразии как землям населенных пунктов, так и землям сельскохозяйственного назначения в Азовском районе приходится на Семибалковское сельское поселение (земли населенных пунктов – 2,15 млн рублей/погонный км; земли сельскохозяйственного назначения – 0,16 млн рублей/погонный км). В целом же удельная величина прогнозируемого ущерба землям сельскохозяйственного назначения примерно одинакова для всех сельских поселений района. Отличаются лишь удельные величины прогнозируемого ущерба землям населенных пунктов – от максимальной (2,15 млн рублей/погонный км) для Семибалковского до минимальной (0,42 млн рублей/погонный км) для Круглянского сельского поселения, в пределах которого зафиксированы невысокие скорости береговой абразии.

ВЫВОДЫ

В береговой зоне Азовского моря на территории Ростовской области установлено 73 объекта капитального строительства и сооружения различного назначения, подверженных воздействию опасных абразионных процессов. Подавляющее большинство этих зданий и конструкций расположено на землях наиболее плотно заселенного в береговой зоне Неклиновского района. Потери земель от разрушения берегов могут составить почти 200 га, или 23 м^2 на 1 погонный км морского берега, за 20 лет.

Величина прогнозируемого суммарного ущерба СЭ-объектам береговой зоны Азовского моря в пределах региона от последствий воздействия абразии может составить почти 150 млн рублей, из которых более 95 % составит ущерб землям населенных пунктов с расположенными на них объектами строительства и инфраструктуры. В Неклиновском районе основной ущерб от абразии будет связан с возможным разрушением объектов строительства и инфраструктуры, а в Азовском – земельных участков различного хозяйственного назначения.

В разрезе сельских поселений приморских районов региона по величине прогнозируемого ущерба СЭ-объектам от последствий абразии наблюдается существенная неоднородность. Наибольший суммарный ущерб может быть причинен Поляковскому (68,1 млн рублей) и Новобессергеневскому (29,9 млн рублей) сельским поселениям Неклиновского района с большим количеством прибрежных объектов жилищного строительства и высокой кадастровой стоимостью земель, а также Семибалковскому сельскому поселению (19,3 млн рублей) Азовского района, в пределах которого основной ущерб может принести абразионное разрушение земель населенных пунктов.

По удельной величине прогнозируемого ущерба прибрежным землям населенных пунктов лидируют Семибалковское (2,15 млн рублей/погонный км), Новобессергеневское (1,73 млн рублей/погонный км) и Натальевское (1,8 млн рублей/погонный км) сельские поселения. В то же время удельная величина возможного ущерба от абразии землям сельскохозяйственного назначения имеет практически схожие значения для всех сельских поселений прибрежных районов и варьируется в пределах от 0,16 до 0,25 млн рублей/погонный км.

Публикация подготовлена в рамках научного проекта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-05-80082 по теме «Закономерности формирования опасных береговых процессов в Азовском море и социально-экономические последствия их проявлений».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матишов Г.Г., Беспалова Л.А., Ивлиева О.В., Цыганкова А.Е., Кропянко Л.В. 2016. Азовское море: современные абразионные процессы и проблемы берегозащиты. *Доклады Академии наук*. 471(4): 483–486. doi: 10.7868/S086956521634020X

2. Матишов Г.Г., Бердников С.В., Беспалова Л.А., Ивлиева О.В., Цыганкова А.Е., Хартиев С.М., Иошпа А.Р., Архипова О.Е., Кропянко Л.В., Сушко К.С., Шевердяев И.В., Беспалова Е.В. 2015. *Современные опасные экзогенные процессы в береговой зоне Азовского моря*. Ростов н/Д, ЮФУ: 324 с.

3. Цыганкова А.Е., Беспалова Л.А., Ивлиева О.В. 2018. Динамика береговой линии Азовского моря за многолетний период. *Экология. Экономика. Информатика. Серия: системный анализ и моделирование экономических и экологических систем*. 1(3): 270–275. doi: 10.23885/2500-395x-2018-1-3-270-275

4. Ивлиева О.В., Бердников С.В. 2005. Современные скорости разрушения берегов российского побережья Азовского моря. *Геоморфология*. 4: 74–83. doi: 10.15356/0435-4281-2005-4-74-83

5. Беспалова Л.А., Цыганкова А.Е. 2020. 5.2. Абразионные процессы и их последствия. В кн.: *Труды Южного научного центра Российской академии наук. Том VIII: Моделирование и анализ опасных природных явлений в Азовском регионе*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 97–110. doi: 10.23885/1993-6621-2020-8-97-110

6. Хорошев О.А., Меринова Ю.Ю., Хаванский А.Д., Латун В.В. 2020. Оценка социально-экономического ущерба проявления абразионных и оползневых процессов в береговой зоне Азовского моря. В кн.: *Труды Южного научного центра Российской академии наук. Том VIII: Моделирование и анализ опасных природных явлений в Азовском регионе*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 300–311. doi: 10.23885/1993-6621-2020-8-300-31

7. Khavansky A.D., Latun V.V., Khoroshev O.A., Merinova Yu.Yu., Nedoseka L.A. 2020. Risk assessment of hazardous abrasion and landslide processes in the coastal zone of the Azov Sea. *E3S Web of Conferences*.175(1): 06008. doi: 10.1051/e3sconf/202017506008

8. Схема территориального планирования Неклиновского района. *Администрация Неклиновского района Ростовской области*. URL: https://nekl.donland.ru/activity/18579/ (дата обращения: 03.04.2020).

9. Территориальное планирование и градостроительное зонирование. *Администрация Азовского района Ростовской области*. URL: https://azovskiy.donland.ru/activity/4101/ (дата обращения: 03.04.2020).

10. Публичная кадастровая карта. *Роскадастр. Кадастр недвижимости в России*. URL: http://roscadastr.com/map (дата обращения: 01.12.2020).

REFERENCES

1. Matishov G.G., Bespalova L.A., Ivlieva O.V., Tsygankova A.E., Kropyanko L.V. 2016. The Sea of Azov: recent abrasion processes and problems of coastal protection. *Doklady Earth Sciences*. 471(2): 1269–1272. doi: 10.1134/S1028334X16120059

2. Matishov G.G., Berdnikov S.V., Bespalova L.A., Ivlieva O.V., Tsygankova A.E., Khartiev S.M., Ioshpa A.R., Arkhipova O.E., Kropyanko L.V., Sushko K.S., Sheverdyaev I.V., Bespalova E.V.

2015. *Sovremennye opasnye ekzogennye protsessy v beregovoy zone Azovskogo morya.* [*Modern hazardous exogenous processes in the coastal zone of the Sea of Azov*]. Rostov-on-Don, Southern Federal University: 324 p. (In Russian).

3. Tsygankova A.E., Bespalova L.A., Ivlieva O.V. 2018. [Dynamics of the coastline of the Azov Sea for the long-term period]. *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: sistemnyy analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh sistem*. 1(3): 270–275. (In Russian). doi: 10.23885/2500-395x-2018-1-3-270-275
4. Ivlieva O.V., Berdnikov S.V. 2005. [Recent destruction rates of the Azov beaches in Russia]. *Geomorfologiya*. 4: 74–83. (In Russian). doi: 10.15356/0435-4281-2005-4-74-8
5. Bespalova L.A., Tsygankova A.E. 2020. [5.2. Abrasion processes and their consequences]. In: *Trudy Yuzhnogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. Tom VIII: Modelirovanie i analiz opasnykh prirodnykh yavleniy v Azovskom regione.* [*Studies of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences. Issue VIII: Modelling and analysis of natural hazards in the Sea of Azov Region*]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 97–110. (In Russian). doi: 10.23885/1993-6621-2020-8-97-110
6. Khoroshev O.A., Merinova Yu.Yu., Khavanskiy A.D., Latun V.V. 2020. [8.3. Assessment of socio-economic damage of manifestation of coastal abrasion and landslide processes in the coastal zone of the Sea of Azov]. In: *Trudy Yuzhnogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. Tom VIII: Modelirovanie i analiz opasnykh prirodnykh yavleniy v Azovskom regione.* [*Studies of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences. Issue VIII: Modelling and analysis of natural hazards in the Sea of Azov Region*]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 300–311. (In Russian). doi: 10.23885/1993-6621-2020-8-300-31
7. Khavansky A.D., Latun V.V., Khoroshev O.A., Merinova Yu.Yu., Nedoseka L.A. 2020. Risk assessment of hazardous abrasion and landslide processes in the coastal zone of the Azov Sea. *E3S Web of Conferences*.175(1): 06008. doi: 10.1051/e3sconf/202017506008
8. [Territorial planning scheme of the Neklinovsky district]. *Administratsiya Neklinovskogo rayona Rostovskoy oblasti.* Available at: https://nekl.donland.ru/activity/18579/ (accessed 3 April 2020). (In Russian).
9. [Territorial planning and urban planning zoning]. 2020. *Administratsiya Azovskogo rayona Rostovskoy oblasti.* Available at: https://azovskiy.donland.ru/activity/4101/ (accessed 3 April 2020). (In Russian).
10. [Public cadastral map]. *Roskadastr. Kadastr nedvizhimosti v Rossii*. Available at: http://roscadastr.com/map (accessed 1 December 2020). (In Russian).

Поступила 14.04.2021

УДК 504.052 : 502.2.05
DOI: 10.7868/S25000640210311

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЯВЛЕНИЯ УЧАСТКОВ С ПРОЯВЛЕНИЕМ НЕРАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ АЗОВСКОГО МОРЯ [1]

© 2021 г. О.А. Хорошев[1], К.С. Сушко[1], С.А. Мисиров[1]

Аннотация. По результатам азовской комплексной экспедиции 2019 г. в пределах российского сектора береговой зоны Азовского моря выявлен ряд участков с проявлением нерационального природопользования. На исследуемых отрезках побережья обнаружены 40 неизвестных, а также ранее зафиксированных различных по площади свалочных очагов твердых бытовых отходов, значительные по протяженности участки земель, распаханных в опасной близости от береговых клифов в районах с активным проявлением абразионных и оползневых процессов в пределах Республики Крым (Ленинский район), Краснодарского края (Темрюкский, Приморско-Ахтарский, Ейский, Щербиновский районы) и Ростовской области (Азовский, Неклиновский районы). Проведен анализ пространственного расположения территорий с отмеченными признаками нерационального природопользования. Также в процессе наблюдений были выявлены различные факты отрицательного антропогенного воздействия на окружающую среду: застройка в границах прибрежных защитных полос, последствия пожаров, действующие и закрытые для захоронения кладбища, подверженные воздействию опасных береговых процессов, признаки добычи полезных ископаемых в прибрежной зоне и пр.

Ключевые слова: нерациональное природопользование, береговая зона Азовского моря, свалки твердых бытовых отходов, распашка земель в прибрежной полосе, аспекты антропогенного воздействия на окружающую среду.

RESULTS OF IDENTIFICATION OF PLOTS WITH IRRATIONAL NATURE MANAGEMENT IN THE COASTAL ZONE OF THE SEA OF AZOV

O.A. Khoroshev[1], K.S. Sushko[1], S.A. Misirov[1]

Abstract. According to the results of the Azov complex expedition in 2019, a number of areas with the manifestation of irrational nature management were identified within the Russian sector of the coastal zone of the Sea of Azov. Within the investigated coastal sections 40 unknown and previously recorded solid waste deposits of different area were found, significant areas of land plowed up in dangerous proximity to coastal cliffs in areas with active manifestation of abrasion and landslide processes within the Republic of Crimea (Lenino District), Krasnodar Region (Temryuk, Primorsko-Akhtarsk, Yeysk, Shcherbinovskiy districts) and Rostov Region (Azov, Neklinovskiy districts). The analysis of the spatial location of territories with the marked signs of irrational nature management has been carried out. Also, During the coastal monitoring various facts of negative anthropogenic impact on the environment were revealed: development within the boundaries of coastal protective zones, the consequences of fires, operating and closed for burial cemeteries, exposed to hazardous coastal processes, signs of mining in the coastal zone etc.

Keywords: irrational nature management, coastal zone of the Azov Sea, solid waste landfills, plowing of land in the coastal strip, aspects of anthropogenic impact on the environment.

[1] Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: ourregion@mail.ru

[1] **Оригинальный текст:** *Хорошев О.А., Сушко К.С., Мисиров С.А.* Результаты выявления участков с проявлением нерационального природопользования в береговой зоне Азовского моря // Наука Юга России. 2021. Т. 17. № 3. С. 94–98.

ВВЕДЕНИЕ

Активное заселение и хозяйственное освоение прибрежных районов Азовского моря негативно отражается на состоянии приморских экосистем. Среди прочих проявлений отрицательного воздействия на окружающую среду в береговой зоне выделяются: сельскохозяйственная распашка земель в пределах прибрежных защитных полос (ПЗП), образование несанкционированных свалок твердых бытовых отходов (ТБО), возникающих преимущественно на окраинах селитебных зон и в местах неорганизованного пляжного отдыха, стихийная добыча полезных ископаемых, застройка в близости от береговой линии и пр.

В ранее опубликованных работах ученых Южного научного центра Российской академии наук и Южного федерального университета [1; 2] большое внимание уделялось, в частности, проблемам неблагоприятного антропогенного воздействия на окружающую среду в береговой зоне Приазовья. Изучение воздействия человеческой деятельности на прибрежные территории не потеряло актуальности на фоне возрастающих темпов хозяйственного освоения азовского побережья.

Целью работы являлись выявление и анализ пространственного расположения участков с проявлением нерационального природопользования, различных аспектов антропогенного воздействия на окружающую среду в российской части береговой зоны Азовского моря.

Проведенная в августе – октябре 2019 г. вторая часть азовской комплексной экспедиции была посвящена наземным исследованиям в береговой зоне Азовского моря на участке российского побережья – от Арабатской стрелки в Республике Крым до западной границы Неклиновского района Ростовской области. В перечень ключевых задач экспедиции входило исследование и анализ практик природопользования в береговой зоне, в частности, выявление участков с проявлением нерационального природопользования. С целью дополнительного сбора полевых материалов были осуществлены отдельные выезды на берега и косы Таганрогского залива Азовского моря в октябре – декабре 2020 г. и в июне 2021 г.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В процессе экспедиционных работ был использован ряд традиционных методов: натурные наблюдения, фото-, видеодокументирование, геодезические измерения. На отдельных участках осуществлены аэровизуальные наблюдения, панорамная (VR 360°) видеофиксация объектов и процессов. Для идентификации и определения протяженности участков с распашкой берегов, подверженных абразионным и оползневым процессам, изучены спутниковые космоснимки (ESRI), применены измерительные инструменты ГИС-приложения «Публичная кадастровая карта» [3]. Для обследования ранее зафиксированных свалочных очагов в береговой зоне Азовского моря использован открытый сетевой ресурс «Интерактивная карта свалок» [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По маршруту следования экспедиции были обследованы как уже известные, ранее отмеченные на «Интерактивной карте свалок» [4], свалочные очаги ТБО, так и вновь выявленные (рис. 1). Обнаруженные свалки различались по площади, содержанию различных видов отходов, времени возникновения, наличию следов рекультивации, располагались в местах массового пляжного отдыха, вдоль приморских дорог, на склонах береговых обрывов и оврагов в селитебных зонах сельских поселений, состояли преимущественно из отходов жизнедеятельности местных жителей и ТБО, оставшихся от сезонных отдыхающих.

Крупные по размерам свалки ТБО были зафиксированы в береговой зоне всех приазовских регионов РФ: в Республике Крым (1 свалочный очаг), в Краснодарском крае (6 свалочных очагов) в Ростовской области (2 свалочных очага). Большинство крупных свалок представляло собой рассредоточенные по территории локальные нагромождения различных видов ТБО (отходы жизнедеятельности, строительный мусор и пр.). На некоторых свалках (в окрестностях Ахтанизовского грязевого вулкана, с. Порт-Катон, на косах Ясенской и Долгой) наблюдались следы деятельности, напоминающей рекультивацию. Наблюдения в октябре 2020 г. и в июне 2021 г. подтвердили, что работы по ликвидации крупной свалки в окрестностях с. Порт-Катон продолжаются.

Особую тревогу вызывают зафиксированные свалочные очаги, расположенные в границах или в близости от границ ПЗП, мусор с которых, особенно при нагонных явлениях, беспрепятственно поступает в акваторию моря. К таким объектам относятся как мелкие свалки, локализованные в пре-

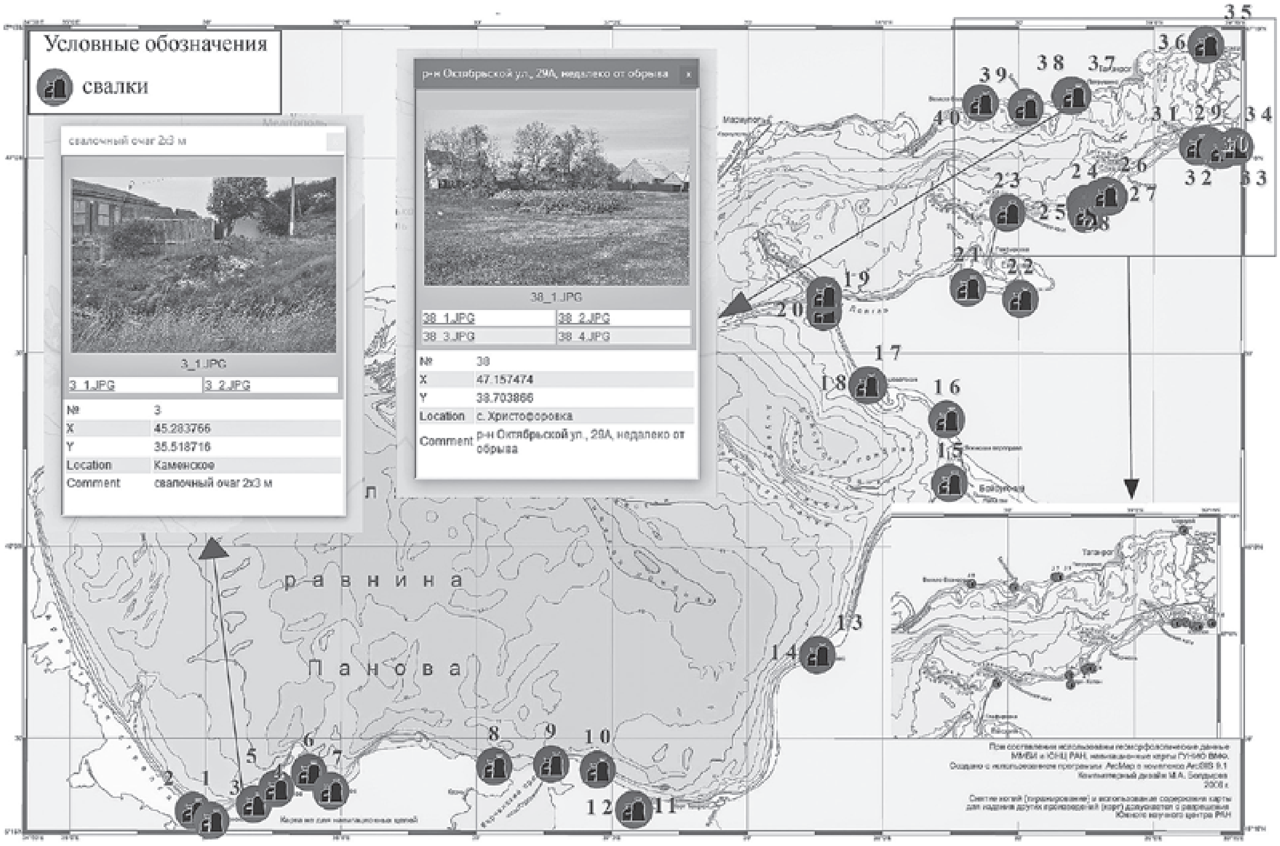


Рис. 1. Карта пространственного расположения несанкционированных свалочных очагов твердых бытовых отходов в российском секторе береговой зоны Азовского моря, выявленных в процессе экспедиционных работ 2019 г.

Fig. 1. Map of the spatial location of unauthorized dumping centers of solid domestic waste in the Russian sector of the coastal zone of the Sea of Azov, identified during expeditionary work in 2019.

делах пляжей и склонов береговых обрывов, так и крупные свалочные очаги, к примеру, большая свалка ТБО на Должанской косе.

Одной из задач экспедиции являлось выявление случаев распашки земель в пределах ПЗП Азовского моря, подверженных абразионным и оползневым процессам (50 м от береговой линии, с учетом угла уклона местности, превышающего 3°). В прибрежных административных районах Краснодарского края и Ростовской области более 70 % длины участков, затронутых распашкой в пределах ПЗП, приходится на Ейский район, примерно по 10 % – на Приморско-Ахтарский и Неклиновский районы, более 6 % и 3 % – на Азовский и Щербиновский районы соответственно (рис. 2).

По отдельным отрезкам российского сектора азовского побережья зафиксированная протяженность земель, распаханных в опасной близости от береговых клифов и расположенных в пределах ПЗП, составила: юго-восточное побережье Азовского моря – около 30 км; южное побережье Таганрогского залива – более 23 км; северное побережье Таганрогского залива – около 6 км. Анализ пространственного расположения распаханных участков в пределах всего российского побережья Азовского моря позволяет предположить, что соблюдение аграриями границ ПЗП при возделывании почв сильно осложнено последствиями абразионных и оползневых процессов, нарушающих статичность границы 50-метрового отступа. В некоторых случаях не исключено и намеренное нарушение распашкой границ ПЗП с учетом ценности высокоплодородных черноземов прибрежной полосы.

По итогам экспедиции также выявлен ряд прочих фактов отрицательного антропогенного воздействия на окружающую среду. В частности, зафиксированы случаи выпаса крупного рогатого скота в границах ПЗП Азовского моря, возле впадающих в него рек и ручьев (Ленинский район Республики Крым, Ейский район Краснодарского края, Азовский и Неклиновский районы Ростовской области).

В различных точках побережья отмечены следы площадных пожаров, частично уничтоживших прибрежную древесно-кустарниковую растительность, закрепляющую склоны. На всем протяжении экспедиционного маршрута были выявлены свидетельства рекреационной и жилищной застройки в близости от береговой линии. Кроме того, были зафиксированы: признаки добычи полезных ископаемых в прибрежной зоне (песка и ракуши на всех косах азовского побережья, глины – восточнее Очаковской косы); многочисленные свидетельства нахождения легкового и грузового автотранспорта в пределах ПЗП, в том числе на участках с активным проявлением абразионных и оползневых процессов; последствия браконьерской деятельности (обрывки сетей).

В пределах береговой зоны Азовского моря выявлено 6 действующих и закрытых для захоронения кладбищ, расположенных в границах ПЗП или в близости от их границ, при этом пять из них имели следы воздействия опасных береговых процессов (за исключением действующего кладбища в с. Стефанидинодар, расположенного в некотором отдалении от абразионного обрыва [5]). На четырех кладбищах (за исключением старых кладбищ в с. Порт-Катон и на Чумбурской косе) зафиксированы относительно новые захоронения.

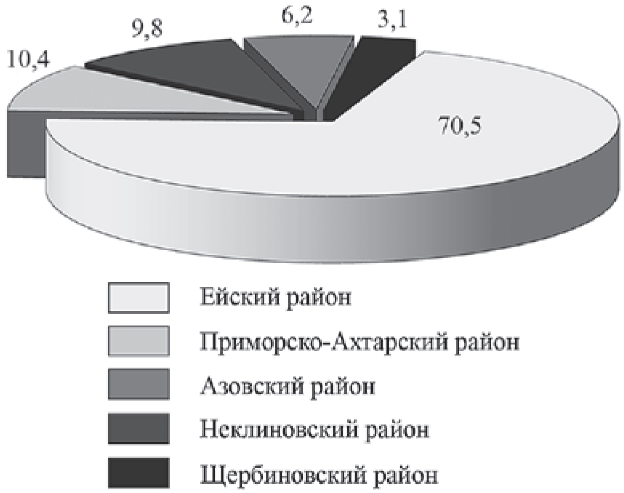


Рис. 2. Распределение длин участков земель, затронутых распашкой в пределах прибрежной защитной полосы Азовского моря, по приморским административным районам Краснодарского края и Ростовской области, %.

Fig. 2. Distribution of the lengths of land plots affected by plowing within the coastal protective strip of the Sea of Azov by the coastal administrative districts of Krasnodar and Rostov regions, %.

ВЫВОДЫ

По итогам экспедиции в пределах российского сектора береговой зоны Азовского моря выявлены участки с проявлением нерационального природопользования, ряд существенных фактов отрицательного антропогенного воздействия на окружающую среду. Так, на исследуемых участках зафиксировано 40 несанкционированных свалок ТБО, из которых 65 % имели площадь, не превышающую 10 м^2. Анализ пространственного расположения крупных по размерам свалочных очагов ТБО показал, что наибольшее их количество находится в береговой зоне Краснодарского края.

Зафиксировано около 60 км земель, распаханных в опасной близости от береговых клифов. Почти 51 % длины участков, затронутых распашкой в пределах ПЗП, приходится на юго-восточное побережье Азовского моря, 39,3 % – на южный берег Таганрогского залива и 9,8 % – на северное побережье Таганрогского залива. Более 84 % длины таких участков отмечено в Краснодарском крае.

Выявлены свидетельства рекреационной и жилищной застройки, случаи нахождения автотранспорта в границах ПЗП, последствия площадных пожаров, 6 действующих и закрытых для захоронения кладбищ, подверженных воздействию опасных береговых процессов, признаки добычи полезных ископаемых и пр.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность к.г.н. А.В. Клещенкову за организацию и проведение экспедиции. Работа выполнена при финансовой поддержке ВОО «Русское географическое общество» в рамках научного проекта № 07/2020-И «Берега и косы Азовского моря: прошлое, настоящее и будущее (Продолжение Комплексной Азовской экспедиции 2019 г.)».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Архипова О.Е., Булышева Н.И., Гаргопа Ю.М., Голубева Н.И., Инжебейкин Ю.И., Ковалева Г.В., Кондаков А.А., Красноруцкая К.В., Лебедева Н.В., Лужняк В.А., Набоженко М.В., Панасюк Н.В., Савицкий Р.М., Саяпин В.В., Сорокина В.В., Степаньян О.В., Титов В.В., Толочко И.В., Шохин И.В. 2011. *Экологический атлас Азовского моря*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 328 с.
2. Матишов Г.Г., Бердников С.В., Беспалова Л.А., Ивлиева О.В., Цыганкова А.Е., Хартиев С.М., Иошпа А.Р., Архипова О.Е., Кропянко Л.В., Сушко К.С., Шевердяев И.В., Беспало-

ва Е.В. 2015. *Современные опасные экзогенные процессы в береговой зоне Азовского моря*. Ростов н/Д, ЮФУ: 324 с.

3. Публичная кадастровая карта. *Роскадастр. Кадастр недвижимости в России*. URL: http://roscadastr.com/map (дата обращения: 15.05.2020).

4. Генеральная уборка. Интерактивная карта свалок. *Общероссийский народный фронт*. URL: http://test.kartasvalok.ru (дата обращения: 15.05.2020).

5. Беспалова Л.А., Цыганкова А.Е. 2020. 5.2. Абразионные процессы и их последствия. В кн.: *Труды Южного научного центра Российской академии наук. Том VIII: Моделирование и анализ опасных природных явлений в Азовском регионе*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 97–110. doi: 10.23885/1993-6621-2020-8-97-110

REFERENCES

1. Matishov G.G., Matishov D.G., Arkhipova O.E., Bulysheva N.I., Gargopa Yu.M., Golubeva N.I., Inzhebeikin Yu.I., Kovaleva G.V., Kondakov A.A., Krasnorutskaya K.V., Lebedeva N.V., Luzhnyak V.A., Nabozhenko M.V., Panasyuk N.V., Savitsky R.M., Sayapin V.V., Sorokina V.V., Stepanyan O.V., Titov V.V., Tolochko I.V., Shokhin I.V. 2011. *Ekologicheskiy atlas Azovskogo morya*. [*Ecological Atlas of the Sea of Azov*]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 328 p. (In Russian).

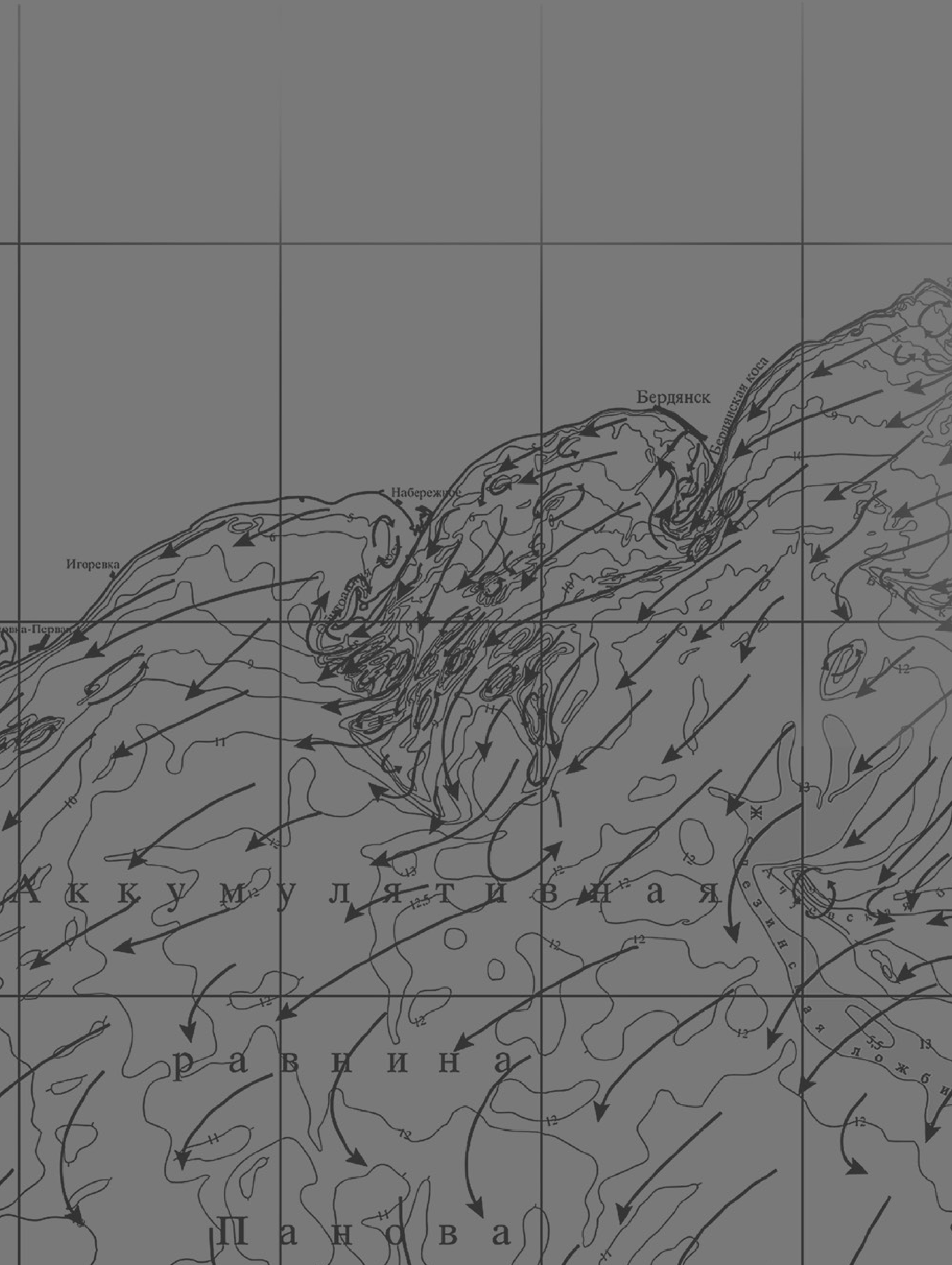
2. Matishov G.G., Berdnikov S.V., Bespalova L.A., Ivlieva O.V., Tsygankova A.E., Khartiev S.M., Ioshpa A.R., Arkhipova O.E., Kropyanko L.V., Sushko K.S., Sheverdyaev I.V., Bespalova E.V. 2015. *Sovremennye opasnye ekzogennye protsessy v beregovoy zone Azovskogo morya*. [*Modern hazardous exogenous processes in the coastal zone of the Sea of Azov*]. Rostov-on-Don, Southern Federal University: 324 p. (In Russian).

3. [Public cadastral map]. *Roskadastr. Kadastr nedvizhimosti v Rossii*. Available at: http://roscadastr.com/map (accessed 15 May 2020). (In Russian).

4. [General cleaning. Waste dumps interactive map]. *Obshcherossiyskiy narodnyy front*. Available at: http://test.kartasvalok.ru (accessed 15 May 2020). (In Russian).

5. Bespalova L.A., Tsygankova A.E. 2020. [5.2. Abrasion processes and their consequences]. In: *Trudy Yuzhnogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. Tom VIII: Modelirovanie i analiz opasnykh prirodnykh yavleniy v Azovskom regione*. [*Studies of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences. Issue VIII: Modelling and analysis of natural hazards in the Sea of Azov Region*]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 97–110. (In Russian). doi: 10.23885/1993-6621-2020-8-97-110

Поступила 17.06.2021


Бердянск
Бердянская коса
Набережное
Игоревка
Аккумулятивная
равнина
Панова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

574.5: 51.7

ГИПОТЕЗЫ ОБ АДАПТАЦИИ ВОДОРОСЛЕЙ К ПЕРИОДИЧЕСКИМ ФАКТОРАМ СРЕДЫ[1]

© 2021 г. В.Г. Ильичев*, О.А. Ильичева**

*Южный научный центр РАН, 344006, Ростов-на-Дону, ул. Чехова, 41
E-mail: vitaly369@yandex.ru

**Донской государственный технический университет,
344022, Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162
E-mail: oaili@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.06.2020 г.
После доработки 12.10.2020 г.
Принята к публикации 20.10.2020 г.

Предложена новая эколого-эволюционная модель водорослей малой размерности. В ней реализована одновременная динамика переменных (биомассы популяций) и параметров-границ интервала температурной толерантности $[a - d, a + d]$. При заданном периодическом режиме температуры данные параметры стремятся к некоторым финальным, так называемым эволюционно-устойчивым значениям. В результате расчетов установлено, что на плоскости (a, d) все эволюционно-устойчивые параметры располагаются в форме «радуги», наиболее удаленные точки которой соответствуют холоднолюбивым (диатомовым) и теплолюбивым (синезеленым) водорослям. Проведен анализ адаптации водорослей к двум периодическим факторам среды (температуры и солености) с заданными интервалами толерантности по температуре $[a - d, a + d]$ и по солености $[b - c, b + c]$. Установлено, что область эволюционно-устойчивых параметров в плоскости (a, b) зависит от степени синхронности факторов среды. В одних случаях эти параметры лежат на линейном отрезке, а в других вариантах возможно их неожиданное расположение на нелинейном овале.

Ключевые слова: модель, адаптация, эволюционно–устойчивые параметры, температура, соленость .
DOI: 10.31857/S0006302921020162

Возможное потепление климата вызовет деформацию не только температурного, но и других факторов среды. Так, в разных районах планеты изменится уровень осадков, что, в свою очередь, трансформирует там объем и сезонный режим речного стока. В частности, вариация донского стока всегда порождает преобразования солености Азовского моря – ключевого регулятора его продуктивности [1]. Известные модели ([2, 3] и др.) ориентированы преимущественно на описание поведения продукционных процессов. Однако для адекватной оценки долговременных экологических последствий при новых условиях среды требуются иные методы прогнозирования, а именно учет одновременной динамики и микроэволюции морских биоценозов. Игнорирование механизмов биологической адаптации приводит к занижению показателей биологической продуктивности.

Сокращение: ЭУ-параметры – эволюционно-устойчивые параметры.

Существуют разные подходы к построению моделей адаптации и микроэволюции. Создание достаточно эффективных эколого-эволюционных моделей связано с одновременным развитием математической экологии ([4, 5] и др.) и математической генетики ([6, 7] и др.). Однако прямолинейная попытка соединить эти формализации приводит к построению эколого-эволюционных моделей очень большой размерности. Это замедляет скорость расчетов и затрудняет проведение «асимптотических» прогнозов динамики экосистем на эволюционно-значимые времена.

В данной работе на основе идей эволюционного моделирования предложены новые компьютерные схемы [8], реализующие эти процессы. По сути, эволюция – это «естественный интеллект экосистем». Важное достоинство предлагаемого подхода – небольшая размерность моделей, что позволяет проводить долгосрочные прогнозы (на эволюционно-значимые времена) за приемлемое машинное время.

Ниже на основе эколого-эволюционной модели обнаружена взаимосвязь оптимальных темпе-

[1] **Оригинальный текст:** *Ильичев В.Г., Ильичева О.А.* Гипотезы об адаптации водорослей к периодическим факторам среды // Биофизика. 2021. Т. 66. № 2. С. 350–357.

ратур и оптимальных соленостей развития для эволюционно-зрелых видов водорослей. Это позволяет существенно снизить биологу выбор возможных исходов при адаптации водорослей.

АДАПТАЦИЯ ВОДОРОСЛЕЙ К ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ. ГИПОТЕЗА КРИТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ

Исследование характера адаптации популяций к температурному режиму среды является довольно популярной темой [9]. Здесь можно выделить два подхода, которые можно условно назвать внутренним и внешним.

Во внутреннем подходе делается упор на пространственных преобразованиях структур некоторых макромолекул клетки при деформации температуры среды. Так, полагают, что при нагреве она «раскручивается», а при охлаждении – «скручивается» [10].

Во внешнем подходе ключевую роль играет концепция Ф. Добжанского [11] о жестком полиморфизме природных популяций. Суть ее в том, что популяция представляет собой набор узкоспециализированных субпопуляций (форм) с возможно разными скоростями роста. В этом случае изменение температуры среды вызывает перестройку доминирующих форм, отчего меняются продукционные характеристики популяции в целом.

Ниже будет использован второй подход. Он составляет основу эволюционной экологии, а его функции проще поддаются математическому описанию. Этот путь достаточно универсален и был применен при поиске закономерностей коадаптации маршрутов миграции взаимодействующих рыбных популяций [12].

Обычно в эколого-эволюционных моделях «прямолинейно» соединены экологические и генетические процессы [13]. Предполагается, что любая популяция состоит из ряда субпопуляций, каждая из которых является носителем своих экологических параметров. В результате их антагонизма большая часть конкурентов погибает, а оставшиеся (одна или несколько) – являются носителями «оптимальных» параметров.

Несколько другой подход был предложен в работе [14], автор которой считал, что в процессе адаптации происходит поиск так называемых «эволюционно-устойчивых» параметров (ЭУ-параметры) с использованием теоретико–игровых соображений о выборе оптимальной стохастической стратегии поведения. Этот удачный термин может быть применен и в детерминированной ситуации. А именно, носителем ЭУ-параметра является популяция, которая не вытесняется своими мутантами с параметрами, близкими к исходным.

Напомним, основной недостаток традиционного подхода – необходимость задания в модели большого числа субпопуляций (1000 и более) на каждом трофическом уровне. Возникает противоречие между требованиями биологической адекватности и высокой скорости вычислений.

Здесь компромиссное решение основано на изобретении новой модельной конструкции «Адаптация». Она имитирует эволюционный процесс в малом, имеет небольшую размерность и поэтому обладает высоким быстродействием. В качестве иллюстрации ее практического применения будет проведен анализ динамики и микроэволюции фитоценоза при ежегодном периодическом изменении температуры водной среды.

Так, хорошо известно, что каждая группа водорослей имеет свой температурный интервал толерантности $I(a,d) = [a - d,\ a + d]$, внутри него происходит рост водорослей, скорость которого (R) в зависимости от температуры воды θ задается некоторой функцией, например, следующим симметричным образом:

$$R(\theta,a,d) = r\frac{[d^2 - (\theta - a)^2]}{d^3} \text{ при } \theta \in I(a,d), \text{ иначе } R = 0. \qquad (1)$$

Здесь r – некоторая суточная константа роста водорослей (положим $r = 3$).

Принято говорить: a является оптимальной температурой развития, d – ширина интервала I (для конкретной группы водорослей). График функции R в зависимости от q представляет собой «колокольчик» (см. рис. 1).

В формуле (1) воплощена гипотетическая идея Э. Пианки [15]: для эволюционно-зрелых популяций площадь под графиком R не изменяется при вариации параметров a и d. Отметим, что иногда используются и «несимметричные» функции [16] для описания роста водорослей, но это не вызывает существенных изменений в результатах.

Следует отметить, что естественная гипотеза Э. Пианки обманчиво проста и требует определенных уточнений. Так, исход борьбы двух конкурентов с разными (но равновеликими по площади) «колокольчиками» может зависеть от хода температурной кривой. Представляет интерес

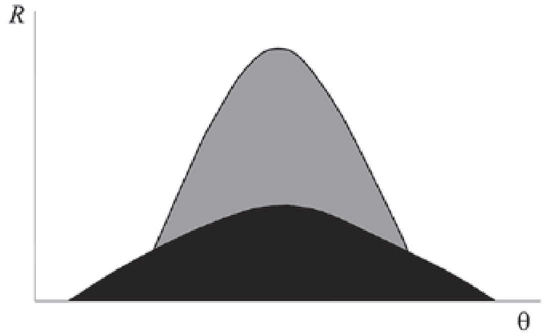


Рис. 1. График функции роста водорослей R в зависимости от температуры при фиксированном a и разных d.

проведение соответствующих лабораторных исследований.

В рамках известной модельной схемы Контуа [17] динамика численности одного вида водорослей задается базовым разностным уравнением:

$$x_{t+1} = x_t[1 - \alpha + R(\theta_t,a,d)\cdot K/(K + x_t)], \qquad (2)$$

где x_t – текущая численность водорослей; α – суточный коэффициент смертности (α = 0.1); K – величина корма (азота, фосфора и т. д.), положим ниже K = 1. Шаг в модели составляет одни сутки.

Отметим, что правая часть модели (2) представляет однородную функцию первой степени относительно переменных x и K. Это сильно сближает такие модели с линейными и упрощает исследование. В последнее время такого сорта модели приобретают все большую популярность [18].

В дальнейшем ключевую роль играет понятие эволюционной устойчивости. Так, пару параметров (a^*,d^*) назовем эволюционно-устойчивой (ЭУ-параметрами), если соответствующая (исходная) популяция не вытесняется в сообществе конкурентов (форм или мутантов) с близкими к (a^*,d^*) значениями параметров. По сути, эволюционная устойчивость – это способность не проигрывать в конкурентной борьбе.

Отметим, что поиск популяцией ЭУ-параметров имеет прежде всего «оборонительное» значение, но зачастую здесь реализуется и побочный эффект – увеличение биомассы популяции водорослей. Разумеется, свойство эволюционной устойчивости может зависеть от заданного в модели количества конкурентов. Однако, если их число достаточно велико, то результат эволюционного поиска, как правило, однозначен.

Разумеется, можно модифицировать данное определение эволюционной устойчивости относительно любого набора мутантов. При этом очевидно, что в процессе эволюции могут реализоваться только ЭУ-параметры.

Изложим теперь основную идею модельного поиска пары ЭУ-параметров, основанную на методах эволюционного моделирования [8]. Здесь важно отметить, что базовое понятие вытеснения популяции (достижения ею нулевой численности на асимптотике) требует больших затрат машинного времени. Поэтому ниже воспользуемся «более слабым» аналогом явления «вымирания». Приведем два возможных варианта.

Первый вариант основан на принципе Олли [19]. Так, будем говорить:

X_0 вымирает, если ее численность становится меньше ε,

где ε – малое положительное число. В качестве такого «абсолютного» порога можно взять тысячную долю от среднемноголетней биомассы водорослей.

Второй вариант опирается на относительное соотношение численностей конкурентов в семействе $\{X_0,X_1,...,X_n\}$.. Ниже под X_k будем подразумевать не только название, но и среднюю за период (один год) численность k-й популяции в режиме, близком к асимптотическому. Будем говорить, что

X_0 вытесняется, если $X_0/X_k < \varepsilon$ для некоторого k,

где критическое значение ε – малая константа, например, можно положить ε = 0.1. Такого мутанта (с номером k) будем называть сильным. Если таких сильных мутантов несколько, то выбираем самого сильного, который ниже будет определять направление эволюционного процесса. Здесь подразумевается достаточно монотонное асимптотическое поведение средних численностей популяций, обусловленное простыми нелинейностями в моделях. Но в более сложных ситуациях реализуется колебательная динамика, и тогда сильные мутанты попеременно могут сменять друг друга. Так, в работе [8] на с. 59 показано, что в семействе из трех групп микроорганизмов {A, B, C} имеет место неожиданная последовательность конкурентных исходов: A вытесняет B, B вытесняет C, C вытесняет A. В этом редком случае нельзя корректно выделить сильного мутанта.

Обычно эти различные варианты «слабого» отбора, заложенные в эколого-эволюционную модель, приводят к близким результатам. Но в ряде случаев второй вариант оказывается предпочтительнее. Ниже будет использован именно второй вариант. Пусть (a_0,d_0) – исходный набор параметров температурного интервала толерантности в исходной популяции X_0. Зафиксируем некоторое число m – число мутантов $\{X_1,...,X_4\}$, каждый из которых имеет свои параметры. Данные коэффициенты выбираются близкими к исходным параметрам [20]. Это производится следующим образом. Сначала определим величины:

$$a^- = a_0 - \xi_1,\ a^+ = a_0 + \xi_2,\ d^- = d_0 - \zeta_1,\ d^+ = d_0 + \zeta_2,$$

где все ξ_i и ζ_i – малые положительные фиксированные числа. Их можно выбирать случайным образом в некотором малом промежутке $(0,\Delta)$.

Считаем, что параметры мутантов следующие:

$$X^1 \to (a^-,d^-),\ X^2 \to (a^+,d^-),\ X^3 \to (a^-,d^+),\ X^4 \to \to (a^+,d^+).$$

Для сокращения формул ниже будем говорить, что (a_i,d_i) – параметры X^i.

Формализация «чисто» конкурентной борьбы в семействе близких популяций $\{X^0,X^1,...,X^4\}$ на базе модели (2) задается системой:

$$X^i_{t+1} = X^i_t[1 - \alpha + R(\theta_t, a_i, d_i) / (1 + \Sigma_t)], \qquad (3)$$

где $\Sigma_t = X^0_t + X^1_t + ... + X^4_t$ и $i = 0.1,...,4$. При фиксированных параметрах производим прогноз на длительный период времени (20 лет). Здесь могут возникать две ситуации:

1. «Плохая», когда исходная популяция вымирает (в слабом смысле). Тогда (a_0,d_0) заведомо не являются ЭУ-параметрами, и их следует модифицировать. Так, пусть, например, у первого мутанта наибольшая средняя за год численность среди остальных мутантов, тогда построим новые параметры исходной популяции:

$$(1 - \varepsilon)a_0 + \varepsilon a_1 \text{ и } (1 - \varepsilon)d_0 + \varepsilon d_1, \qquad (4)$$

где малый положительный параметр ε можно считать скоростью микроэволюции. Фактически формулы (4) означают малый сдвиг исходных параметров в сторону параметров самого сильного мутанта. Разумеется, это лишь одно из возможных направлений эволюционного процесса.

2. «Хорошая», когда исходная популяция не вымирает. Значит, она конкурентоспособна в рамках заданного набора мутантов.

Теперь следует произвести новую генерацию группы мутантов с новыми параметрами, близкими к коэффициентам исходной, например, путем случайного выбора каждого коэффициента в малом интервале «вариабельности» $(0,\Delta)$. Затем проводим очередное конкурентное испытание на 20 лет. Если таких (одновременно хороших) испытаний накопилось достаточно много (например, 100 испытаний), то можно с большой долей уверенности считать данные коэффициенты ЭУ-параметрами.

В качестве важного примера обсудим ситуацию, когда внутригодовая температура изменяется по фиксированному закону в пределах от 4 до 24:

$$\theta_t = 14 - 10\cos(2\pi t/T).$$

Здесь и всюду ниже $T = 365$, а t принимает дискретные значения от 1 до 365.

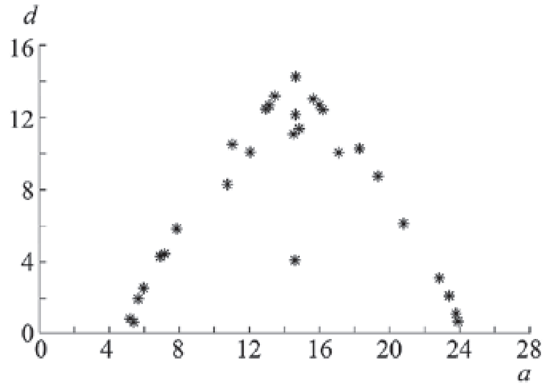


Рис. 2. Выделены ЭУ-параметры (a,d), полученные по модели «Адаптация».

Актуальна задача: какие пары (a^*,d^*) оказываются ЭУ-параметрами? При решении данной задачи задаем стартовые значения (a,d), а затем под действием модели «Адаптация» происходит изменение переменных и медленное изменение параметров. Полученные в результате расчетов на многолетний период финальные значения являются ЭУ-параметрами. При компьютерных экспериментах были испробованы различные точки старта из области параметров (AD): $4 \le a \le 24$ и $1 \le d \le 11$. Оказывается, что финальных пар (ЭУ-параметров) совсем немного, и они образуют (см. рис. 2) «радугу» (с малой сердцевиной).

Конструкция «Адаптация» позволяет выявить еще одно любопытное обстоятельство. Так, каждая начальная точка – узел решетки AD – притягивается к своей паре ЭУ-параметров, лежащей на «радуге». Какие же точки «радуги» являются наиболее «притягательными»?

Ими оказались три пары параметров: *Mini* = = (5, 1), *Maxi* = (23, 1) и *Midl* = (14, 10). Точнее, не сами точки, а их малые окрестности. Строго показано [21, 22], что в периодической среде множество ЭУ-параметров плотное, т.е. может содержать целые окрестности

Естественно, точка *Mini* соответствует холоднолюбивым (например, диатомовым), а точка *Maxi* – теплолюбивым (например, синезеленым) водорослям. В лабораторных экспериментах, действительно, обнаружен бимодальный характер температурной адаптации: «любимые температуры» бывают двух типов – достаточно высокие и довольно низкие [9]. Вероятно, это эволюционные реликты прошлых долговременных изменений климата – потепления и похолодания.

В отличие от этих стеногалинных (узкоспециализированных) водорослей, третья точка *Midl* характерна для эвригалинных (широкоспециализированных) видов. Хотя они редко наблюдаются в Азовском море, но возможно этот (до поры до времени) скрытый вид является эволюционным резервом азовского фитоценоза. А именно, в случае многолетнего апериодического (внутригодового) температурного режима он будет иметь конкурентное преимущество. Напротив, если периодический температурный режим в точности повторяется из года в год, то конкурентное преимущество принадлежит стеногалинным видам.

Отметим, что нелинейность Контуа в модели (3) допускает те или иные модификации. В этом случае трансформируется и соответствующее множество ЭУ-параметров. Однако если эти вариации не слишком сильные, то указанные выше точки («три богатыря») *Mini, Maxi* и *Midl* всегда в нем присутствуют.

Несколько более реалистичным представляется следующее задание температуры среды:

$$\theta_t = 14 - 10\cos(2\pi t/T) + h(t),$$

где $h(t)$ – случайная величина (белый шум) с равномерным распределением (нулевым средним и заданной дисперсией σ). В этом случае ширина «эволюционного оптимального» интервала толерантности будет увеличиваться с ростом σ.

Заметим, что в работе [23] приведена непрерывная модельная схема адаптации параметра a, включающая в себя основную популяцию и двух мутантов. При малом d тестовые расчеты показали, что в зависимости от выбора начального значения ЭУ-параметр a оказывается, как правило, вблизи одного из критических значений (локальных экстремумов) θ_t. Обнаружены и гораздо «менее притягательные» ЭУ-параметры a – это некоторые точки перегиба θ_t. В частности, значение 14 соответствует точке перегиба данной синусоидальной температурной кривой. В целом результаты по непрерывной и дискретной схемам практически совпадают.

ОДНОВРЕМЕННАЯ АДАПТАЦИЯ ВОДОРОСЛЕЙ К СОЛЕВОМУ И ТЕМПЕРАТУРНОМУ РЕЖИМАМ СРЕДЫ

Соленость и рост. Кратко обсудим адаптацию водорослей к солености среды. Функционально влияние солености на динамику фитопланктона подобно действию температуры. Так, каждый вид водорослей обладает своим интервалом солевой толерантности $J(b,c) = [b - c, b + c]$, в пределах которого они способны развиваться. При описании скорости роста используем прежнюю гипотезу Пианки:

$$\rho(S,b,c) = r\frac{[c^2 - (S-b)^2]}{c^3} \text{ при } S \in J(b,c), \text{ иначе } r = 0.$$

Здесь r – некоторая константа суточного роста водорослей.

Разумеется, по-прежнему актуальна проблема поиска ЭУ-параметров (b,c). С использованием схемы адаптации из предыдущего параграфа установлено, что и в данном случае наиболее «притягательными» оказываются коэффициенты b, близкие к экстремальным значениям (минимумы или максимумы) температурной кривой с малым коэффициентом c. Согласно работе [8] это так называемая гипотеза критических значений.

Например, для периодического солевого режима водоема, «похожего» на Таганрогский залив, $S_t = 7 - 3\cos(2\pi t/T)$ найдены два «наиболее притягательных» параметра: $b = 4.5$ и $b = 9.5$ при $c = 0.5$. Они характерны для разных стеногалинных видов – пресноводных синезеленых и морских диатомовых водорослей. Реже возникает пара ЭУ-параметров $b = 7.0$ при $c = 3.5$, соответствующая эвригалинной водоросли.

Модификация модели «Адаптация». Обсудим поиск ЭУ-параметров (a,d,b,c), когда на периодическое изменение температуры и солености накладывается «белый шум» с небольшой дисперсией:

$$\theta_t = 14 - 10\cos(2\pi t/T) + h_\theta(t)$$
$$\text{и } S_t = 7 - 3\cos(2\pi t/T - \varphi) + h_S(t), \qquad (5)$$

где $h_\theta(t)$ и $h_S(t)$ – случайные величины с равномерным распределением; у обоих нулевое среднее и дисперсии 1 и 1/2 соответственно. Здесь φ – возможный временной сдвиг в годовом поведении указанных факторов. Например, при $\varphi = 0$ имеет место синхронная динамика, а при $\varphi = \pi$ – противоположное изменение (увеличение одного фактора сопровождается уменьшением другого).

Совместный учет данных факторов на рост водорослей может быть реализован многими способами. Ниже выбрана мультипликативная версия функции роста (Ω):

$$\Omega(\theta,S,a,d,b,c) = R(\theta,a,d)\,\rho(S,b,c).$$

Иногда среднегодовое значение Ω может оказаться слишком малым, тогда популяция будет вымирать. Для сохранения ее живучести в модели следует выбирать достаточно большое значение r. Далее полагаем $r = 20$.

Теперь базовая модель динамики одной популяции водорослей представляется в форме:

$$x_{t+1} = x_t[1 - \alpha + \Omega(\theta_t, S_t, a_t, d_t, b_t, c_t)/(1 + x_t)]. \qquad (6)$$

На ее основе построим модифицированную адаптивную конструкцию, в которой наряду с исходной популяцией задано и 16 мутантов со своими параметрами. Кратко ее суть заключается в следующем. Пусть (a_0, d_0, b_0, c_0) – текущие (базовые) параметры исходной популяции. Обозначим параметры мутантов через:

$$\begin{gathered} a^- = a_0 - \delta_1,\ a^+ = a_0 + \delta_2, \\ d^- = d_0 - \eta_1,\ d^+ = d_0 + \eta_2, \\ b^- = b_0 - \delta_3,\ b^+ = b_0 + \delta_4, \\ c^- = c_0 - \eta_3,\ c^+ = c_0 + \eta_4, \end{gathered} \qquad (7)$$

где все δ_i и η_i – положительные числа из малого интервала «вариабельности» $(0,\Delta)$. Их можно выбирать случайным образом.

Параметры мутантов представляют собой комбинации данных вариаций от (a^-, d^-, b^-, c^-) до (a^+, d^+, b^+, c^+). Удобно их обозначить через (a_1, d_1, b_1, c_1) и т.д. вплоть до $(a_{16}, d_{16}, b_{16}, c_{16})$. Теперь модель конкурентного сообщества «исходная популяция + мутанты» имеет следующий вид:

$$X^i_{t+1} = X^i_t[1 - \alpha + \Omega(\theta_t, S_t, a_i, d_i, b_i, c_i)\ /\ (1 + \Sigma_t)], \quad (8)$$

где $\Sigma_t = X^0_t + X^1_t \ldots + X^{16}_t$ и $i = 0,1,\ldots,16$. Здесь схема адаптации будет аналогична предыдущей, а именно, если при фиксированных коэффициентах в модели (8) выявляется сильный мутант (например, первый), происходит пересчет базовых параметров по формулам:

$$\begin{gathered} (1 - \varepsilon)a_0 + \varepsilon a_1,\ (1 - \varepsilon)d_0 + \varepsilon d_1 \\ \text{и } (1 - \varepsilon)b_0 + \varepsilon b_1,\ (1 - \varepsilon)c_0 + \varepsilon c_1, \end{gathered}$$

где скорость микроэволюции ε – малый положительный параметр.

После этого согласно формулам (7) строятся коэффициенты мутантов.

Если выявить сильного мутанта не удалось, то производим новую случайную генерацию параметров всех мутантов и т.д.

Отметим, что данная схема адаптации предъявляет более жесткие требования к эволюционной устойчивости: чем больше мутантов, тем труднее исходной популяции выдержать их конкурентное давление. Разумеется, можно задать и другое количество (m) мутантов с достаточно

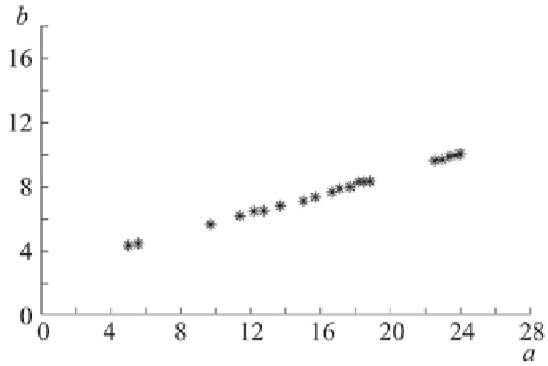


Рис. 3. ЭУ-параметры *(a,b)* при синхронном изменении температуры и солености. Структура типа «возрастающий отрезок».

представительным спектром параметров. Тестовые прогнозы продемонстрировали слабую зависимость области ЭУ-параметров от m.

Определенную роль играет и величина «вариабельности» Δ. Чем она больше, тем уже множество ЭУ-параметров.

Приведем результаты отдельных тестовых расчетов по данной модели. Во-первых, параметры d и c (ширина интервала толерантности) оказались малыми величинами. Во-вторых, подозреваем, что все возможные пары ЭУ-параметров a и b образуются как комбинации (прямое произведение) критических значений температуры и солености. Следовательно, кажется, что таких пар ЭУ-параметров будет не так уж много. Однако неожиданно возникла иная ситуация.

Напомним здесь возможную стратегию расчетов – это задание решетки в пространстве параметров (a,d,b,c). Далее, узлы решетки выбираются в качестве начальных параметров, затем прослеживается их судьба вплоть до достижения ими финальных значений. В результате в четырехмерном пространстве возникает область ЭУ-параметров. Разумеется, такая полная программа исследований требует больших затрат машинного времени.

Поэтому воспользуемся ниже укороченной схема расчетов. Считаем, что старт «второстепенных» параметров (d,c) производится с фиксированных низких значений, например, с 2, а старт начальных «первостепенных» параметров (a,b) происходит из узлов решетки [4,24]´[4,10] с шагом 2. Далее прослеживается микроэволюция всех четырех параметров. Приведем основные результаты расчетов.

Синхронное поведение факторов. Формально это равносильно тому, чтобы положить в динамике факторов (5) сдвиг $\varphi = 0$. Оказалось, что все ЭУ-параметры (a,b) располагаются на возрастающем отрезке (см. рис. 3), соединяющем точки

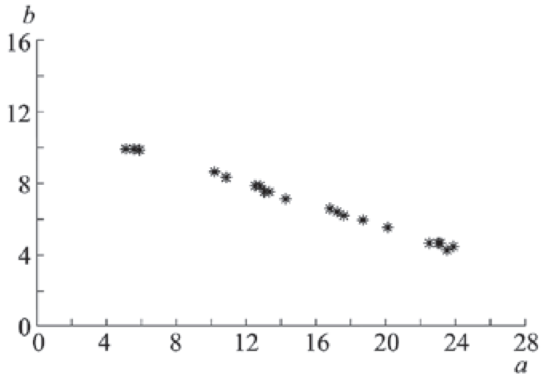


Рис. 4. ЭУ-параметры (a,b) при строго асинхронном изменении температуры и солености. Структура типа «убывающий отрезок».

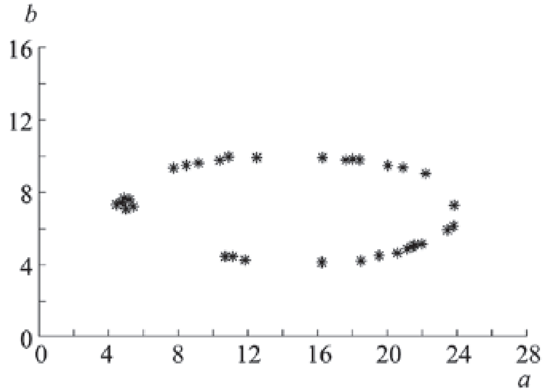


Рис. 5. ЭУ-параметры (a,b) при «ортогональном» изменении температуры и солености. Структура типа «овал».

(4,4) и (24,10). При этом финальные параметры d и c оказались близки к единице.

Строго асинхронное поведение факторов. Здесь в динамике температуры и солености (5) полагаем $\varphi = \pi$. В этом случае ЭУ-параметры образуют убывающий отрезок (см. рис. 4) с вершинами (4,10) и (24,4).

«Ортогональное» поведение факторов. Полагаем $\varphi = \pi/2$ – это промежуточный вариант в свете предыдущих экспериментов. Так, на одних временных отрезках данные факторы ведут себя синхронно, а на других – асинхронно. Поэтому неясно, как будет здесь располагаться множество ЭУ-параметров. Оказалось, что здесь ЭУ-параметры лежат на некотором овале, вписанном в дискретную решетку начальных значений (см. рис. 5). Вероятно, ЭУ-параметры не заполняют сплошь указанные одномерные структуры на рис. 3–5. Грубо говоря, появление «дыр» неизбежно!

Любопытно, что при $\varphi = 0$ и $\varphi = \pi$ множества ЭУ-параметров являются линейными структурами – отрезками. Кажется «вполне естественным»: при $\varphi = \pi/2$ множество ЭУ-параметров является «полусуммой» антисимметричных отрезков BO и $УO$. Возникает парадоксальная ситуация: итог может зависеть от способа усреднения – по вертикали или по горизонтали. Поэтому «естественный» подход приводит к разным построениям и не годится. Теперь не удивительно, что компромиссом оказывается нелинейный объект (овал).

Обсудим данные результаты с точки зрения непрерывной деформации угла φ на участке $I = [0,\pi]$. Путем дополнительных расчетов установлено, что множество ЭУ-параметров подвергается двум «испытаниям»: при росте φ от 0 до $\pi/2$ происходит постепенное «раздувание» отрезка BO в овал, а при увеличении φ до π овал медленно сплющивается в отрезок $УO$. В целом данные процессы сопровождаются медленным поворотом (против часовой стрелки) областей ЭУ-параметров.

Представляет интерес аналогичный поиск ЭУ-параметров, когда скорость роста водорослей задается иным образом. Так, весьма популярно следующее задание этой функции (принцип узкого места):

$$\Omega(\theta,S,a,d,b,c) = \min\{R(\theta,a,d)\ \rho(S,b,c)\}.$$

Расчеты показали, что теперь семейство ЭУ-параметров (a,b) похоже на предыдущее, но является куда более «тощим». Так, при синхронном изменении температуры и солености остаются лишь две окрестности точек – (4,4) и (24,10). При асинхронном поведении указанных факторов остаются три окрестности: (4,10), (14,7) и (24,4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе идей эволюционного моделирования предложены новые быстродействующие схемы адаптации параметров популяций. Показано, что эволюционно-устойчивые параметры роста водорослей составляют «тощее» множество, а его геометрическое расположение тесно связано с критическими точками (значениями минимумов и максимумов) динамики факторов среды.

Разумеется, возможна и целесообразна экспериментальная проверка полученных результатов. Так, в проточном культиваторе можно искусственно поддерживать постоянное содержание биогенных веществ и задавать определенный периодический температурный режим. Далее, в этот аквариум можно засеять тот или иной вид водорослей и после длительных наблюдений оценить итоговые интервалы температурной толерантности.

Обнаружено, что в процессе адаптации водорослей существенную роль играет взаимное поведение факторов среды. Здесь могут возникать как линейные (отрезки), так и нелинейные (овалы) геометрические области ЭУ-параметров.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Публикация подготовлена в рамках реализации Государственного задания ЮНЦ РАН (проект АААА–А18–118122790121-5).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая работа не содержит описания исследований с использованием людей и животных в качестве объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. М. Бронфман и Е. П. Хлебников, *Азовское море. Основы реконструкции* (Гидрометеоиздат, Л., 1985).
2. Г. Ю. Ризниченко и А. Б. Рубин, *Биофизическая динамика продукционных процессов* (ИКИ, Ижевск, 2004).
3. А. Б. Медвинский, С. Е. Петровский, И. А. Тихонова и др., Успехи физ. наук 172 (1), 31 (2002).
4. V. A. Kostitzin, *Symbios, parazitisme of evolution* (Hermann, Paris, 1934).
5. В. Вольтерра, *Математическая теория борьбы за существование* (Наука, М., 1976).
6. J. B. S. Holdane, *The Causes of Evolution* (Longmans, Lond., 1932).
7. R. A. Fisher, *The genetical theory of natural selection* (Clarendon Press, Oxford, 1930).
8. В. Г. Ильичев, *Устойчивость, адаптация и управление в экологических системах* (Физматлит, М., 2009).
9. В. Б. Вербицкий, Дис. ... д-ра биол. наук (Институт биологии внутренних вод, Борок, 2012).
10. Н. Н. Яковлев, *Живое и среда* (Наука, Л., 1986).
11. Th. Dobzhansky, *Genetics of the Evolutionary Process* (Columbia Univ. Press, N.Y., 1970).
12. В. Г. Ильичев и О. А. Ильичева, Биофизика **63** (2), 373 (2018).
13. Ю. М. Свирежев и В. П. Пасеков, *Основы математической генетики* (Наука, М., 1982).
14. J. M. Smith, *Evolution and the theory of games* (Cambridge Univ. Press, N.Y., 1982).
15. Э. Пианка, *Эволюционная экология* (Мир, М., 1981).
16. Ю. Н. Сергеев, А. А. Колодочка, Х. Д. *Круммель и др., Моделирование процессов переноса и трансформации вещества в море* (ЛГУ, Л., 1979).
17. B. E. Contois, J. Gen. Microbiol. 21, 40 (1959).
18. Ю. В. Тютюнов и Л. И. Титова, Журн. общ. биологии **79** (6), 448 (2018).
19. W. C. Alle, A. E. Emerson, D. Park, and K. Smith, *Principies of Animalls Ecology* (W. B. Saunders Co, Philadelphia, 1949).
20. В. Г. Ильичев, Л. В. Дашкевич и В. В. Кулыгин, Природа, № 8, 54 (2019).
21. В. Г. Ильичев, Автоматика и телемеханика, № 11, 115 (1996).
22. В. Г. Ильичев, Биофизика **50** (3), 567 (2005).
23. В. Г. Ильичев, В. В. Кулыгин и Л. В. Дашкевич, Компьютерные исследования и моделирование **9** (6), 981 (2017).

Hypotheses Concerning Algal Adaptation to Periodic Environmental Factors

V.G. Ilyichev* and O.A. Ilyicheva**

**Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, ul. Chekhova 41, Rostov-on-Don, 344006 Russia*

***Don State Technical University, ul. Socialisticheskaya 162, Rostov-on-Don, 344022 Russia*

A new ecological-evolutionary model of small-sized algae has been proposed to describe the simultaneous dynamics of variables (population biomass) and parameters representing temperature tolerance limits $[a - d, a + d]$. In the given periodic temperature regime, the parameters tend to some final, so-called evolutionarily stable values. Calculation results showed that on the plane (a,d) all evolutionarily stable parameters are located in the form of a “rainbow”, the farthest points of which correspond to cold-loving (diatomic) and heat-loving (blue-green) algae. Analysis of data relating to algal adaptation to two periodic environmental factors (temperature and salinity) within given ranges of temperature $[a - d, a + d]$ and salinity $[b - c, b + c]$ tolerance is performed. It has been established that the domain of evolutionarily stable parameters in the plane (a,b) depends on the degree of synchronism of environmental factors. In some cases, these parameters lie on a linear segment, and in other cases, their unexpected location on a nonlinear oval is possible.

Keywords: model, adaptation, evolutionarily stable parameters, temperature, salinity

УДК 577.38:574.34

ОПРАВДАЛСЯ ЛИ ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ РИСКА ВЫМИРАНИЯ АЗОВСКОГО СУДАКА? [1]

© 2020 г. Ю.В. Тютюнов*, **, И.Н. Сенина***, Л.И. Титова**, Л.В. Дашкевич*

*Федеральный исследовательский центр «Южный научный центр Российской академии наук», 344006, Ростов-на-Дону, просп. Чехова, 41

**Южный федеральный университет, 344090, Ростов-на-Дону, просп. Стачки, 200/1

***Collecte Localisation Satellites, rue Hermes 8-10, Ramonville Saint-Agne, 31520 France

E-mail: yuri.tyutyunov@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.08.2019 г.
После доработки 19.11.2019 г.
Принята к публикации 24.12.2019 г.

В конце 1990-х годов на основе стохастических экспериментов, проведенных с моделью долгосрочного прогноза популяционной динамики азовского судака, идентифицированной по данным наблюдений 1950–1981 гг. за запасом, выловами, температурой и соленостью Азовского моря, был сделан вывод о высокой вероятности квазивымирания популяции азовского судака в течение 35 лет, с 1982 по 2016 гг., обусловленного повышением солености моря. Данный вероятностный прогноз подтвердился — событие риска произошло в 2000-х годах: с 2005 г. численность взрослых особей судака не превышала 4 млн штук, а с 2017 г. введен полный запрет на вылов этого вида. Валидация результатов работы модели, проведенная в настоящее время, выявила достаточно хорошее (качественное и количественное) соответствие модельной траектории данным наблюдений за 1982–2018 гг. При этом обнаружено, что в современный период негативное воздействие, оказываемое на динамику численности стада повышением среднегодовых значений температуры моря, является не менее значительным, чем влияние роста солености. В соответствии с краткосрочным модельным прогнозом на 2019–2020 гг., в сложившихся условиях значительных положительных аномалий температуры и солености, введенный в 2017 г. запрет промысла не позволяет остановить снижение запаса азовского судака в ближайшие годы.

Ключевые слова: Азовское море, популяционная динамика, Sander Lucioperca L., стохастическая модель, метод Монте-Карло, риск квазивымирания.

DOI: 10.31857/S0006302920020234

В конце 1990-х годов нами была построена имитационная модель динамики эксплуатируемой рыбной популяции, использованная для проведения стохастических экспериментов в целях долгосрочного прогноза изменений численности и оценки риска квазивымирания популяции азовского судака (*Sander lucioperca* L.) [1, 2]. Выбор судака в качестве модельного объекта обуславливался тем, что это один из ценных видов, запасы и уловы которого значительно снизились после зарегулирования в 1950-х годах Дона, крупнейшей реки бассейна Азовского моря. Наблюдающееся с 1960-х годов падение численности популяции судака является типичным последствием широкомасштабного антропогенного преобразования экосистемы Азовского моря — сходные проблемы имеют место и для других аборигенных полупроходных видов. Дальнейшее ухудшение условий воспроизводства полупроходных рыб произошло после зарегулирования Кубани в 1972 г. Уменьшение пресного стока, увеличение затока (объема) черноморских вод и рост солености Азовского моря привели к существенному сокращению нерестовых и нагульных ареалов судака, леща, тарани, рыбца, чехони [3, 4].

Модель имела достаточно простую структуру и работала с годовым шагом по времени, описывая влияние на воспроизводство стада таких факторов среды, как температура и соленость Азовского моря. Основной задачей данного исследования являлось обоснование возможных ограничений промыслового изъятия, потенциально способных предотвратить чрезмерное падение запасов азовского судака, обусловленное продолжающимся осолонением моря. Кроме того, ихтиологов интересовал вопрос, насколько опасным для популяции является непреднамеренный прилов годовиков, обусловленный недостаточной селективностью сетей. Параметры модели были

[1] **Оригинальный текст:** *Тютюнов Ю.В., Сенина И.Н., Титова Л.И., Дашкевич Л.В.* Оправдался ли долгосрочный прогноз риска вымирания азовского судака? // Биофизика. 2020 Т. 65. № 2. С. 390–401.

идентифицированы с использованием предоставленных Азовским НИИ рыбного хозяйства данных, образующих временные ряды, характеризующие динамику моделируемой экологической системы с 1950 по 1981 гг. (т. е. 32 осредненные по годовому периоду записи). Ряды включали оценки численностей сеголеток, годовиков и взрослых особей судака, среднегодовые показатели солености и температуры Азовского моря. С идентифицированной моделью проводили имитационные эксперименты по методу Монте-Карло, в которых для сгенерированных случайных значений температуры и солености моря был рассчитан прогноз динамики численностей возрастных групп судака на 35 лет вперед, т. е. с 1982 по 2016 гг. Пучки траекторий, полученные таким образом для различных стратегий промыслового изъятия, использовались для оценки ожидаемых уловов, размеров стада, а также вероятностей события квазивымирания (*quasi-extinction*) популяции [5, 6]. На основе проведенных экспериментов с критическим уровнем квазивымирания, равным 4.8 млн взрослых особей, что соответствует 10% от максимального значения в ряду ихтиологических оценок запаса, нами был сделан достаточно пессимистично звучащий вывод о высокой вероятности коллапса популяции азовского судака в течение 35 лет, с 1982 по 2016 гг. [1, 2]. А именно, согласно модельным расчетам, даже при гипотетическом прекращении промысла риск квазивымирания популяции превышал 70%. При ежегодном промысловом изъятии третьей части взрослых особей прогнозируемый риск квазивымирания азовского судака составлял 86%.

Целью настоящей работы является ретроспективная валидация корректности данного вероятностного прогноза долгосрочной динамики популяции судака Азовского моря с использованием данных наблюдений за 1982–2018 гг. Статья организована следующим образом. Вначале дано краткое описание математической модели и использованных для ее идентификации исходных данных, представлены значения идентифицированных параметров, а также ранее полученные на основе этой модели результаты стохастических экспериментов. Затем приведены и обсуждены результаты валидации модели по данным наблюдений за запасами популяции судака и значениями учитываемых в модели абиотических факторов. В частности, показано, что падение численности популяции азовского судака, имевшее место в начале 2000-х годов, не может быть объяснено осолонением Азовского моря. Проверка гипотезы о критическом влиянии на воспроизводство судака климатических изменений (роста среднегодовой температуры моря) потребовала проведения дополнительных имитационных экспериментов с моделью. В заключительной части статьи обсуждаются достоинства и недостатки использованного подхода, а также предлагается минимальная версия математической модели, корректно отражающая влияние внешних факторов на воспроизводство и выживаемость азовского судака и наилучшим образом объясняющая вариации численности стада.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗА

Модель представляет собой систему разностных уравнений, описывающую динамику трех возрастных групп: сеголеток (N_0^t, годовиков N_1^t и взрослых особей, достигших возраста в два года и старше (N_2^t с годовым шагом $t = 0,1,2, \ldots$:

$$N_0^{t+1} = \left(a_1 N_1^t + a_2 N_2^t\right) e^{-b\left(N_1^t + N_2^t\right)} e^{-\left(\frac{S^{t+1}-S_0}{\sigma_S}\right)^2} e^{-\left(\frac{T^{t+1}-T_0}{\sigma_T}\right)^2}, \quad (1)$$

$$N_1^{t+1} = p_0 N_0^t \left(1 - h_1^{t+1}\right), \quad (2)$$

$$N_2^{t+1} = \left(p_1 N_1^t + p_2 N_2^t\right)\left(1 - h_2^{t+1}\right), \quad (3)$$

где p_i – доля выживших в течение временного шага особей i-й возрастной группы ($t = 0,1,2$), а h_i^{t+1} – доля вылавливаемых в течение временного шага (t, $t + 1$) особей каждой возрастной группы. Выжившие в течение года сеголетки переходят в возрастной класс годовиков, а выжившие годовики пополняют класс взрослых особей популяции. Суммарный улов, полученный в течение года t, вычисляется как

$$C^t = w_1 h_1^t p_0 N_0^{t-1} + w_2 h_2^t \left(p_1 N_1^{t-1} + p_2 N_2^{t-1}\right),$$

где w_1 и w_2 – средние индивидуальные веса годовика и взрослой особи судака соответственно.

Как видно из уравнения (1), воспроизводство описывается модифицированной функцией Риккера [7]. Параметры a_1 и a_2 – соответственно коэффициенты плодовитости годовиков и взрослых особей; b – коэффициент внутривидовой конкуренции. В соответствии с законом толерантности Шелфорда [8–10] влияние на выживаемость мальков случайных факторов среды – среднегодовых значений солености и температуры моря – учтено в уравнении (1) в виде множителей, имеющих вид функции распределения Гаусса, где S_0 и T_0 – оптимальные значения факторов, а σ_S и σ_T характеризуют толерантность вида к флуктуациям соответствующих характеристик среды [1]. Этот подход был нами ранее успешно использован при моделировании воспроизводства конкурирующих пелагических видов – азовской тюльки и азово-черноморской хамсы [11].

Идентифицированные параметры. Простота структуры и небольшое количество параметров

Таблица 1. Идентифицированные значения параметров модели (1)–(3)

Параметр	Регрессионные оценки	Результаты бутстрэппинга, $m \pm \sigma$
Плодовитость годовиков (a_1)	6.82	6.99 ± 4.53
Плодовитость взрослых (a_2)	12.67	14.35 ± 4.99
Внутривидовая конкуренция (b)	0.039	0.041 ± 0.01
Выживаемость сеголеток (p_0)	0.54	0.48 ± 0.08
Выживаемость годовиков (p_1)	0.47	0.52 ± 0.09
Выживаемость взрослых (p_2)	0.62	
Толерантность к солености (σ_S)	1.26	1.27 ± 0.19
Толерантность к температуре (σ_T)	1.92	1.91 ± 0.27
Оптимальная соленость (S_0)	11.0	
Оптимальная температура (T_0)	10.0	

обеспечили приемлемую точность идентификации модели на основе имевшихся на момент ее создания данных наблюдений за период 1950–1981 гг. (начальный год $t = 0$ в расчетах соответствовал 1949 г.). На этапе идентификации использовали численности возрастных групп, величины уловов, а также среднегодовые значения определяющих успех воспроизводства судака внешних факторов – солености и температуры моря. Коэффициент выживаемости взрослых особей p_2 и оптимальные значения внешних факторов S_0 и T_0 (обеспечивающие наилучшие условия для воспроизводства) взяты из ихтиологических исследований [12–14]. Остальные параметры модели были идентифицированы путем приближения модельной траектории к наблюденным значениям численностей возрастных групп (табл. 1). Ошибки полученных значений модельных параметров были оценены с использованием процедуры бутстрэппинга (*residual bootstrap*), описанной в работе [15]. Детали идентификации представлены в работе [2].

Стохастические имитационные эксперименты. На следующем этапе идентифицированная модель была использована для проведения серии стохастических имитационных экспериментов по методу Монте-Карло на 35-летний период (с 1982 по 2016 гг.). Случайные значения временных рядов солености моря для этих экспериментов вычислялись на основе имитационного алгоритма, предложенного в работах [16, 17]. Входные ряды температурных данных генерировались методом рандомизации значений температуры моря, которые наблюдались в течение 1950–1981 гг. С этими случайными факторами и для различных комбинаций параметров h_i, характеризующих годовое промысловое изъятие годовиков и взрослых особей судака, были рассчитаны пучки 50-ти независимых стохастических траекторий модельного прогноза на указанный период.

Затем результаты имитационных вычислений анализировали статистическими методами и интерпретировали в контексте задачи оптимизации экономического и экологического критериев: максимизации среднегодовых уловов и минимизации риска чрезмерного падения запаса судака – квазивымирания [5]. Критический порог квазивымирания популяции был принят равным 4.8 млн взрослых особей, что соответствует 10% от максимального значения в ряду ихтиологических оценок запаса. Оказалось, что ограничение промысла в модели не позволяет существенно снизить риск квазивымирания азовского судака [1, 2]. В соответствии с изоплетной диаграммой, приведенной на рис. 1, если при изъятии третьей части взрослых особей их численность в течение 35 лет снижается ниже критического уровня с вероятностью 86%, то полный запрет вылова уменьшает данный показатель риска лишь до 70%. При этом непреднамеренный прилов годовиков оказался не так опасен для популяции, как чрезмерный вылов взрослых особей. Причиной прогнозируемого коллапса популяции в имитационных расчетах являлось увеличение солености моря, предсказываемое статистической регрессионной моделью Бронфмана и Суркова [16], которую использовали для генерации рядов случайных значений $\{S^t\}$ в экспериментах Монте-Карло.

Сегодня можно констатировать, что данный нами вероятностный прогноз, к сожалению, оправдался – событие риска произошло в середине 2000-х годов, с 2005 г. оценка численности взрослых особей судака не превышала 4 млн штук [18]. Более того, запрет промысла азовского судака, который в конце 1990-х годов рассматривался лишь как гипотетический сценарий имитационного эксперимента, сегодня также стал реально-

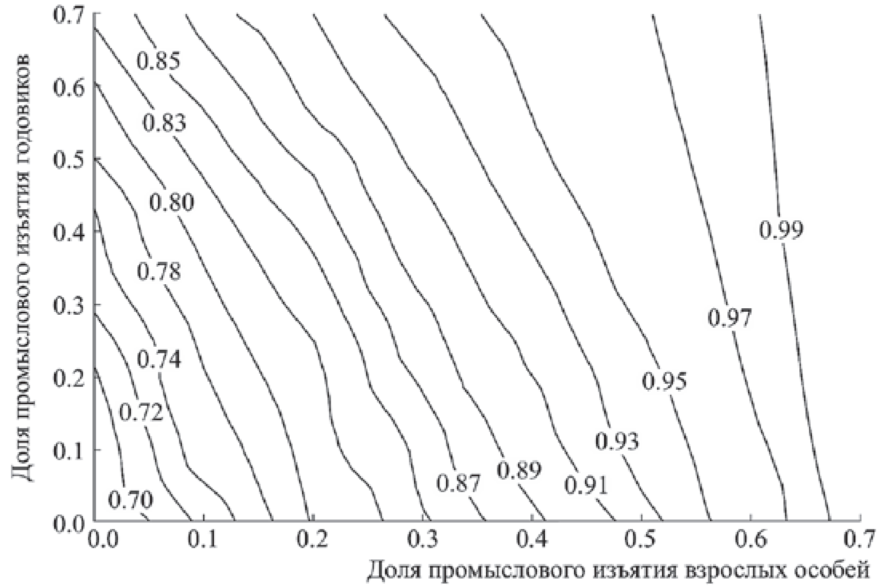


Рис. 1. Изоплетная диаграмма риска квазивымирания популяции (вероятности падения численности взрослых особей ниже заданного критического уровня) с 1982 по 2016 гг. как функции коэффициентов промыслового изъятия годовиков и взрослых.

стью – с 2017 года правилами рыболовства для Азово-Черноморского рыбохозяйственного бассейна введен полный запрет вылова этого вида [19, 20]. Изъятие азовского судака допускается только для целей воспроизводства и/или научно-исследовательских работ по заявкам воспроизводственных и научных организаций. Аналогичный запрет введен для берша и чехони [19, 20].

Заметим, что модель использовали не для расчета одной единственной траектории, которая едва ли была полезной для долгосрочного прогноза популяционной динамики, определяемой внешними факторами, имеющими существенную случайную составляющую. Целью исследования был именно вероятностный прогноз: при различных промысловых нагрузках, на основе достаточно большого количества стохастических экспериментов с идентифицированной моделью оценивали риски такого нежелательного события, как падение численности взрослых особей судака ниже установленного критического уровня квазивымирания.

Валидация модели и краткосрочный прогноз. Спустя двадцать лет после проведения описанных выше имитационных экспериментов у нас появилась возможность валидации работы модели (1)–(3) с ранее идентифицированными параметрами путем расчета динамики численности возрастных групп азовского судака для фактических (а не разыгрываемых моделью) значений внешних факторов в период с 1982 по 2018 гг. и сопоставления данного модельного прогноза с обновленными данными о многолетней динамике популяционных запасов азовского судака. Нами использованы материалы опубликованных результатов ихтиологических исследований [18, 21–30], а также Протоколов XIX–XXX сессий Российско-Украинской Комиссии (РУК) по вопросам рыболовства в Азовском море [19, 20, 31–36].

На вход модели (1)–(3) подавали временные ряды фактических среднегодовых значений солености и температуры Азовского моря с 1982 по 2018 гг. [37]. При этом среднюю годовую температуру воды для моря в целом рассчитывали согласно работе [38]. Наборы срочных данных наблюдений (температуры воды) гидрометеорологических станций были усреднены посуточно, помесячно и далее до среднегодовых значений. Среднегодовая соленость моря была рассчитана на основе данных экспедиционных наблюдений в открытом море и данных прибрежных гидрометеорологических станций согласно методике, подробно описанной в работе [39].

Поскольку для 2019–2020 гг. данных фактических измерений температуры воды и солености пока нет, для последних двух лет периода прогноза были использованы значения, полученные с помощью боксовой гидродинамической модели Бердникова [40], включающей модули расчета температурного и ледового режимов, балансовый модуль водного обмена и режима солености. Модельные значения солености на 2019 и 2020 гг. равны 11.78 и 11.71‰, а температуры – 12.61 и 12.55°C соответственно.

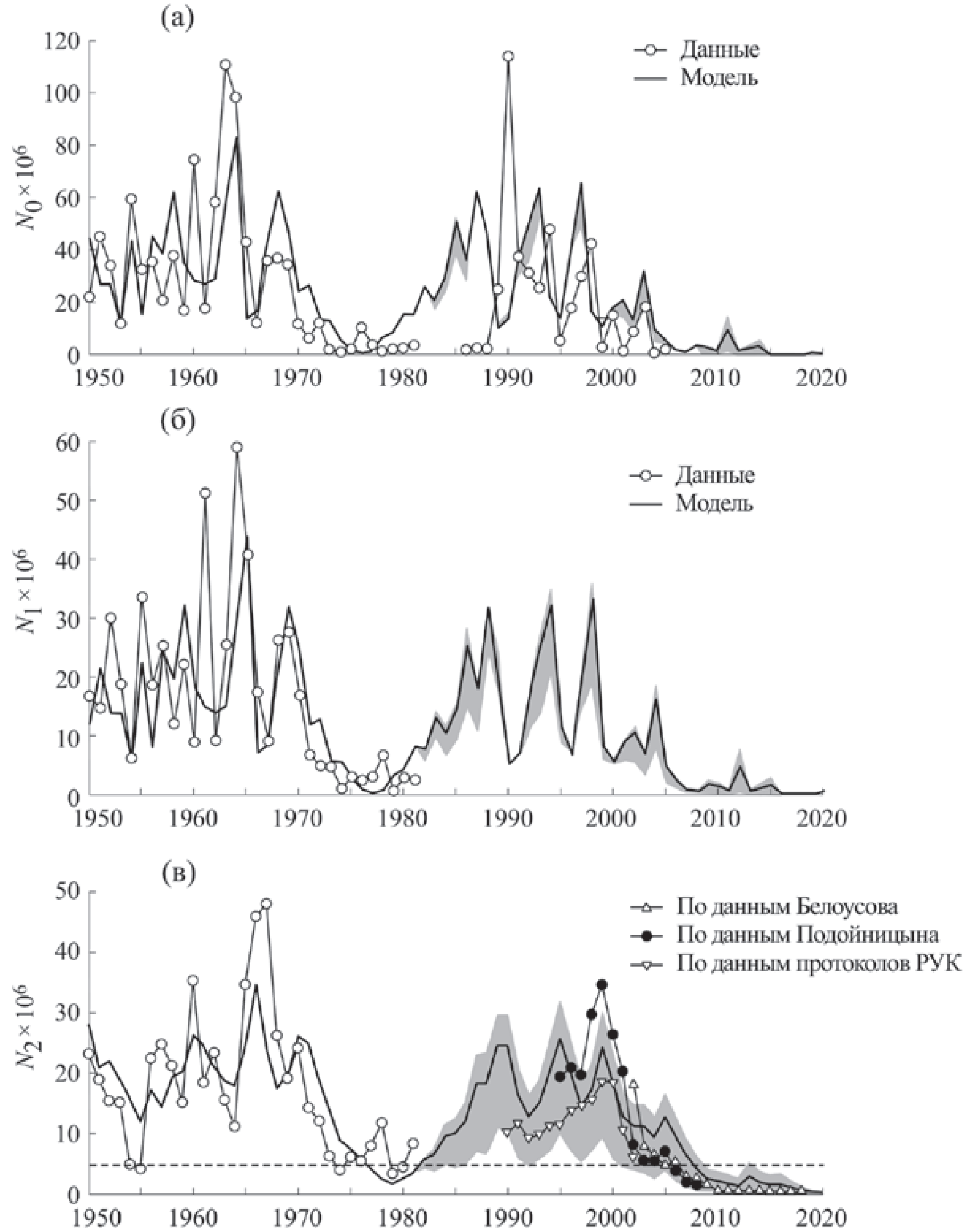


Рис. 2. Модельная и наблюдаемая динамика численности сеголеток (а), годовиков (б) и взрослых особей (в) азовского судака (млн шт.): 1950–1981 гг. – идентификация; с 1982 г. – валидация модели с коэффициентом изъятия $h = 0.07$ в 1982–2016 гг. и запретом промысла с 2017 г. Серым цветом показан разброс прогнозируемых численностей возрастных групп, соответствующий интервалу значений коэффициента промысла $0 \leqslant h \leqslant 0.3$. Пунктиром показан уровень квазивымирания.

На рис. 2 представлены результаты расчетов, при проведении которых предполагалось, что до введения запрета на промысел судака в 2017 г., с 1982 по 2016 гг. ежегодно вылавливается 7% годовиков и взрослых особей, что равно среднему значению коэффициента промыслового изъятия в 1950–1981 гг. Заметим, что значения коэффициента промыслового изъятия в указанные годы вычисляли на основе официальной статистики выловов. Однако фактический промысел мог быть значительно выше официального [18, 23, 24]. По мнению ихтиологов объем незаконного (соответственно, неучтенного) вылова азовского судака всегда был существенным и сопоставимым с легальным промыслом, а после распада СССР доля браконьерского изъятия значительно увеличилась [18, 23, 24, 28]. При идентификации модели неучтенная промысловая смертность автоматически компенсировалась значениями других параметров, прежде всего значениями коэффициентов выживаемости p_i, что обеспечило хорошее приближение модельной траектории к использованным при идентификации модели оценкам численности возрастных групп судака (см. идентификационный участок траектории на рис. 2, соответствующий периоду с 1950 по 1981 гг.). При отсутствии достоверной статистики реального промысла в период валидации модели представляет интерес оценка чувствительности модели к вариациям параметра промыслового изъятия h. Для этого наряду с модельной траекторией, полученной при фиксированном коэффициенте изъятия $h = 0.07$, на рис. 2 представлены результаты дополнительных вычислительных экспериментов в виде коридора значений переменных модели при варьировании коэффициента изъятия в широких пределах ($h \in [0.0, 0.3]$).

Выполненные вычисления показывают достаточно хорошее соответствие модельных траекторий данным наблюдений в 1982–2018 гг. [18, 21–30, 41]. Наибольшее отклонение наблюдается в 1990 г. для численности сеголеток. Однако именно в этом году ихтиологами отмечалась аномально высокая выживаемость сеголеток азовского судака в летний период, которую они объясняли снижением количества тюльки, в свою очередь обусловленным вселением в Азовское море гребневика *Mnemiopsis leidyi* [21, 42]. В результате в июле 1990 г. выживших сеголеток судака оставалось больше 100 млн шт., что в четыре-пять раз превышало их количество в предыдущие годы. Однако уже в сентябре-октябре численность сеголеток упала до 10 млн шт. [21, 42], что вполне соответствует прогнозу нашей модели, которая не включает в себя описание межвидовых отношений и, работая с годовым шагом, не предназначена для предсказания подобных краткосрочных аномалий. Вот что пишет об этих наблюдениях Л.В. Кукарина: «Выживание сеголеток за период «лето–осень» в 1989–1994 гг. составляло 2–25% их численности в июле. Высокий процент гибели подросших сеголеток в сложившихся условиях был обусловлен развитием у судака внутривидовой пищевой конкуренции на акватории Таганрогского залива. Доля молоди собственного вида в питании увеличилась с 0.2–0.4% до 4–6% в начале 1990-х годов» [42].

Модельные расчеты корректно отображают наметившееся в период 1982–2000 гг. восстановление популяции судака, обусловленное наблюдавшимся в данный период опреснением Азовского моря, однако с начала 2000-х годов начинается новая фаза снижения численностей всех трех возрастных групп. Падение запасов в этот период на первый взгляд выглядит неожиданным, поскольку в эти годы соленость не являлась лимитирующим фактором для популяции судака [18] (соленость моря резко повышается лишь после 2010 г., см. график на рис. 3).

Простота имитационной модели (1)–(3), которая учитывает минимальное количество внешних факторов, оказывающих влияние на популяционную динамику, позволяет предположить, что отмеченное снижение численности судака может быть вызвано изменениями температуры моря. Действительно, на графике среднегодовых значений температуры в 1983–2018 гг., изображенном на рис. 3, хорошо виден восходящий тренд, который, по-видимому, связан с глобальными климатическими изменениями. Аномально высокие температуры в таком мелком водоеме, как Азовское море, являются причиной возникновения зон гипоксии, частота образования которых увеличилась в последнее десятилетие, в том числе, в восточной части моря и Таганрогском заливе [43, 44]. Формирование зон с дефицитом кислорода оказывает как прямое воздействие на выживаемость судака, особенно его молоди, так и опосредованное, вследствие подрыва кормовой базы вида.

Дополнительные эксперименты и минимальная модель. Преимуществом модели (1)–(3) является возможность учета эффекта воздействия температуры моря на выживаемость сеголеток при помощи всего лишь двух параметров: оптимального значения температуры T_0 и характеристики толерантности вида к отклонениям от этого значения σ_T. Чтобы проверить гипотезу о влиянии роста температуры на снижение запасов судака, был проведен дополнительный имитационный эксперимент, в котором использовали очищенный от линейного тренда температурный ряд (показан серым цветом на рис. 3). При этом целесообразно зафиксировать промысловое изъятие, поэтому, как и в предыдущем эксперименте, с 1982 г. были использованы усредненные коэффициенты промыслового изъятия $h_1 = h_2 = 0.07$, а с 2017 г. вылов в модели не осуществлялся. Результаты вычислений представлены на рис. 4.

Как можно видеть, устранение растущего тренда в динамике среднегодовой температуры позволяет восстановить численность взрослых особей до уровня, превышающего критический порог квазивымирания популяции в течение всего валидационного периода с 1982 по 2018 гг. Вместе с тем, согласно расчетам, даже устранение негативного воздействия температурного фактора и прекращение вылова в 2017 г. не позволяет переломить обусловленную аномально высокими значениями солености моря тенденцию к падению запаса судака, наблюдающуюся в модели после небольшого прироста численности взрослых особей в 2013 г. Так, в 2019 и 2020 гг. модель без температурного тренда также предсказывает па-

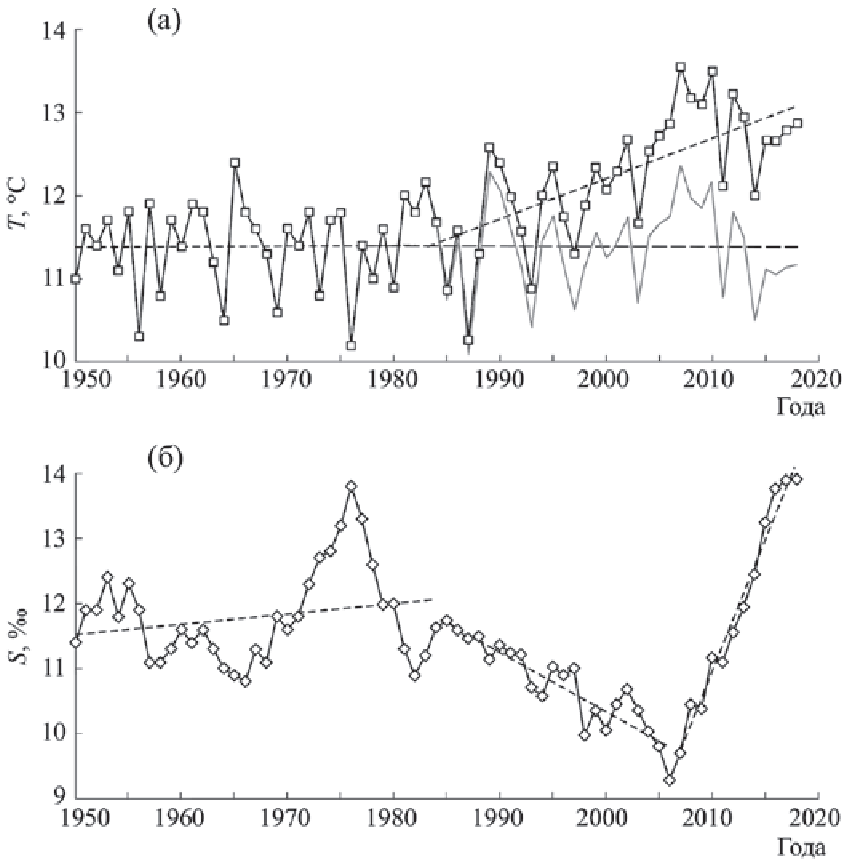


Рис. 3. Среднегодовые значения наблюдений температуры (а) и солености (б) Азовского моря в период 1950–2018 гг. Пунктирными линиями на графике температуры показаны многолетние тренды, соответствующие периодам 1950–1982 гг. ($y = 0.0007x + 11.38$) и 1983–2018 гг. ($y = 0.049x + 9.73$). Серым цветом показан ряд температур с нулевым трендом ($y = 11.38$). Для солености выделены три периода с диаметрально меняющимся трендом: 1950–1984 гг. ($y = 0.016x + 11.52$), 1985–2006 гг. ($y = –0.09x + 15$) и 2007–2018 гг. ($y = 0.4x – 13.7$).

дение численности половозрелого стада ниже порога квазивымирания, установленного при проведении стохастических экспериментов.

Еще одна гипотеза, которую мы проверили, связана со структурной устойчивостью модели (1)–(3) – свойством, характеризующим зависимость прогноза модели от изменения ее структуры. Нетрудно заметить (см. рис. 2), что временные ряды наблюденных значений сеголеток и годовиков обладают высокой степенью корреляции. Так, для смещенных на один год сеголеток N_0^{t+1} и годовиков N_1^t коэффициент корреляции $r = 0.96$. Фактически это означает, что использование данных по численности годовиков не добавляет информации о динамике популяции при минимизации целевой функции (суммы квадратов разностей натурных и модельных значений численностей возрастных групп). Следовательно, использование этого временного ряда не только усложняет модель, но и снижает точность оценки параметров, контролирующих влияние переменной N_1^t на динамику системы (1)–(3), то есть параметров a_1, b, p_0, h_0. Данное обстоятельство, в частности, объясняет довольно большую ошибку, полученную методом бутстрэппинга для параметра a_1 (см. табл. 1). Следовательно, мы можем упростить модель (1)–(3), опуская уравнение (2) без ущерба качеству модели в предсказании динамики популяции судака. Модель (1)–(3) при этом трансформируется в следующую минимальную модель с двумя переменными, N_0^t – численность сеголеток и N_1^t – численность взрослых особей старше одного года соответственно:

$$N_0^{t+1} = aN_1^t e^{-bN_1^t} e^{-\left(\frac{S^{t+1}-S_0}{\sigma_S}\right)^2} e^{-\left(\frac{T^{t+1}-T_0}{\sigma_T}\right)^2}, \qquad (4)$$

$$N_1^{t+1} = \left(p_0 N_0^t + p_1 N_1^t\right)\left(1 - h^{t+1}\right), \qquad (5)$$

где a – плодовитость, b – внутривидовая конкуренция, p_1 – выживаемость взрослых особей и h – промысловое усилие на взрослое стадо. Остальные параметры те же, что и в модели (1)–(3).

Рис. 4. Динамика численности взрослых особей азовского судака, рассчитанная по модели (1)–(3) с рядом наблюденных и очищенных от восходящего тренда температур в сравнении с ихтиологическими оценками размера промыслового стада.

Как видно, по сравнению с системой (1)–(3) модель (4)–(5) включает меньше параметров, при этом все они могут быть довольно точно оценены в результате минимизации целевой функции (см. табл. 2). В частности, значение параметра p_2 было зафиксировано в модели (1)–(3), теперь для коэффициента выживаемости взрослых особей старше одного года получена оценка с ошибкой 28% (см. табл. 2 и соответствующее ему p_1 в модели (4)–(5)), оцененной методом бутстрэппинга, который подробно описан в работе [2].

Как и ожидалось, и полная, и минимальная модель дают практически одинаковые приближения временных рядов численностей сеголеток и взрослых рыб старше одного года: минимальные значения целевых функций, включающих в себя эти переменные, равны 16608 и 16618 соответственно. При этом модель (1)–(3) объясняет 50 и 66% вариаций данных по численности сеголеток и взрослых соответственно, минимальная модель (4)–(5) – 52 и 66% соответственно. Предсказания модели (4)–(5) согласуются с результатами модели (1)–(3) как в период минимизации ошибки модельных предсказаний, т.е. 1950–1981 гг., так и в период валидации в 1982–2018 гг. (см. рис. 5). Как и для модели (1)–(3), для двух последних лет, соответствующих периоду краткосрочного прогноза на 2019 и 2020 гг., нами были использованы приведенные в предыдущем разделе значения солености и температуры, вычисленные с помощью внешней гидродинамической модели Бердникова [40].

Помимо результатов валидации и прогноза на 1982–2020 гг., рассчитанных по модели (4)–(5) со значением $h = 0.07$ (траектории черного цвета), на рис. 5 показан разброс прогнозируемых значений численностей возрастных групп азовского судака, соответствующий интервалу значений коэффициента промыслового изъятия $0 \leqslant h \leqslant 0.3$. Для сравнения и демонстрации структурной устойчивости модели тонкими линиями изображены траектории, соответствующие прогнозу полной модели (1)–(3). Также на рис. 5б показана динамика численности взрослых особей, рассчитанная по обеим моделям (4)–(5) и (1)–(3) (соответственно жирная и тонкая линии серого цвета) для очищенного от восходящего тренда ряда температур. Заметим, что увеличение суммарной численности годовиков и взрослых в 2020 г. в предполагаемом сценарии стабильного темпера-

Таблица 2. Идентифицированные значения параметров минимальной модели (4)–(5)

Параметр	Регрессионные оценки	Результаты бутстрэппинга, $m \pm \sigma$
Плодовитость (a)	9.49	10.79 ± 3.64
Внутривидовая конкуренция (b)	0.04	0.04 ± 0.009
Выживаемость сеголеток (p_0)	0.63	0.62 ± 0.14
Выживаемость взрослых (p_1)	0.49	0.48 ± 0.14
Толерантность к солености (σ_S)	1.27	1.22 ± 0.15
Толерантность к температуре (σ_T)	2.22	2.28 ± 0.35
Оптимальная соленость (S_0)	11.0	
Оптимальная температура (T_0)	10.0	

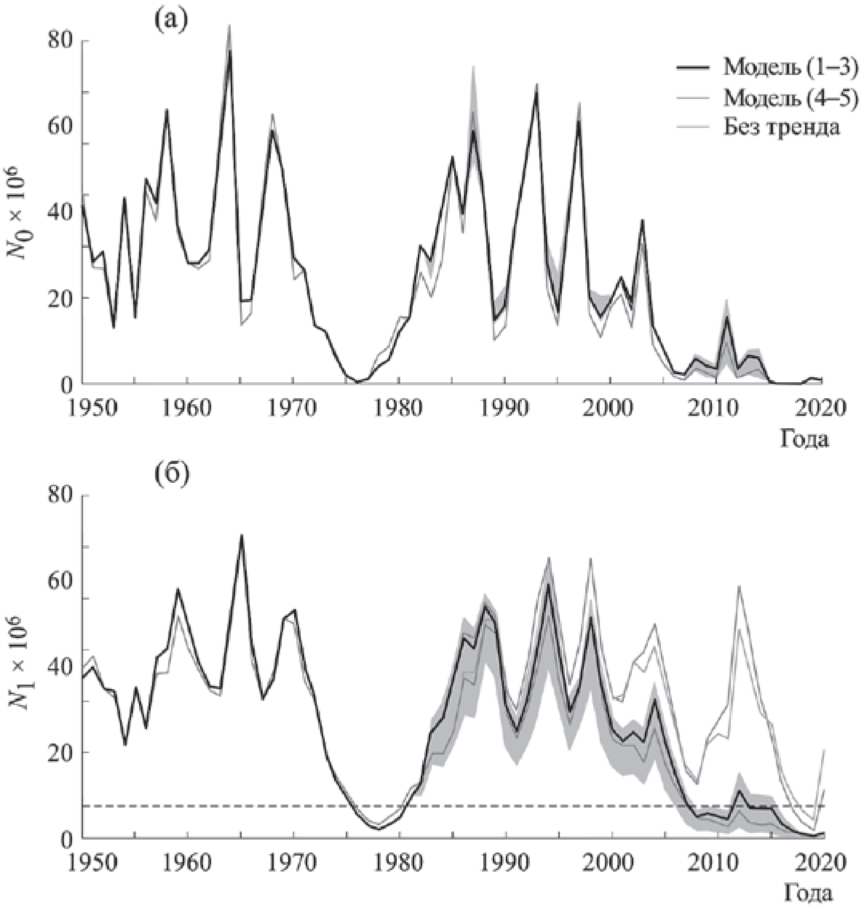


Рис. 5. Динамика численности сеголеток (а) и взрослых (б) особей судака Азовского моря в модельных экспериментах с коэффициентом изъятия $h = 0.07$ в 1982–2016 гг. и запретом промысла с 2017 г. На графике (б) дополнительно приведены траектории, рассчитанные с очищенным от восходящего тренда рядом температур. Серым цветом показан разброс прогнозируемых моделью (4-5) численностей возрастных групп, соответствующий интервалу значений коэффициента промысла $0 \leqslant h \leqslant 0.3$. На графике (б) дополнительно приведены траектории, рассчитанные по обеим моделям (1)–(3) и (4)–(5) с очищенным от восходящего тренда рядом температур.

турного режима обусловлено благоприятным для воспроизводства низким значением солености в краткосрочном прогнозе на 2019 г. (11.78‰), что наглядно демонстрирует высокую чувствительность судака к этому внешнему фактору. Пунктиром показан критический порог квазивымирания, составляющий 10% от максимальной численности взрослых особей в 1950–1981 гг., для модели (4)–(5) равный 7.5 млн шт. Так же как и полная модель (1)–(3), под влиянием наблюдаемых и прогнозных значений солености и температуры минимальная модель (4)–(5) предсказывает падение численности популяции судака значительно ниже критического уровня, при этом решающую роль в снижении запаса играет наблюдающийся с конца 1980-х годов рост среднегодовых температур Азовского моря.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты еще раз демонстрируют эффективность и применимость простых стохастических моделей для долгосрочного прогнозирования динамики промысловых рыбных популяций (см. также работы [2, 11, 45–51]).

Выполненное исследование позволяет сделать вывод о том, что причиной уменьшения запасов судака в последние десятилетия, наряду с ростом солености, может быть увеличение температуры моря. При этом эффект, в настоящее время оказываемый на динамику численности стада потеплением, может быть даже значительнее влияния роста солености моря.

Интересно, что до конца XX века в круг проблем, имеющих отношение к возможному падению запаса судака в Азовском море, включались прежде всего негативные последствия зарегулирования пресного стока. Эти последствия рассматривались в контексте антропогенных изменений экосистем Дона и Азовского моря, обусловленных строительством Цимлянского водохранилища [3, 4, 52, 53]. К ним, помимо осолонения моря и инвазии гребневика мнемиопсиса (*Mnemiopsis leidyi*) [54], относились перекрытие путей миграций и сокращение естественных нерестовых ареалов проходных и полупроходных видов промысловых рыб [4, 24]. Не меньшее внимание уделялось неконтролируемому, в частности, браконьерскому промыслу судака, проблемам перелова [4, 23] и непреднамеренного вылова годовиков [2]. В настоящее время запрет промысла рассматривается в качестве меры, способной остановить падение запасов данного вида [19, 20]. Оценивая потенциал восстановления популяции при полном запрете промысла судака, авторы работы [27] пришли к выводу, что кормовая база в Азовском море не является лимитирующим фактором, способствующим сокращению его запасов. Однако ретроспективный анализ воздействия среднегодовой температуры на динамику популяции азовского судака меняет оценку эффективности запрета промысла и перспектив восстановления промыслового стада. В этой связи следует заметить, что хотя воздействие температуры моря на воспроизводство и выживаемость судака признавалось важным, что и обусловило необходимостью ее включения в модель (1)–(3), данный фактор не рассматривался специалистами–ихтиологами в качестве критического, способного подорвать популяцию. Тем не менее модель (1)–(3) смогла достаточно корректно отразить негативные последствия роста температуры Азовского моря, наблюдающегося с конца 1980-х годов.

Дополнительные эксперименты с минимальной моделью (4)–(5) показали, что предложенный подход к моделированию динамики популяции судака Азовского моря устойчив по отношению к структурным изменениям модели. Это говорит о том, что информация о динамике и падении численности заложена в использованных при идентификации модели данных за 1950–1981 гг. При этом очевидно, что влияние факторов внешней среды, в особенности температуры, на прогнозируемые падения численности судака до уровня квазивымирания является, несомненно, решающим. Несмотря на то что точное значение параметра промысловой нагрузки не может быть определено, модельные расчеты с варьируемым в широких пределах коэффициентом изъятия $h \in [0.0, 0.3]$ показывают, что потенциал восстановления популяции от введенного в 2017 г. запрета на промысел азовского судака невелик, тем более что вплоть до недавнего времени имела место высокая, не соответствующая уровню воспроизводства, интенсивность как официального, так и браконьерского промысла судака [4, 18, 23, 24, 41]. Ситуация ухудшается такой отмеченной специалистами особенностью текущего состояния Азовского моря, как одновременные значительные положительные аномалии температуры и солености вод, которые ранее не наблюдались в истории изучения данного водоема [37].

Таким образом, мы можем сделать еще одно заключение на основании проведенного исследования. Оно заключается в том, что даже те «пессимистические» оценки риска квазивымирания судака, которые были получены нами двадцать лет назад [1, 2], следует считать заниженными. Это объясняется тем, что псевдослучайные значения среднегодовых температур, которые были использованы в имитационной модели (1)–(3) при проведении экспериментов Монте-Карло, генерировались на основе ранее наблюдаемых данных и потому не могли содержать экстремально высоких значений, характерных для сегодняшнего периода.

ВЫВОДЫ

Выполненное исследование позволяет сделать следующие общие выводы:

1) выявлено достаточно хорошее качественное и количественное соответствие прогноза модели реальной динамике численности возрастных групп азовского судака;

2) наблюдающееся с начала 2000-х годов устойчивое снижение полученных ихтиологами оценок численности популяции, которое явилось основанием введения полного запрета промысла азовского судака, подтверждает правильность сделанного двадцать лет назад долгосрочного вероятностного прогноза квазивымирания популяции;

3) в течение последнего десятилетия, помимо осолонения, негативное воздействие на воспроизводство судака оказывает наблюдаемый рост среднегодовой температуры Азовского моря;

4) модельные эксперименты показывают, что в сложившихся условиях значительных положительных аномалий температуры и солености, введенный в 2017 г. запрет промысла обладает ограниченным потенциалом восстановления запаса судака.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Публикация подготовлена в ходе реализации ГЗ ЮНЦ РАН, тема «Разработка методов геоинформационного моделирования морских и наземных экосистем», № госрегистрации проекта 01201363188 (Тютюнов, Дашкевич); базовой части ГЗ ЮФУ, тема «Фундаментальные и прикладные задачи математического моделирования», № 1.5169.2017/8.9 (Титова); проекта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-01-00453а «Мультистабильные пространственно-

временные сценарии в популяционных системах» (Тютюнов).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая работа не содержит описания каких-либо исследований с использованием людей и животных в качестве объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ю. В. Тютюнов, И. Н. Сенина и Л. И. Титова, в кн. *Компьютерное моделирование. Экология: учебное пособие*, под ред. Г. А. Угольницкого (Вузовская книга, М., 2000), сс. 58–78.
2. Yu. Tyutyunov, I. Senina, C. Jost, and R. Arditi, Ecol. Modelling **149**, 297 (2002).
3. В. В. Дроздов, Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета **15**, 155 (2010).
4. П. А. Балыкин, Д. Н. Куцын и А. М. Орлов, Океанология **59** (3), 396 (2019).
5. L. R. Ginzburg, L. B. Slobodkin, K. Jonson, and A. G. Bindman, Risk Analysis **2**, 171 (1982).
6. H. R. Akçakaya and L. R. Ginzburg, in *Species conservation: a population biological approach*, Ed. by A. Seitz and V. Loeschke (Birkhäuser Verlag, Basel, 1991), pp. 78–87.
7. W. E. Ricker, J. Fish. Res. Board of Canada **11**, 559 (1954).
8. V. E. Shelford, *Animal communities in temperate America: as illustrated in the Chicago region: a study in animal ecology (No. 5)* (University of Chicago Press, Chicago, Illinois, 1913).
9. Э. Пианка, *Эволюционная экология* (Мир, М., 1981).
10. В. Г. Ильичев, *Устойчивость, адаптация и управление в экологических системах* (Физматлит, М., 2009).
11. I. Senina, Yu. Tyutyunov, R. Arditi, J. Appl. Ecol. **36**, 297 (1999).
12. Н. П. Гоптарев, А. И. Симонов, Б. М. Затучная и Д. Е. Гершанович, *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР*. Т. 5. *Азовское море* (Гидрометеоиздат, Санкт-Петербург, 1991).
13. А. М. Бронфман, С. П. Воловик, С. В. Козлитина и др., *Статистическая структура океанологических и биологических параметров экосистемы Азовского моря* (Изд-во Рост. ун-та, Ростов-на-Дону, 1979).
14. А. М. Бронфман, В. Г. Дубинина и Г. Д. Макарова, *Гидрологические и гидрохимические основы продуктивности Азовского моря* (Пищевая промышленность, М., 1979).
15. B. Efron and R. J. Tibshirani, *An introduction to the bootstrap* (Chapman and Hall, London, 1993).
16. А. М. Бронфман и Ф. А. Сурков, Труды ВНИРО **118**, 62 (1976).
17. Д. Я. Раткович, Водные ресурсы, № 1, 5 (1977).
18. Д. А. Подойницын, Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки, № 4, 111 (2010).
19. *Протокол XXIX сессии Российско-Украинской Комиссии по вопросам рыболовства в Азовском море* (Ростов-на-Дону, 2018).
20. Протокол XXX сессии Украинско-Российской Комиссии по вопросам рыболовства в Азовском море (Ростов-на-Дону, 2019).
21. В. Н. Белоусов, в сб. *Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна (1998–1999 гг.)* (Изд-во БКИ, Ростов-на-Дону, 2000), сс. 88–96.
22. В. Н. Белоусов, в сб. *Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна (2000–2001 гг.)* (Вопросы рыболовства, М., 2002), сс. 279–291.
23. В. Н. Белоусов, в сб. *Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна (2002–2003 гг.)* (Медиа-Пресс, Ростов-на-Дону, 2004), сс. 131–137.
24. В. Н. Белоусов, Автореф. дис. ... канд. биол. наук (КубГАУ, Краснодар, 2004).
25. Д. А. Подойницын, в сб. *Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна (2004–2005 гг.)* (Изд-во «Диапазон», Ростов-на-Дону, 2006), сс. 199–207.
26. Е. П. Цуникова, Т. М. Попова, Е. А. Порошина и Е. А. Нефедова, в сб. *Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна (2006–2007 гг.)* (Медиа-Пресс, Ростов-на-Дону, 2008), сс. 270–293.
27. В. А. Гетманенко, Е. П. Губанов и Л. В. Изергин, Рибне господарство України: науково-виробничий журнал, № 3, 4 (2012).
28. А. А. Живоглядов и С. В. Лукьянов, Вопр. рыболовства **19** (4), 405 (2018).
29. С. В. Лукьянов и А. А. Живоглядов, в сб. *Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2018* (Севастопольский гос. ун-т, Севастополь, 2018), сс. 739–743.
30. С. В. Лукьянов и А. А. Живоглядов, в сб. *Конфликт природопользования: роль в эволюции ноосферы* (Астраханский гос. ун-т, Астрахань, 2019), сс. 78–83.
31. *Протокол XIX сессии Российско-Украинской Комиссии по вопросам рыболовства в Азовском море* (Анапа, Россия, 2007). URL: http://docs.cntd.ru/document/902114750
32. *Протокол XX сессии Российско-Украинской Комиссии по вопросам рыболовства в Азовском море* (Бердянск, Украина, 2008). URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/2067519
33. *Протокол XXI сессии Российско-Украинской Комиссии по вопросам рыболовства в Азовском море* (пос. Рожок Ростовской области, Россия, 2009). URL: http://bestpravo.com/rossijskoje/xd-pravila/b8b/index.htm
34. *Протокол XXIII сессии Российско-Украинской Комиссии по вопросам рыболовства в Азовском море* (Темрюк, Краснодарский край, Россия, 2011). URL: http://www.

fishindustry.net/govermental-bodies/2164-rezultaty-xxiii-sessii-rossiysko-ukrainskoy-komissii-po-voprosam-rybolovstva-v-azovskom-more.html
35. *Протокол XXIV сессии Российско-Украинской Комиссии по вопросам рыболовства в Азовском море* (Бердянск, Украина, 2012).
36. *Протокол XXVIII сессии Российско-Украинской Комиссии по вопросам рыболовства в Азовском море* (Киев, Украина, 2016). URL: http://azniirkh.ru/novosti/xxviii-sessiya-rossiysko-ukrainskoy-komissii-po-voprosam-ryibolovstva-v-azovskom-more-zavershila-svoyu-rabotu-v-kieve-ukraina/
37. Л. В. Дашкевич, С. В. Бердников и В. В. Кулыгин, Водные биоресурсы и среда обитания **2** (2), 7 (2019).
38. Л. В. Дашкевич и В. В. Кулыгин, Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий» **25** (2), 112 (2019). https://doi.org/10.35595/2414-9179-2019-2-25-112-120
39. Л. В. Дашкевич, С. В. Бердников и В. В. Кулыгин, Водные ресурсы **44** (5), 563 (2017). https://doi.org/10.7868/S0321059617040046
40. С. В. Бердников, в сб. *Закономерности экосистемных процессов в Азовском море*, под ред. Г. Г. Матишова (Наука, М., 2006), сс. 137–229.
41. Д. А. Подойницын, Автореф. дис. ... канд. биол. наук (ЮФУ, Ростов-на-Дону, 2010).
42. Л. В. Кукарина, в сб. *Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна* (АзНИИРХ, Ростов-на-Дону, 1996), сс. 183–186.
43. А. В. Никитина, Т. В. Руднева, Т. В. Камышникова и др., Современные проблемы науки и образования, № 1, 1 (2015). URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=19509
44. В. В. Кулыгин, В. С. Герасюк и Л. В. Дашкевич, Информация и космос, № 1, 120 (2018).
45. Yu. Tyutyunov, R. Arditi, B. Buttiker, et al., Ecol. Modelling **69**, 19 (1993).
46. А. Б. Медвинский, А. В. Русаков, А. Е. Бобырев и др., Биофизика **54** (1), 120 (2009).
47. L. V. Nedorezov, Population Dynamics: Analysis, Modelling, Forecast **2** (4), 129 (2013).
48. А. И. Абакумов, Информатика и системы управления **54** (4), 12 (2017).
49. В. Г. Ильичев и О. А. Ильичева, Биофизика **63** (2), 373 (2018).
50. В. Г. Ильичев и Л. В. Дашкевич, Компьютерные исследования и моделирование **11** (5), 879 (2019).
51. G. P. Neverova, A. I. Abakumov, I. P. Yarovenko, and E. Ya. Frisman, Nonlinear Dynamics **94** (2), 827 (2018).
52. И. И. Ворович, А. С. Горелов, А. Б. Горстко и др., *Рациональное использование водных ресурсов бассейна Азовского моря. Математические модели* (Наука, М., 1981).
53. Г. Г. Матишов, Ю. М. Гаргопа, С. В. Бердников и С. Л. Дженюк, *Закономерности экосистемных процессов в Азовском море*, под ред. Г. Г. Матишова (Наука, М., 2006).
54. S. V. Berdnikov, V. V. Selyutin, V. V. Vasilchenko, and J. F. Caddy, Fisheries Res. **42** (3), 261 (1999).

Long-Range Prediction of the Risk of Extinction Faced by the Pikeperch in the Azov Sea: Has the Prediction Come True?

Yu.V. Tyutyunov*, **, I.N. Senina*, L.I. Titova**, and L.V. Dashkevich***

**Federal Research Centre "The Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences", prosp. Chekhova 41, Rostov-on-Don, 344006 Russia*

***Southern Federal University, prosp. Stachki 200/1, Rostov-on-Don, 344090 Russia*

****Collecte Localisation Satellites, Space Oceanography Division (в русском варианте отсутствует), rue Hermes 8-10, Ramonville Saint-Agne, 31520 France*

In the late 1990s, based on stochastic simulations with a model of a long-range prediction of the dynamics of the Azov Sea pikeperch population identified from the 1950–1981 observational data including stocks, catches, temperature and salinities in the Azov sea, because the salinity of the seawater increases, a high probability of a risk of quasiextinction faced by the pikeperch population in the Azov Sea within 35 years from 1982 to 2016 was calculated. This probabilistic prediction has come true – the risk event occurred in the 2000s. Since 2005, the abundance of adult pikeperch did not exceed 4 million individuals. Since 2017, the pikeperch catch in the Azov Sea was completely forbidden. Nowadays, retrospective validation demonstrates that the model prediction is in a good (qualitative and quantitative) correspondence with the 1982–2018 observation data on dynamics of the pikeperch population. It has also been found that currently observed rise in annual average sea temperature has a negative impact on fish population dynamics and this phenomenon is no less significant than increase in salinity. According to a short-range prediction for 2019–2020, due to existing positive temperature and salinity anomalies, the ban on fishing introduced in 2017 is not enough to rebuild stocks of the Azov Sea pikeperch population in the coming years.

Keywords: Azov Sea, population dynamics, Sander Lucioperca L., stochastic model, Monte–Carlo method, risk of quasi-extinction

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОСТУПЛЕНИЯ СТОКА РЕЧНЫХ НАНОСОВ ДОНА В ТАГАНРОГСКИЙ ЗАЛИВ АЗОВСКОГО МОРЯ[1]

© 2020 г. *А.В. Клещенков[1], В.В. Сорокина[1], А.Л. Чикин[1], Л.Г. Чикина[2]*

[1]Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН
[2]Южный федеральный университет
chikin1956@gmail.com

Публикация подготовлена в части анализа седиментационных процессов в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН № гр. проекта АААА-А18-118122790121-5, в части разработки методов численного моделирования в рамках научного проекта РФФИ 18-05-80010 «Исследование и прогноз опасных гидрометеорологических и геолого-геоморфологических процессов в районах функционирования стратегических объектов на Азово-Черноморском побережье (исторические и современные аспекты)». Расчеты выполнены на кластере ЦКП "Высокопроизводительные вычисления".

DOI: 10.20948/mm-2020-03-03

Выявлены пространственно-временные особенности процесса осадконакопления взвешенных наносов на устьевом взморье Дона при разных ветровых ситуациях (сгонах, нагонах и слабом ветре переменных направлений) с применением математической модели ветровых течений, дополненной модулем переноса и седиментации взвешенного вещества. Показано, что под действием восточного ветра 6–8 м/с в течение всего расчетного периода (6–7 календарных дней) движение воды в Таганрогском заливе носит поступательный характер, а под действием юго-западного ветра такой же скорости картина линий тока меняется во времени, от поступательных движений в первые сутки до образования двух циркуляционных зон в районе г. Таганрога и в центральной части устьевого взморья. Показано, что поля концентрации взвеси подобны для разных фракционных групп взвешенного вещества. Под действием восточного ветра они вытянуты вдоль продолжения оси основных рукавов дельты на устьевом взморье, под действием юго-западного – прижаты к устьям. При сгоне тяжелые фракции взвеси оседают в районе Азово-Донского судоходного канала, а легкие выносятся течением в сторону залива. При нагоне оседание взвеси происходит вблизи устьевого створа, тяжелые фракции образуют три области деформации дна возле устьев основных рукавов, легкие – только две.

Ключевые слова: взвешенное вещество, седиментация, математическая модель, уравнение переноса, вычислительный эксперимент.

[1] **Оригинальный текст:** *Клещенков А.В., Сорокина В.В., Чикин А.Л., Чикина Л.Г.* Моделирование процесса поступления стока речных наносов Дона в Таганрогский залив Азовского моря // Математическое моделирование. 2020. Т. 32. № 3. С. 47–60.

MODELING OF THE PROCESS OF ENTERING THE SUSPENDED SOLIDS RUNOFF OF THE RIVER DON TO THE TAGANROG BAY OF THE SEA OF AZOV

A.V. Kleshhenkov[1], V.V. Sorokina[1], A.L. Chikin[1], L.G. Chikina[2]

[1]Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the RAS
[2]South Federal University

Using a mathematical model of wind currents, supplemented by a module of sediment transfer and sedimentation the spatio-temporal features of the river sediments accumulation on the Don mouth seaside at different wind conditions (eastern and western wind surges and light winds of variable directions) are revealed. It is shown that under the action of the east wind of 6–8 m/s during the entire settlement period (6–7 calendar days) the water movement in the Taganrog Bay is progressive, and under the action of the south-west wind of the same speed, the pattern of current lines changes in time from the progressive movements on the first day to the formation of two circulation zones in the area of the city of Taganrog and in the central part of the Don mouth seaside. It is shown that the fields of suspended matter concentration are similar for different fractions of solids. Under the action of the east wind, they stretched along the extension of the axis of the main branches of the delta at the bay, under the action of the south-west - pressed to the mouths of branches. During the eastern wind surges, the heavy fractions of sediment settle in the area of the Azov-Don navigable canal, and the light ones are carried by the stream towards the bay. During the western wind surges, the sedimentation of the suspended solids occurs near the wellhead, the heavy fractions form three areas of deformation of the bottom near the mouths of the main branches of the delta, the light ones - only two areas.

Keywords: suspended solids, sedimentation, mathematical model, transport equation, computational experiment.

1. Введение

Речной сток Дона, волнение и сгонно-нагонные течения, а также размыв берегов являются основными факторами осадконакопления в Таганрогском заливе Азовского моря и служат регулирующим механизмом самых разнообразных процессов – от водообмена и связи с морем до биологических. Исследованию осадконакопления в Азовском море и роли речного стока в этом процессе посвящено немало работ [1-8], в том числе с использованием методов математического моделирования [9-13]. Несмотря на сложившееся понимание основных закономерностей седиментации, особенности этого процесса в отдельных районах Азовского моря, таких как взморье Дона, прибрежные районы, изучены недостаточно.

Поток воды в Таганрогском заливе очень изменчив, что связано главным образом с действием ветра. Процесс переноса взвеси и накопления осадков является комплексным и требует проведения трудоемких и длительных экспедиционных исследований. Как отмечено в [14], при постановке и выполнении работ в 1960–1969 гг., связанных с исследованием современной эволюции дельты Дона, основой экспедиционных работ должны являться специализированные многосерийные океанографические съемки взморья, выполняемые в течение наиболее характерных фаз изучаемого режима, многосерийные челночные разрезы в устье и на баре основных и вторичных водотоков дельты, многосуточные станции с использованием автономных самописцев течений и т.д. Кроме того, для получения средних значений изучаемых параметров требуются наблюдения, значительно превышающие по длительности временной масштаб местных флуктуаций ветра.

Существенную помощь в понимании процессов осадконакопления может оказать анализ, выполненный с использованием математического моделирования, дополняя результаты наблюдений. С помощью вычислительных экспериментов на математической модели можно определить районы оседания речного твердого стока в зависимости от ветровой ситуации, а также выяснить, куда выносятся легкие и где оседают тяжелые фракции взвеси. Понимание пространственно-временных закономерностей седиментации речных наносов важно для составления прогнозов изменения глубин и заносимости морских подходных каналов к портам Азов и Таганрог, а также может помочь при оценке загрязнения Таганрогского залива тяжелыми металлами, частицами микропластика и другими веществами, ассоциированными со взвесью.

Цель настоящей работы заключается в определении локального распределения и осаждения взвешенного вещества разного фракционного состава, поступающего из рукавов дельты Дона при различных ветровых ситуациях (сгонах, нагонах и слабом ветре переменных направлений).

2. Материал и метод

2.1. Основные уравнения. Используемая для расчетов математическая модель содержит гидродинамическую и транспортную составляющие. Гидродинамическая составляющая описана двухслойной моделью ветрового течения, которая в общем виде приведена в [15]. Суть данной модели заключается в том, что в районах мелководья используются уравнения мелкой воды, в районах с относительно большой глубиной – трехмерные уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости. Модель переноса взвешенного вещества представлена в [16], где реализована для изучения загрязнения южной части Цимлянского водохранилища.

В предположении, что донные отложения состоят из k фракций ($k = 1,...,N$), перенос взвеси описывается уравнением конвекции-диффузии

$$\frac{\partial c_k}{\partial t} + \frac{\partial (uc_k)}{\partial x} + \frac{\partial (vc_k)}{\partial y} + \frac{\partial [(w - w_{sk})c_k]}{\partial z} = \varepsilon_{xy}\left(\frac{\partial^2 c_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_k}{\partial y^2}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\varepsilon_z \frac{\partial c_k}{\partial z}\right),$$

где C_k – концентрация k-й фракции; u,v,w – компоненты скорости, w_{sk} – собственная скорость оседания k-й фракции; $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_z$ – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии соответственно. Предполагается, что в области устьевого взморья температура и концентрация взвешенного вещества не влияет на плотность вод в устье реки Дон.

На свободной поверхности задается условие $\varepsilon_z(\partial c_k / \partial z) + w_{sk}c_k = 0$. На дне ставится условие $\varepsilon_z(\partial c_k / \partial z) = E_{bk} - D_{bk}$, где E_{bk} – расход при размывании, а D_{bk} – расход оседающих частиц.

Поступление твердого стока из реки описывается уравнением $\varepsilon_{xy}(\partial c_k / \partial n) + V_r c_k = Q_{rk}$, где V_r – скорость реки; Q_{rk} – расход твердого стока (боковой приток); n – нормаль к боковой границе.

Весь процесс переноса взвешенного вещества в водной среде состоит из размывания донного осадка, если скорость течения достаточно большая, оседания взвешенных частиц в случае малой скорости течения и собственно самого переноса взвеси водной средой. Приведенные граничные условия учитывают процессы взмучивания и оседания вещества, поступление его через границы.

Расход D_{bk} оседающих частиц вычисляется по формуле [17]

$$D_{bk} = \begin{cases} 0, & \tau_b > \tau_{b\max} \\ \alpha_k w_{sk} c_{km}, & \tau_{b\min} < \tau_b \le \tau_{b\max} \\ w_{sk} c_{km}, & \tau_b \le \tau_{b\min} \end{cases},$$

где τ_b– напряжение сдвига; $\tau_{b\min}$– критическое напряжение сдвига, ниже которого весь осадок откладывается на дне; $\tau_{b\max}$ – критическое напряжение сдвига слоя, выше которого весь осадок остается в суспензии, что приводит к нулевой скорости осаждения; α_k – это коэффициент от 0 до 1, относящийся к напряжению сдвига, и приблизительно равный $\alpha_k = 1 - (\tau_b - \tau_{b\min}) / (\tau_{b\max} - \tau_{b\min})$.

Расход E_{bk} поднявшихся со дна частиц вычисляется по формуле $E_{bk} = M(\tau_b - \tau_{ek}) / \tau_{ek}$ [18]. Здесь τ_{ek} – критическое сдвиговое напряжение на размывание; M – экспериментальная постоянная, зависящая от свойств осадка.

Величина сдвигового напряжения τ_b вычисляется через скорость $\mathbf{U_b}$ у основания с учетом коэффициента донного трения f_w

$$\boldsymbol{\tau}_\mathbf{b} = \rho_w f_w \mathbf{U_b} \left|\mathbf{U_b}\right|.$$

Изменение рельефа дна задается уравнением

$$\rho_S (1-\sigma) \frac{\partial Z}{\partial t} = D_b - E_b ,$$

где σ – пористость дна; ρ_S – осредненная плотность донного осадка, D_b, E_b – суммарные расходы всех фракций, Z –толщина донного осадка.

2.2. Внешние данные для выполнения расчетов. Сток взвешенных наносов Нижнего Дона претерпел коренные изменения в XX веке вследствие гидротехнического строительства. Эти изменения касались как объемов стока, так и трансформации гранулометрического состава взвесей. Твердый сток Дона сократился с 4.4 в 1940–50-е гг. [14] до 0.3-0.4 млн. т/год в 2000–2004 гг. [19, 20]. В последний маловодный период 2007–2017 гг. он составил 0.15 млн. т/год [21]. При столь малом объеме стока речных взвесей, небольших глубинах на взморье Дона и в восточной части Таганрогского залива (в среднем 2.5–3 м), интенсивном воздействии на дно течений и волнения, величины накопления донных отложений ничтожно малы, а в некоторых частях акватории может наблюдаться их размыв. Определение количества образовавшихся осадков стандартными океанографическими методами существенно затруднено, однако результаты расчетов с использованием математической модели позволяют обозначить предполагаемые районы их накопления.

В качестве граничных условий для модельных экспериментов было задано поступление взвешенных веществ из трех основных рукавов дельты Дона: Большая Кутерьма, Мокрая Каланча и Старый Дон (судоходный канал). Это поступление, или боковой приток, ($Q_{бок}$) рассчитано на основе данных экспедиционных исследований [19]: расходов воды (Q_w), взвешенных наносов (R), площадей живого сечения реки (S) в устьях рассматриваемых рукавов (табл.1). Так же рассчитана скорость течения в устье рукавов (V). Согласно [19], наибольшее количество взвеси поступает через рукав Кутерьма, что учитывалось при задании граничных условий.

В пределах Азовского моря преобладающими являются ветры восточного и западного направлений [22]. Ветры с западной составляющей вызывают нагон воды из Таганрогского залива и подъем уровня в Дону, ветры с восточной составляющей вызывают сгон воды и падение уровня [23]. Исследование сгонно-нагонных явлений в дельте Дона показали, что большинство сгонов и нагонов (за исключением экстремальных случаев) происходит при действии ветра со скоростью в среднем 7 м/с [24].

Таблица 1. Гидрологические параметры устьев основных рукавов дельты Дона.

Название рукава	Q_w, м^3/с	R, кг/с	Ширина русла b, м	Глубина русла H, м	S, м^2	$Q_{бок}$, кг/м^{2}с	V, м/с
Большая Кутерьма	286	4.7	770	3	1540	0.0031	0.186
Мокрая Каланча	141	1.7	700	3	1400	0.0012	0.101
Старый Дон (проток Песчаный, судоходный канал)	160	3.5	440	5	1470	0.0024	0.109

Модельные расчеты проводились на период 6–7 календарных дней при следующих ветровых ситуациях: безветренная погода, восточный ветер 6–8 м/с, юго-западный ветер 6-8 м/с. При этом учитывалось распределение по рукавам Дона поступающего в залив твердого стока.

3. Результаты и их обсуждение

Хотя численное исследование процесса осадконакопления речных наносов выполнено для области устьевого взморья Дона, расчеты гидродинамики и переноса вещества были сделаны для всего Таганрогского залива. Использована математическая модель ветровых течений Таганрогского залива [25], которая достаточно адекватно описывает эти процессы в водоеме. Подобная модель для Азовского моря в целом в настоящее время используется в программном комплексе EX-MARE [26] для прогнозирования опасных явлений.

Задача решалась конечно-разностными методами на равномерной сетке. Шаг сетки по горизонтали составлял $\Delta x = \Delta y = 200$ м, по вертикали $\Delta z = 0.5$ м с числом узлов $617 \times 357 \times 19$, что дало 4200000 ячеек. Шаг по времени задавался 600 с. После индексации ячеек в расчетной области число ячеек с неизвестными параметрами стало примерно 650000. Исследование консервативности построенных моделей гидродинамики не проводилось. Численная реализация модели осуществлялась на высокопроизводительных вычислительных системах в среде MPI с использованием пакета параллельных подпрограмм Aztec.

3.1. Пространственно-временные особенности распределения взвешенных наносов на устьевом взморье Дона. Численно установлено, что при действии восточного ветра 6-8 м/с в течение всего расчетного периода

(6–7 календарных дней) движение воды носит поступательный характер с отсутствием каких-либо циркуляционных зон.

При действии юго-западного ветра 6-8 м/с картина линий тока меняется во времени. В первые сутки движение воды имеет поступательный характер (рис.1А). Затем начинают образовываться две циркуляционных зоны: одна в районе Таганрога, другая примерно в центральной части устьевого взморья. Через 4–5 суток движение воды принимает установившийся характер с двумя ярко выраженными циркуляционными зонами (рис.1Б).

А Б

Рис.1. Линии тока течения в Таганрогском заливе после первых суток действия юго-западного ветра 6–8 м/с (А) и после 4 суток действия юго-западного ветра 6-8 м/с (Б).

При проведении численного исследования распределения твердого стока по взморью рассмотрены два типа взвешенного вещества: относительно легкое и относительно тяжелое. Входные данные для этих типов вещества заданы значениями критического напряжения на оседание и размывание, а также скоростью оседания. Вычислительные эксперименты показали, что поля концентрации взвеси подобны для обеих фракционных групп.

А Б

Рис.2. Распределение концентраций взвешенного вещества (мг/л) на взморье Дона после действия восточного ветра 6-8 м/с в течение 7 суток (А) и после действия юго-западного ветра 6-8 м/с в течение 7 суток (Б).

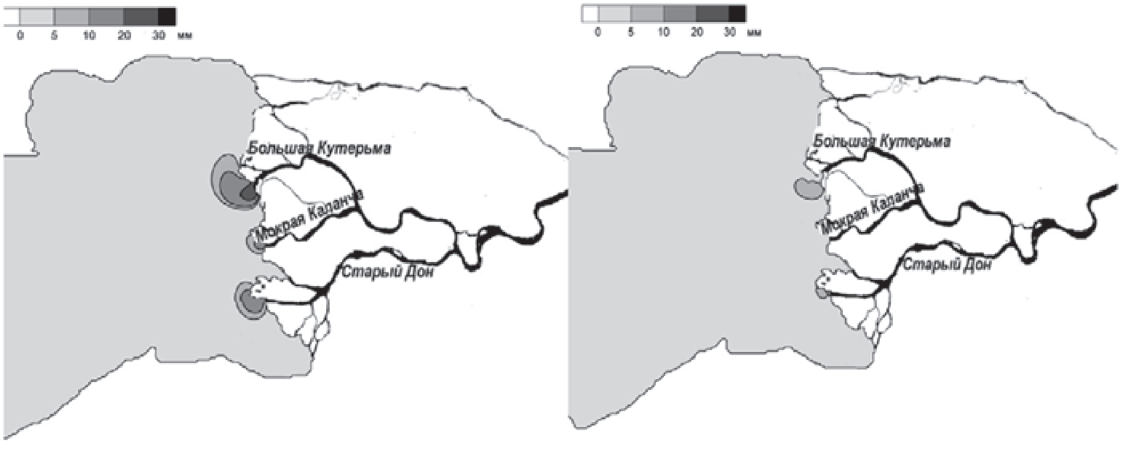
Существенное влияние на распределение взвешенного вещества оказывает ветровая ситуация. Распространение взвеси при действии восточного ветра 6-8 м/с (сгон) происходит в виде двух пятен: одно, более широкое, образовано взвесью из рукава Большая Кутерьма, другое, вытянутое вдоль Азовского судоходного канала, – из рукава Старый Дон (рис.2А). Количество взвешенных наносов, поступающих из рукава Мокрая Каланча, изначально значительно меньше, чем из двух других рукавов. Кроме того, скорость течения при сгоне воды успевает снизить здесь концентрацию взвеси до значений, пренебрежимо малых по сравнению с концентрациями, образованными твердым стоком из рукавов Большая Кутерьма и Старый Дон.

При действии юго-западного ветра 6-8 м/с (нагон) течение воды «прижимает» взвесь к устьям рукавов Дона, не давая распространяться в сторону залива. Нагонное течение препятствует проникновению взвеси из рукава Мокрая Каланча, тем самым образуя третье пятно взвешенного вещества (рис.2Б).

Рис.3. Величина деформации дна (мм) на взморье Дона в случае крупной взвеси (А) и мелкой взвеси (Б) при действии восточного ветра 6-8 м/с.

Численное исследование процесса деформации дна за счет осадконакопления твердого стока показало, что при восточном ветре 6-8 м/с крупная взвесь начинает оседать ближе к устьевому створу (рис.3А) и деформация дна при этом значительней, чем при оседании мелкой взвеси (рис.3Б). Легкие фракции взвеси не осаждаются в районе Азово-Донского судоходного канала в отличие от тяжелых фракций, а выносятся течением в сторону залива.

При действии юго-западного ветра 6-8 м/с оседание взвеси происходит вблизи устьевого створа. Тяжелые фракции образуют три области деформации дна (рис.4А), легкие – только две (рис.4Б).



А Б

Рис.4. Величина деформации дна (мм) на взморье Дона в случае крупной взвеси (А) и мелкой взвеси (Б) при действии юго-западного ветра 6-8 м/с.

А Б

Рис.5. Величина деформации дна (мм) на взморье Дона в случае крупной взвеси (А) и мелкой взвеси (Б) при действии слабого ветра переменных направлений.

При слабом ветре переменных направлений на величину осаждаемого осадка влияет только течение в основных рукавах дельты Дона. Это особенно четко выражено в окрестности устья Большой Кутерьмы. Тяжелая взвесь начинает оседать сразу за устьем, как только скорость истекания резко падает (рис.5А). Легкая взвесь продолжает перемещаться, пока скорость течения не станет достаточно малой. В этом случае прослеживается свободное от легкой взвеси пятно вблизи устьев рукавов (рис.5Б).

С целью верификации математической модели был выполнен отбор проб воды с последующим определением концентрации общей взвеси. Отбор проб проводился в ходе рейса на НИС «Профессор Панов» в период с 26 по 28 июля 2018 года. Метеорологическая обстановка на момент проведения морских научных работ характеризовалась устойчивым ветром восточных румбов со скоростью 3–5 м/с 26 июля при движении от устья рукава Старый Дон вглубь залива и 7–12 м/с 28 июля при движении обратно, в сторону дельты Дона.

точка	X, с.ш.	Y, в.д.
A	47,088519°	39,25169°
B	47,084158°	39,206996°
C	47,08039°	39,148267°

Рис.6. Распределение концентрации взвешенного вещества (мг/л) на конец эксперимента (28.07.2018 г.) и точки наблюдений за концентрацией взвеси в период 26 – 28.07.2018 г.

Модельный эксперимент на 26-28 июля 2018 г. выполнен с использованием данных о ветровой ситуации ГМС Таганрог. Расчетные значения концентрации взвешенного вещества сравнивались с наблюденными величинами взвеси в трех точках (A, B, C) устьевого взморья Дона (рис.6). Относительная погрешность расчетов на конец эксперимента (28.07.2018 г.) в выбранных точках изменялась от 1 до 12%. Лучшие результаты наблюдались в точке B, где погрешности расчетов составляли 9.5% в начале и 3.5% в конце эксперимента.

Анализ сопоставления результатов моделирования и данных наблюдений показал высокую степень соответствия расчетных и наблюдавшихся in situ значений (рис.7). Обращает на себя внимание схожая в обоих случаях тенденция: пониженные концентрации взвеси вблизи устья реки и повышенные в более маристой части залива, что также говорит об адекватности модели.

4. Заключение

Специфика гидродинамических ситуаций в Таганрогском заливе Азовского моря определяет необходимость разработки и применения специальных методик полевых исследований и методов математического моделирования, позволяющих получать информацию о характере седиментационных процессов на акватории, дифференцированных по типам: штиль, сгон, нагон, а также для отдельных их стадий (развитие, стабилизация и затухание).

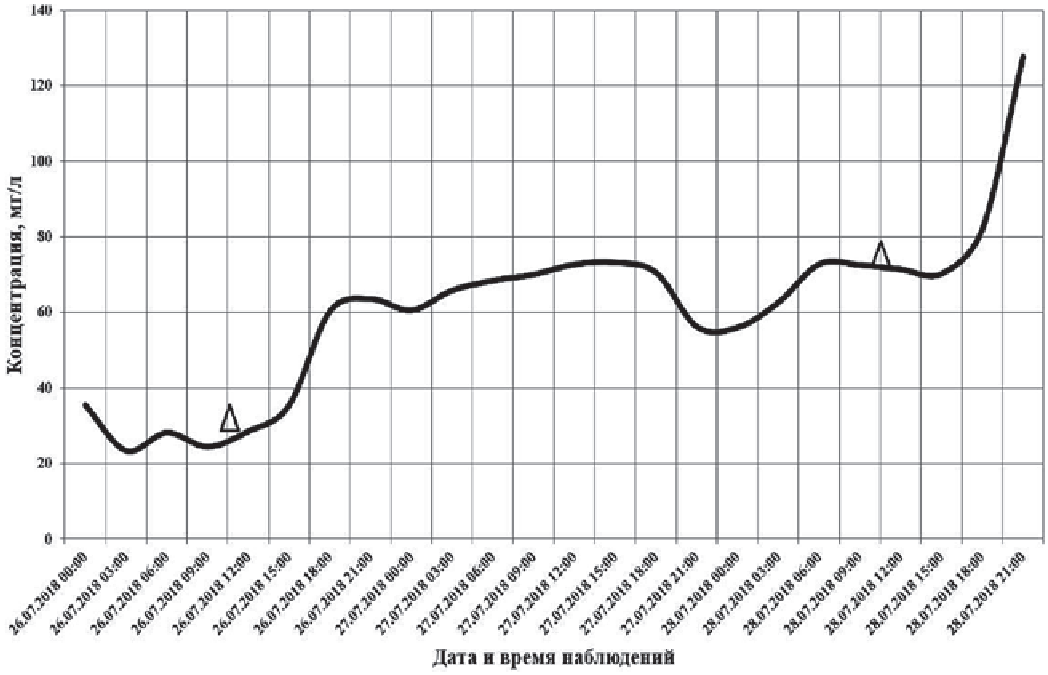


Рис.7. Расчетные "–" и наблюденные "Δ" значения концентрации взвешенного вещества в точке В в период 26–28.07.2018 г.

Предложенный в настоящей работе подход позволил выполнить оценку пространственно-временных особенностей распределения взвешенных наносов на взморье Дона при разных гидродинамических ситуациях. Свойства используемой двухслойной математической модели дали возможность быстро адаптировать ее для Таганрогского залива, отличающегося большой неоднородностью глубин. Численная реализация модели на высокопроизводительных системах позволяет оперативно получать результаты для долгосрочных прогнозов.

Результаты численных экспериментов согласуются с натурными данными для относительно небольших временных промежутков, а также с имеющимися в литературе представлениями о распределения речных взвесей на устьевом взморье Дона. Так, согласно [14], оседание крупной взвеси происходит на расстоянии 3–4 км от устьев главных рукавов и на расстоянии 0.5–1 км от устьев второстепенных рукавов дельты Дона. Результаты модельных оценок также хорошо согласуются в качественном плане с данными экспедиционных исследований ЮНЦ РАН в 2006–2018 гг.

Количественные отличия концентраций взвешенного вещества по результатам расчетов и данным наблюдений в Таганрогском заливе позволяют косвенно оценить автохтонную составляющую взвеси и оконтурить районы, где концентрация взвешенного вещества в воде определяется уже не речным стоком, а другими внутриводоемными процессами, прежде всего взмучиванием нелитифицированных донных отложений.

Полученные результаты планируется в дальнейшем использовать при изучении специфических загрязняющих веществ, поступающих с речным стоком в Азовское море, таких как тяжелые металлы, микропластик и др.

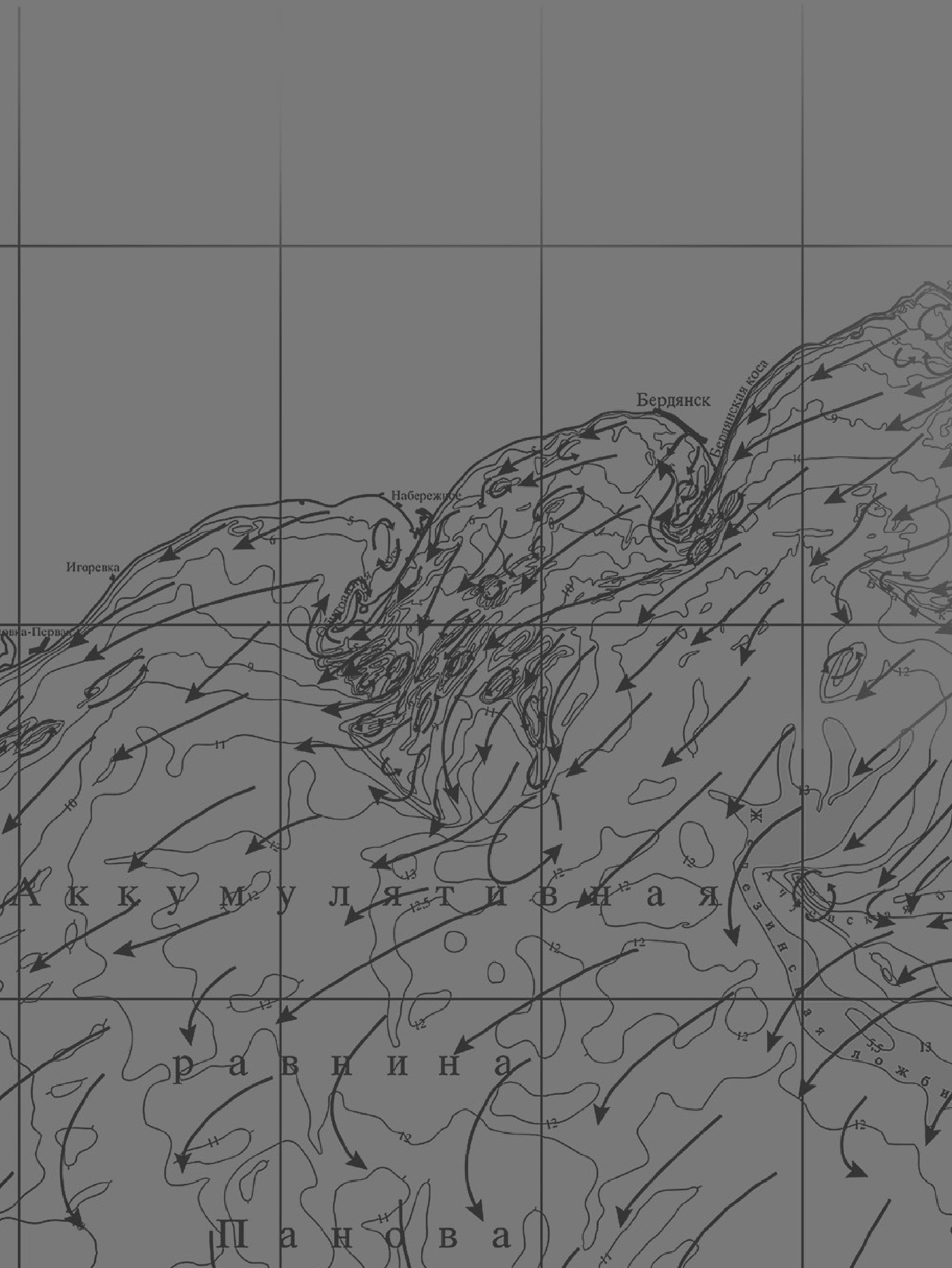
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Д.Г. Панов, М.К. Спичак.* Об условиях осадконакопления в Азовском море // Современные осадки морей и океанов. Под ред. Н.М. Страхова. – М.: Изд. АН СССР, 1961, с.512-520;
D.G. Panov, M.K. Spichak. Ob usloviiakh osadkonakopleniia v Azovskom more. // Sovremennye osadki morei i okeanov. Pod red. N.M. Strahova. – M.: Izd. AN SSSR, 1961, s.512-520.
2. *М.В. Федосов.* Некоторые характеристики осадкообразования в Азовском море. // Современные осадки морей и океанов. Под ред. Н.М. Страхова. – М.: Изд. АН СССР, 1961, с.504-511;
M.V. Fedosov. Nekotorye kharakteristiki osadkoobrazovaniia v Azovskom more. // Sovremennye osadki morei i okeanov. Pod red. N.M. Strahova. – M.: Izd. AN SSSR, 1961, s.504-511.
3. *Ю.П. Хрусталев, Л.З. Ганичева, Л.З. Клунникова, И.А. Мирзоян.* Количественное распределение и основные типы взвеси Азовского моря // Лавинная седиментация в океане. – Ростов-н/Д: Изд-во Рост. ун-та, 1982, с.95-118;
Yu.P. Hrustalev, L.Z. Ganicheva, L.Z. Klunnikova, I.A. Mirzoyan. Kolichestvennoe raspredelenie i osnovnye tipy vzvesi Azovskogo moria // Lavinnaia sedimentatsiia v okeane. Rostov-n/D: Izd-vo Rost. un-ta, 1982, s.95-118.
4. *С.Я. Черноусов, Ю.В. Артюхин.* Основные черты осадконакопления во внутриконтинентальных водоемах аридной зоны (на примере оз. Балхаш и Азовского моря). // Лавинная седиментация в океане. – Ростов-н/Д: Изд-во Рост. ун-та, 1982, с.162-170;
S.Ya. Chernousov, Yu.V. Artyuhin. Osnovnye cherty osadkonakopleniia vo vnutrikontinentalnykh vodoemakh aridnoi zony (na primere oz. Balhash i Azovskogo moria). // Lavinnaia sedimentatsiia v okeane. – Rostov-n/D: Izd-vo Rost. un-ta, 1982, s.162-170.
5. *Ю.П. Хрусталев.* Закономерности осадконакопления во внутриконтинентальных морях аридной зоны. – Л.: Наука, 1989, 261 с.;
Yu.P. Hrustalev. Zakonomernosti osadkonakopleniia vo vnutrikontinentalnykh moriakh aridnoi zony. – L.: Nauka, 1989, 261 s.
6. *Л.Я. Грудинова.* Перенос осадочного материала в Азовском море. – М.: 1989, автореф. дисс. канд. геогр. наук;
L.Ya. Grudinova. Perenos osadochnogo materiala v Azovskom more. – M.: 1989, avtoref. diss. kand. geogr. nauk.
7. *Ю.П. Хрусталев, О.В. Ивлиева.* Проблемы антропогенной морской седиментологии (на примере Азовского моря). – Ростов-на-Дону: Гефест, 1999, 196 с.;
Yu.P. Hrustalev, O.V. Ivlieva. Problemy antropogennoi morskoi sedimentologii (na primere Azovskogo morya). – Rostov-na-Donu: Gefest, 1999, 196 s.

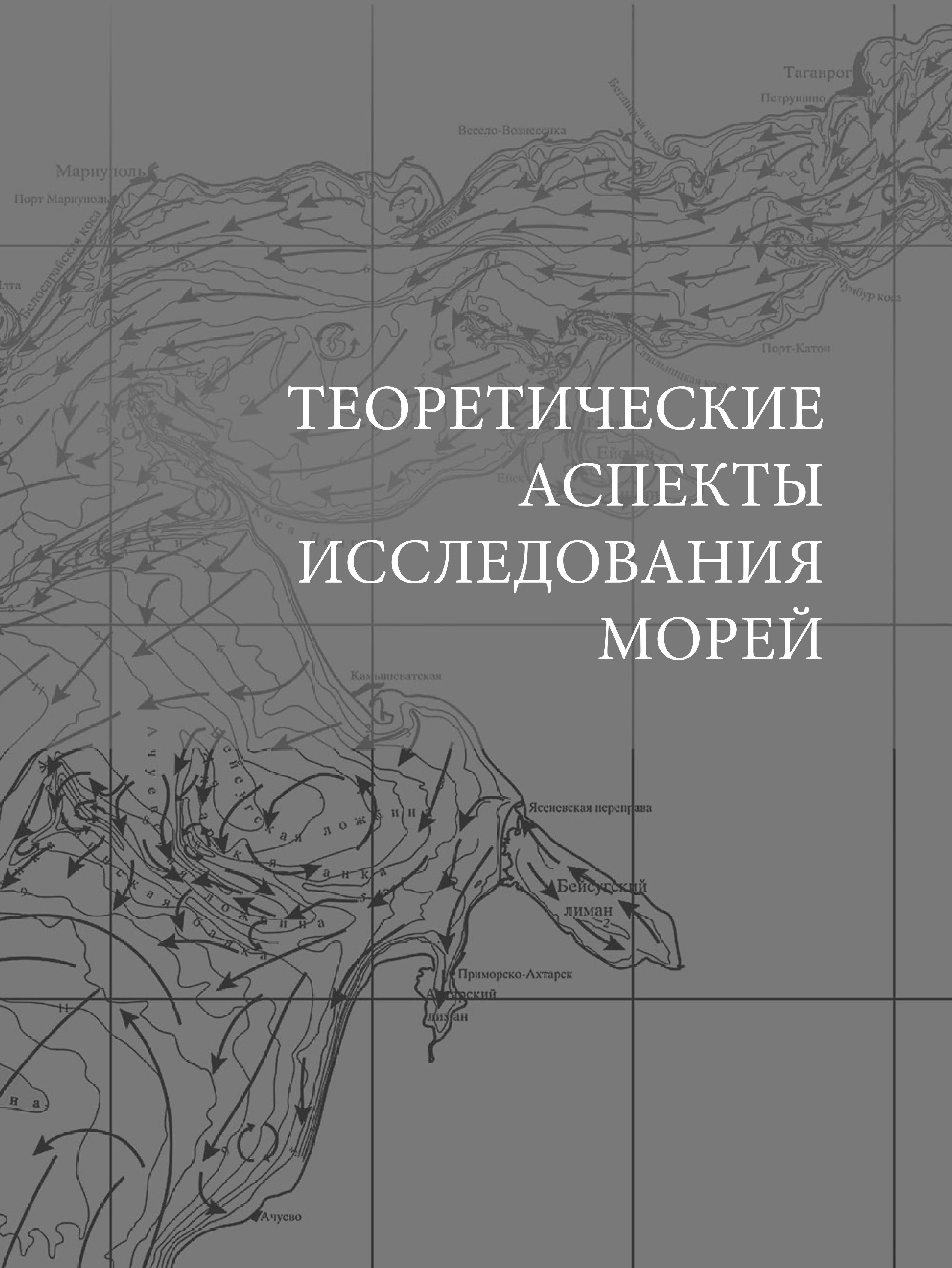
8. *О.В. Ивлиева.* Особенности осадконакопления в Азовском море во второй половине XX века. – Ростов-на-Дону: Изд. ЮФУ, 2009, 320 с.;
O.V. Ivlieva. Osobennosti osadkonakopleniia v Azovskom more vo vtoroi polovine XX veka. – Rostov-na-Donu: Izd. YUFU, 2009, 320 s.
9. *В.В. Сорокина.* Особенности терригенного осадконакопления в Азовском море во второй половине XX века. – Ростов-на-Дону: 2006, дисс. к.г.н.
V.V. Sorokina. Osobennosti terrigennogo osadkonakopleniia v Azovskom more vo vtoroi polovine XX veka. – Rostov-na-Donu; 2006, diss. k.g.n.
10. *В.В. Сорокина, С.В. Бердников.* Математическое моделирование терригенного осадконакопления в Азовском море // Океанология, 2008, т.48, №3, с.456-466;
англ. пер.: *V.V. Sorokina and S.V. Berdnikov.* Mathematical Modeling of the Terrigenous Sedimentation in the Sea of Azov // Oceanology, 2008, v.48, №3, p.418-427.
11. *Л.Г. Чикина, А.Л. Чикин.* Математическая модель процесса заиления подходных судоходных каналов в Таганрогском заливе // Матем. моделир., 2009, №2, с.29-35;
L.G. CHikina, A.L. CHikin. Matematicheskaia model processa zaileniia podkhodnykh sudokhodnykh kanalov v Taganrogskom zalive // Matem. modelir., 2009, t.21, №2, s.29-35.
12. *А.И. Сухинов, А.Е. Чистяков, Е.А. Проценко.* Математическое моделирование транспорта наносов в прибрежной зоне мелководных водоемов // Матем. моделирование, 2013, т.25, №12, с.65-82;
англ. пер.: *A.I. Sukhinov, A.E. Chistyakov, E.A. Protsenko.* Mathematical modeling of sediment transport in the coastal zone of shallow reservoirs // Math. Models Comput. Simul., 2014, v.6, №4, p.351-363.
13. *А.И. Сухинов, А.Е. Чистяков, А.В. Шишеня, Е.Ф. Тимофеева.* Предсказательное моделирование прибрежных гидрофизических процессов на многопроцессорной системе с использованием явных схем. // Матем. моделирование, 2018, т.30, №3, с.83-100;
A.I. Sukhinov, A.E. Chistyakov, A.V. Shishenya, E F. Timofeeva. Predskazatelnoe modelirovanie pribrezhnyh gidrofizicheskikh processov na mnogoprocessornoi sisteme s ispolzovaniem yavnykh skhem // Matem. modelirovanie, 2018, t.30, №3, s.83-100.
14. *А.М. Бронфман, Е.П. Хлебников.* Азовское море. Основы реконструкции. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985, 271 с.;
A.M. Bronfman, E.P. Khlebnikov. Azovskoe more. Osnovy rekonstruktsii. – L.: Gidrometeoizdat, 1985, 271 p.
15. *А.Л. Чикин.* Двухслойная математическая модель ветровых течений в водоемах, имеющих большие площади мелководья // Матем. моделирование, 2009, т.21, №12, с.152-160;
A.L. Chikin. Dvukhsloinaia matematicheskaia model vetrovykh techenii v vodoemakh, imeiushchikh bolshie ploshchadi melkovodia // Matem. modelirovanie, 2009, t.21, №12, s.152-160.
16. *А.Л. Чикин, И.Н. Шабас, С.Г. Сидиропуло.* Моделирование процесса переноса загрязняющего вещества в Цимлянском водохранилище // Водные ресурсы, 2008, т.35, №1, с.53-59.
англ. пер.: *A.L. Chikin, I.N. Shabas and S.G. Sidiropulo*. Modeling Pollutant Transport in the Tsimlyanskoe Reservoir // Water Resources, 2008, v.35, №1, p.51-57.
17. *A.J. Mehta, and E. Partheniade.* An investigation of the depositional properties of flocculated fine sediment // Journal of Hydraulic Research, 1975, v.13, №4, p.361-381.
18. *E. Partheniades,* Erosion and deposition of cohesive soils // Journal of the Hydraulics Division, 1965, v.91, Issue 1, p.105-139.
19. *Д.Г. Матишов, Г.В. Пряхина, И.В. Федорова, В.В. Сорокина.* Современный сток воды и наносов в дельте реки Дон (по результатам экспедиционных исследований) // Вестник Южного научного центра РАН, 2008, т.4, №3, с.72-77;
D.G. Matishov, G.V. Pryakhina, I.V. Fedorova, V.V. Sorokina. Sovremennyi stok vody i

nanosov v delte reki Don (po rezultatam ekspeditsionnykh issledovanii) // Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra, 2008, t.4, №3, s.72-77.

20. *В.В. Сорокина, О.В. Ивлиева, П.М. Лурье.* Динамика стока на устьевых участках рек Дон и Кубань во второй половине XX века // Вестник Южного научного центра РАН, 2006, т.2, №2, с.58-67;
V.V. Sorokina, O.V. Ivlieva, P.M. Lur'e. Dinamika stoka na ustevykh uchastkakh rek Don i Kuban vo vtoroi polovine XX veka // Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra, 2006, t.2, №2, s.58-67.
21. *А.В. Клещенков.* Особенности твердого стока р.Дон в современный маловодный период // Сб. докладов межд. науч. конф. памяти выдающегося русского гидролога Ю.Б. Виноградова «Третьи виноградовские чтения. Грани гидрологии» [Электронный ресурс]; С.-Петербург, 28–30 марта 2018 года / Ред. О. М. Макарьева. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2018, 982 с.;
A.V. Kleshchenkov. Osobennosti tverdogo stoka r.Don v sovremennyi malovodnyi period // Sb. dokladov mezhd. nauch. konf. pamiati vydayushchegosia russkogo gidrologa Yu.B. Vinogradova «Tret'i vinogradovskie chteniia. Grani gidrologii» [Elektronnyi resurs]; S.-Peterburg, 28–30 marta 2018 goda / Red. O.M. Makar'eva. – SPb.: Naukoemkie tekhnologii, 2018, 982 s.
22. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том 05. Азовское море. Справочник // СПб: Гидрометеоиздат, 1991, 237 с.;
Gidrometeorologiia i gidrokhimiia morei. Tom 05. Azovskoe more. Spravochnik // SPb: Gidrometeoizdat, 1991, 237 s.
23. *Н.А. Родионов.* Гидрология устьевой области Дона. – М.: Гидрометеоиздат, 1958, 98 с.;
N.A. Rodionov. Gidrologiia ust'evoi oblasti Dona. – M.: Gidrometeoizdat, 1958, 98 s.
24. *Е.П. Пономаренко, В.В. Сорокина, П.А. Бирюков.* Сгонно-нагонные явления в дельте реки Дон в 2007–2010 гг. и их прогнозирование // Вестник ЮНЦ РАН, 2012, т.8, №1, с.28-37;
E.P. Ponomarenko, V.V. Sorokina, P.A. Biryukov. Sgonno-nagonnye iavleniia v delte reki Don v 2007-2010 gg. i ikh prognozirovanie // Vestnik YuNTs RAN, 2012, t.8, №1, s.28-37.
25. *А.Л. Чикин.* Моделирование ветровых течений в Таганрогском заливе // Труды Южного научного центра РАН. – Изд. ЮНЦ РАН, 2009, с.123-126;
A.L. Chikin. Modelirovanie vetrovykh techenii v Taganrogskom zalive // Trudy Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN. – Izd. YUNC RAN, 2009, s.123-126.
26. *С.В. Бердников, В.В. Кулыгин, И.В. Шевердяев, И.А. Третьякова и др.* Программный комплекс "EX-MARE" – система краткосрочного прогнозирования опасных природных явлений в регионе Азовского моря // Экология. Экономика. Информатика. Сб. статей в 3 т. Т.1: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. – Южный федеральный университет: Из-во ЮФ. – Ростов-на-Дону, 2015, с. 47-59;
S.V. Berdnikov, V.V. Kulygin, I.V. SHeverdyaev, I.A. Tret'yakova i dr. Programmnyi kompleks "EX-MARE" – sistema kratkosrochnogo prognozirovaniia opasnykh prirodnykh iavlenii v regione Azovskogo moria // Ekologiia. Ekonomika. Informatika. Sb. statei v 3 t. T.1: Sistemnyi analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh sistem. – YFU: Iz-vo YuFU. – Rostov-na-Donu, 2015, s.47-59.


Бердянск
Бердянская коса
Набережное
Игоревка
Аккумулятивная
равнина
Панова

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МОРЕЙ



УДК 551.5
DOI: 10.7868/S25000640200303

О ФИЗИЧЕСКОЙ СУЩНОСТИ НЕКОТОРЫХ КЛЮЧЕВЫХ ТЕРМИНОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ДИСКУССИЯХ О СОВРЕМЕННОМ КЛИМАТЕ: РЕАЛЬНОСТЬ И МИСТИФИКАЦИИ [1]

© 2020 г. Академик Г.Г. Матишов[1, 2], чл.-корр. РАН В.Г. Нейман[3]

Аннотация. В статье рассматривается вопрос о том, что наблюдаемый с некоторой недавней поры рост средней температуры воздуха в приземном слое атмосферы затрагивает жизненные интересы фактически всего современного общества. В частное и публичное обсуждение этой проблемы сегодня вовлечено практически все говорящее население Земли, начиная с руководителей ведущих мировых держав и заканчивая их несовершеннолетними гражданами. В работе высказывается мнение, что такого рода общественные обсуждения даже в недостаточно профессиональной аудитории должны учитывать необходимость использования корректной, основанной на реальном физическом смысле терминологии, адекватно описывающей рассматриваемые климатические события. Исходя из этих положений, в статье со ссылкой на высокопрофессиональных авторов использованных определений сформулированы и обоснованы представления о том, что климат в соответствии с сущностью такого определения есть функция погоды. Следовательно, реальная погода первична, а абстрактный климат вторичен. Действительно, реальная погода есть результат динамической активности конкретной климатической системы, состоящей из множественных природных и антропогенных факторов. Количество, состав, взаимодействие и «погодный» вклад каждого из этих факторов известны пока еще в недостаточно полной мере. Следовательно, из-за использования некорректной терминологии бытующее утверждение, что аномальная погода есть следствие изменений климата, противоречит здравому смыслу. В статье также вскрывается некорректность термина «глобальный климат» в связи с тем, что изначальное понятие о климате относится исключительно к явлению не более чем регионального масштаба. Использование словосочетания «глобальный климат» по отношению к изначальному понятию о земном климате как о природном факторе, зависящем прежде всего от угла наклона солнечных лучей к земной поверхности, равносильно признанию того, что Земля плоская. Наблюдаемый рост средней температуры воздуха некорректно называть глобальным потеплением или потеплением глобального климата. В первом из этих терминов реальный масштаб явления преувеличен, а второй термин, «глобальный климат», заключает в себе понятие неадекватное.

Ключевые слова: климат, глобальный климат, погода, климатическая система, температура воздуха, глобальное потепление, Мировой океан, течение, адвекция тепла.

ABOUT THE PHYSICAL NATURE OF SOME KEY TERMS, USED IN DISCUSSIONS ABOUT THE CURRENT CLIMATE – REALITY AND HOAXES

Academician RAS G.G. Matishov[1, 2], Corresponding Member RAS V.G. Neyman[3]

Abstract. The article considers the issue that the growth of the average air temperature in the surface layer of the atmosphere observed since some recent time affects the vital interests of virtually the entire modern society. Today, almost the entire having ability to talk population of the World is involved in private and

[1] Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: matishov_ssc-ras@ssc-ras.ru

[2] Мурманский морской биологический институт Российской академии наук (Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17, e-mail: matishov@mmbi.info

[3] Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation), Российская Федерация, 117997, г. Москва, Нахимовский пр., 36, e-mail: vneiman2007@yandex.ru

[1] **Оригинальный текст:** *Матишов Г.Г., Нейман В.Г.* О физической сущности некоторых ключевых терминов, используемых в дискуссиях о современном климате: реальность и мистификации // Наука Юга России. 2020. Т. 16. № 3. С. 17–25.

public discussion of this problem, starting with the Heads of the leading world powers and ending with their minor citizens. The paper suggests that such public discussions, even in an insufficiently professional audience, should take into account the need to use correct terminology based on a real physical sense that adequately describes the climate events under consideration. Based on these provisions, the article, with reference to the highly professional authorship of the definitions used, formulated and justified the idea that climate, according to the essence of this definition, is a function of weather. Therefore, real weather is primary, and abstract climate is secondary. Indeed, in fact, real weather is the result of the dynamic activity of a specific climate system consisting of multiple natural and anthropogenic factors. The quantity, composition, interaction and "weather" contribution of each of these factors are not yet fully known. Therefore, due to the use of incorrect terminology, the current statement that abnormal weather is a consequence of climate change is contrary to common sense!

The article also reveals the inaccuracy of the term "global climate", due to the fact that the original concept of climate refers exclusively to a phenomenon of no more than a regional scale. Using the phrase "global climate" in relation to the original concept of the earth's climate, as a natural factor that depends primarily on the angle of the sun's rays to the earth's surface, is tantamount to recognizing that the Earth is flat! The article says that the observed increase in average air temperature is incorrectly called global warming or global climate warming. In the first of these terms, the real scale of the phenomenon is exaggerated, while the second term "global climate" implies the concept of inadequate.

Keywords: climate, global climate, weather, climate system, air temperature, global warming, World ocean, current, heat advection.

Авторы посвящают эту публикацию
памяти выдающегося гидрофизика и климатолога
академика РАН Андрея Сергеевича Монина,
100-летие со дня рождения которого отмечается в 2021 г.

The authors dedicate this paper
to the memory of the outstanding hydrophysicist and climatologist,
Academician of the Russian Academy of Sciences Andrei Sergeevich Monin,
whose 100th birthday will be celebrated in 2021

ВВЕДЕНИЕ

Многих сегодня интересует вопрос о том, что же все-таки на самом деле случилось с современным климатом на Земле. Действительно ли происходит глобальное потепление и способно ли оно изменить лик нашей планеты?

Прежде чем приступить к очередному рассуждению по поводу превратностей современного климата, хотелось бы обратить внимание на то, что некоторые научные, как и многие другого рода дебаты оказываются в конечном счете бесполезными вследствие одной простой причины. А именно из-за случайного или преднамеренного несовершенства терминологии, применяемой для рассматриваемого явления. Сюда же относятся случаи непрофессиональной подмены понятий о предмете исследования, в частности путем произвольного смешения масштабов обсуждаемых объектов. Некорректные в данном отношении рассуждения можно услышать на разных уровнях и в ходе рассмотрения проблем, относящихся к современному климату. В этой связи обращает на себя внимание не всегда к месту употребляемое прилагательное «глобальный» в сочетании с понятиями «климат» и «потепление климата». Поскольку безоговорочное использование такого рода словесных конструкций может иметь весьма серьезные и далеко идущие последствия, хотелось бы еще раз уточнить существующее представление о физическом смысле термина «глобальный климат» и производного от него «глобальное потепление климата». При этом надо особо отметить, что наши нижеследующие рассуждения на эту тему адресуются в первую очередь обычным любителям природы и всем тем остальным согражданам, которые с различными целями проявляют заботу о здоровом состоянии окружающей среды и от которых в той или иной степени зависит решение вопросов о климатической безопасности современной цивилизации. Обращаем внимание на то, что среди потенциально заинтересованных данной проблемой лиц мы сознательно не упомянули профессиональных климатологов, полагаясь на их исчерпывающую осведомленность по данному вопросу.

Итак, прежде всего полезно обратиться к основному понятию о земном климате, наблюдаемые изменения которого с некоторых пор затрагивают буквально всех. Ведь надо полагать, что от того, насколько адекватное содержание вкладывается в понятие о климате, во многом зависят не только требуемая объективность оценки его состояния, но и то, что особенно важно для всех – способы решения наиболее животрепещущих климатических проблем современности.

ЧТО ТАКОЕ КЛИМАТ И КАКОВО СООТНОШЕНИЕ ПОНЯТИЙ О КЛИМАТЕ И ПОГОДЕ

Существует несколько определений понятия «климат», сформулированных несколькими известными российскими и зарубежными климатологами. Сущность всех этих определений более или менее одинакова и заключается в констатации некоторой функциональной зависимости явлений климата и погоды. Известной популярностью среди отечественных естествоиспытателей пользуется классическое определение климата, данное в свое время выдающимся гидрофизиком академиком А.С. Мониным с соавторами [1–2].

Климат, по Монину, это статистический ансамбль текущих погодных ситуаций за достаточно длительный промежуток времени. Если это определение принять за аксиому, то отсюда следует, что основным показателем, или фактором, климата конкретной местности является средняя за определенный временной интервал характеристика различных параметров природной среды, объединяемых понятием «погода». Разумеется, климат обладает еще целым рядом дополнительных черт. Среди них в первую очередь следует назвать дисперсию, или разброс значений показателей погоды в пределах ее временно́го ряда (температуры, влажности, атмосферного давления, ветра и т.д.), который принят в расчет для определения параметров соответствующего климата. Но если не вдаваться здесь в более детальные подробности смыслового описания климата, то его приведенное выше определение можно считать вполне адекватным и приемлемым. На основе этого простого понятия, облеченного в соответствующую алгоритмическую форму, специалисты ведут сложные теоретические исследования, занимаются моделированием климата и создают разные способы его прогнозирования [3]. Однако при более внимательном рассмотрении оказывается, что приведенное выше понятие о климате содержит в себе двойной смысл. С одной стороны, для его определения используются данные о реальной погоде – конкретном природном явлении, которое есть физически воспринимаемый материальный объект, познаваемый нами в ощущениях. И в то же время в каждом из ряда элементов ансамбля конкретных погодных ситуаций присутствует средняя по этому ряду величина – стационарная характеристика климата. В итоге получается, что, с точки зрения непосредственного осязания живыми существами, климат это не явление прямого действия, а опосредованное понятие – фактически некоторое отвлечение, которое для человека проявляется не в контактных ощущениях, а, представляемое в условной аналитической форме, воспринимается лишь с помощью его мыслительных возможностей, как некая абстрактная категория.

В физическом смысле, по логике вещей и по определению академика Монина климат есть всегда производное от первоосновы – погоды, но не наоборот, как считают некоторые участники «климатических» дискуссий! В соответствии с актуальным содержанием этого определения климат это не какой-то системный природный процесс, а лишь наиболее общая статистическая оценка погоды, характеристика, фактически предложенная для более удобной ориентации человека в мире явлений окружающей его природы. Иначе говоря, погода как реальный атрибут природной среды всегда первична, а климат – результат аналитического обобщения ее характеристик – по отношению к ней вторичен. Следовательно, расхожее мнение о том, что «плохая» (аномально жаркая, слишком холодная, чересчур дождливая и пр.) погода есть *следствие* изменения климата, в частности его потепления или похолодания, является несостоятельным. Но когда в «климатических» спорах и дискуссиях по какому-то случаю допускается некорректная подмена важных предметных понятий, то их зависимость между собой и их причинно-следственные связи произвольно обращаются наоборот по отношению к реальному ходу событий. По-видимому, в подобной ситуации кое-где возникают неверные представление и утверждение о том, что погода *зависит* от климата. При этом очевидно, что характеристики конкретной погоды не зависят, но могут быть весьма близки по величине к соответствующим параметрам климата лишь постольку, поскольку все его характеристики – это не что иное, как результат соответствующих расчетов по ряду ее предшествующих состояний.

СООТНОШЕНИЕ ПОНЯТИЙ О КЛИМАТЕ И ПОГОДЕ

Погодные условия, разные в каждом отдельном регионе Земли, формируются на основе сложного взаимодействия множества различных внешних и внутренних природных и антропогенных факторов. Определенная совокупность этих факторов, в состав которых кроме земных входят и астрофизические, называется климатической системой. В триаде понятий погода – климат – климатическая система существует следующая «иерархия»: погода – это функция климатической системы, климат – функция погоды, а климатическая система – это, по сути, вся так называемая окружающая среда, находящаяся под воздействием антропогенных и астрофизических факторов. При фактологическом сходстве оценочных элементов климата и погоды кроме несовпадения временны́х масштабов существа этих понятий имеется по крайней мере еще одно весьма существенное их качественное различие. Дело в том, что представление о погоде складывается из адекватной оценки реальных характеристик конкретного физического процесса, в то время как объявляемые для общего сведения параметры климата соответствующего региона это собирательный образ осредненного по времени состояния некоторых гидрометеорологических параметров природной среды, вычисляемого по данным длительного временно́го ряда наблюдений за погодными условиями.

Текущие эпизодические отклонения этих условий от так называемой нормы тем не менее прямого отношения к климату как к средней статистической погоде не имеют. Все наблюдаемые погодные аномалии определяются сбоями или возмущениями в динамике климатической системы в целом либо они связаны с нарушением условной климатической функции каких-то ее отдельных элементов. Обратная связь в отношении климата и погоды может быть формально прослежена лишь в том случае, если предшествующий данному моменту климат, в оценке которого еще не успели учесть текущую погоду, случайно в точности соответствует характеристикам этой реальной погоды. Естественная эволюция в совокупности с эпизодическими возмущениями в динамике климатической системы ведет к наблюдаемым отклонениям характера реальной погоды от ее климатической «нормы», что в последующем анализе приводит к изменению оценочных параметров очередного состояния климата.

Таким образом, рассуждая о превратностях современного климата (виртуальный фактор), следует иметь в виду, что волнующие народ и ученых-синоптиков погодные аномалии (реальный фактор) есть прямое следствие соответствующих возмущений в актуальной динамике климатической системы (реальный фактор). Из чего в конечном счете состоит действующая структура и как работает многосвязный «механизм» климатической системы Земли – ученым известно пока еще лишь в самом общем виде. Некоторые важные климатообразующие факторы, по-видимому, до сих пор остаются за кадром, что резко снижает качество современных прогнозов погоды и, соответственно, климата.

О ФАКТОРЕ ГЛОБАЛЬНОСТИ В ОБСУЖДАЕМЫХ ПРОБЛЕМАХ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА

Под влиянием «работы» физического механизма климатической системы реальная погода здесь и сейчас, как уже упомянуто, определяется, в частности, конкретными синоптическими процессами в атмосфере. Учитываемое в стандартных наблюдениях за погодой пространство воздействия этих процессов имеет региональный масштаб, который в каждом отдельном случае простирается в пределах нескольких сотен километров. Отсюда следует, что физический смысл весьма популярного термина «*глобальный климат*» не соответствует известному общепринятому понятию о климате как о *средней статистической погоде*. В противном случае в рамках классической концепции климата пришлось бы говорить о существовании эфемерной всеобъемлющей, глобальной погоды, в то время как реальная погода на Земле в каждом ее регионе разная. А раз так, то и классическое определение климата, предложенное А.С. Мониным [4] для общего употребления – статистический ансамбль погодных ситуаций, – понятие, относящееся к явлению сугубо регионального или же локального масштаба.

Возникает вопрос о том, на каком основании и с какой целью используется словосочетание «глобальный климат». Не исключено предположение о том, что в таком случае либо оратор, повествующий о климате, не понимает сам, о чем у него идет речь, либо здесь происходит невольная или произвольная подмена понятий. На самом деле в логическом и физическом смысле термин «глобальный климат» не имеет ни теоретического, ни тем более реального практического климатологического содержания. Из-за этого, до некоторой поры скрытого, недоразумения прослеживается некий парадокс, формально якобы заключающийся в следующем. Действительно, вроде бы ни у кого нет возражения против существования так называемой *глобальной климатической системы*, а мы здесь утверждаем, что производный от нее *глобальный климат* – понятие неадекватное. Так что же в данном смысле имеет место в природе на самом деле? Понятие о глобальной климатической системе вполне закономерно отражает реально существующий природный комплекс (океан, атмосфера, континенты, растительный и животный мир и пр.), проявляющий себя в климатическом отношении на основе существования множественных нелинейных связей между его отдельными элементами. При этом известная фазовая определенность интегральной климатической функциональности данной системы в конечном счете реализуется в непосредственном человеческом восприятии не иначе как текущая погода в региональном масштабе.

Результаты объективных оценок состояния различных природных геосфер говорят о том, что глобальный природный комплекс, из которого состоит климатическая система Земли, в свою очередь представляет собой совокупность нескольких взаимодействующих региональных подсистем. Так называемая деятельность каждой из них определяет текущую региональную погоду, статистика которой дает возможность специалистам рассчитывать одну из условных характеристик текущего состояния природной среды – обладающий определенными специфическими региональными особенностями климат определенной местности. Где, как и когда изначально формируются характерные свойства воздушных масс, определяющие основные черты погоды и, соответственно, климата конкретной местности (региона) – вопрос особый.

Здесь будет нелишне вспомнить о происхождении слова «климат», что по-гречески означает наклон. Предложившие это название древние естествоиспытатели имели в виду наклон солнечных лучей по отношению к земной поверхности. При этом они полагали, что этот наклон определяет общий характер погодных условий определенной местности на Земле, то есть региональный климат. И действительно, впоследствии было неоднократно экспериментально показано, как этот ключевой астрогеофизический фактор приводит к возникновению на Земле климатической зональности, то есть к существованию разных типов климата в зависимости от географической широты конкретного региона. В современной климатологии различают климаты полярных регионов, средних широт, тропической зоны и др. [4]. Причем в пределах одной конкретной широтной зоны климат может быть неодинаковым в различных по долготе регионах, например в Западной Европе и в Центральной Сибири, находящихся в одной широтной полосе. Последний фактор во многом связан с явлением адвективного перераспределения тепловой энергии в системе циркуляции крупномасштабных потоков вод Мирового океана, где есть теплые и холодные течения, оказывающие климатическое влияние на прилегающие части материковой суши.

Все сказанное выше позволяет заключить, что в системе адекватных научных терминов вполне оправданно существует понятие «*региональный климат*», которому соответствует реальное физическое содержание. Далее по каскаду нисходящих масштабов может быть климат определенной достаточно обширной местности или даже отдельного крупного города, например Москвы. Все это вынуждает высказать предположение, что на каком-то этапе развития климатологии возникла терминологическая неточность, переросшая впоследствии в очевидную подмену понятий. И вместо термина «*земной климат*» (как природный процесс на Земле, имеющий повсеместное, глобальное распространение, но существенно разный в ее различных регионах), с чьей-то легкой руки стали применять название «*глобальный климат*». Поскольку, как показано ранее, классическому определению климата данный термин не соответствует, надо полагать, что обозначенное словосочетание на самом деле могло бы означать не среднюю величину из всех региональных климатов планеты, как это порой в настоящее время некорректно вкладывается в содержание термина «*глобальный климат*», а их полный набор. Или, точнее, некую структуру, в рамках которой региональные климатические системы взаимодействуют между собой на основе множественных нелинейных связей. На самом деле, исходя из соображений обычной нормальной логики, только в этом смысле и следовало бы понимать значение указанного термина.

Так что если впредь кто-то услышит рассуждения о превратностях современного климата и погоды, пусть вспомнит, что согласно классическому определению (по Монину), отражающему реальное состояние природной среды, такие понятия, как *глобальный климат* и *глобальная погода* не следует воспринимать в их прямом, буквальном смысле, который придается этим терминам их изобретателями. Во всех возможных случаях оба эти названия нужно относить к разряду метафорической терминологии, с помощью которой можно единственно констатировать лишь существование на планете Земля природных и виртуальных явлений, называемых погодой и климатом.

ПОТЕПЛЕНИЕ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА

В последнее время иногда приходится слышать, как известные погодные катаклизмы некоторыми природоведами ассоциируются с современным *глобальным потеплением*. Основанием для вывода о существовании этого потепления служит такое состояние природной среды, когда сравнительно короткопериодные положительные аномалии температуры воздуха, появляющиеся в отдельных регионах, в среднемноголетнем аспекте суммарно могут преобладать над такого же типа отрицательными аномалиями, наблюдаемыми на иных территориях [5]. В результате при расчете по такого рода данным средней температуры за определенный промежуток времени обнаруживается так называемое *глобальное потепление*. Другими словами, выявляемый в результате расчета внутривековой рост средней температуры приповерхностного воздуха на Земле обязан своим происхождением положительной разности от сложения термических аномалий различных знаков, по каким-то причинам дискретно, циклически или непрерывно возникающих в различных частях нижнего слоя земной атмосферы. Суммарное преобладание положительных температурных аномалий над отрицательными в отдельные временны́е интервалы и есть та основа, на которой в результатах соответствующих расчетов появляется фактически *виртуальное глобальное потепление* [6]. Именно эти положительные аномалии, осредненные за последнее столетие, вносят основной вклад в оценочный глобальный положительный внутривековой тренд температуры, по которому судят о возрастании средней приповерхностной температуры воздуха на планете.

Рост температуры в таких оценках действительно присутствует. Но вот насколько это явление на самом деле глобально – вопрос остается открытым. Дело в том, что наряду с расчетным положительным температурным трендом на Земле в целом, в отдельных ее районах реальный климатический режим имеет иной характер. Известно, что в период современного *глобального* потепления в некоторых регионах, может быть, кое-где в канадской Арктике или в некоторых областях Антарктики, а возможно, в отдельных регионах Сибири и в ряде других мест на планете отмечается аномально *низкая* средняя температура воздуха. Если это действительно так, а отдельные свидетельства тому имеются, то надо полагать, что под широко распространенным термином «*глобальное потепление*», по-видимому, должно скрываться отнюдь не глобальное явление, а нечто иное. И действительно, данные непосредственных наблюдений и расчетов показывают, что никакого современного *глобального*, то есть *повсеместного на всей земной поверхности*, потепления в физическом смысле не существует. Этот вывод достаточно наглядно проиллюстрирован одной из многих типичных карт [7], показывающих анизотропную пространственную структуру такого рода температурных аномалий у земной поверхности. Рассчитываемый на основе таких данных положительный тренд средней температуры приземного воздуха – это на самом деле свидетельство того, что в некоторых довольно многочисленных областях на нашей планете действительно имеет место *локальный* рост температуры воздуха, при включении в суммарный расчет дающий положительный вклад в виртуальную среднюю глобальную температуру. Некорректное смешение результатов климатических последствий процессов регионального и глобального масштабов всегда приводит к нереальным и глубоко ошибочным выводам.

Так, например, исходя из реальной оценки климатической роли природных процессов различных масштабов, совершенно нелогично, как это нередко делается, приписывать исчезновение льда в Арктике влиянию глобального потепления. На самом деле с точностью до наоборот последнее возникает в расчетах климатологов в том числе потому, что в регионе Северного Ледовитого океана по не выясненной пока причине повышается температура приземного воздуха или поверхностной морской воды, из-за чего эпизодически исчезает ледяной покров [8].

Если бы существовало действительно *глобальное* потепление, это, с физической точки зрения, должно было бы означать, что вследствие некоего климатического процесса планетарного масштаба температура воздуха аномально растет повсеместно, условно говоря, в каждой точке *всей* земной поверхности. Ведь потепление-то глобальное! Но в реальности все обстоит несколько иначе: в период современного *глобального потепления* выявляемый аналитической диагностикой внутривековой тренд роста средней температуры приповерхностного воздуха реально ощущается исключительно в региональном аспекте. Потому что современное глобальное потепление возникает не в природе, а в некотором виртуальном смысле после несложного расчета, вывод из которого интерпретируется с подменой понятий «глобальное» и «региональное». При этом процесс регионального характера (эпизодическое уменьшение размера ледового покрова в восточном секторе Арктического бассейна) некорректно квалифицируется как фактор, отражающий более продолжительное явление глобального порядка («глобальное потепление»).

В заключение обратим внимание на то, какой смысл иногда вкладывается в понятие о глобальной средней температуре приповерхностного воздуха. С одной стороны, в интересующем всех климатологическом плане ее величина, по идее, должна быть ключевым параметром некоего среднего в пределах всей планеты свойства окружающей среды, если бы оно имело реальную основу – так называемого *глобального климата*. С другой стороны, выше было показано, что термин «глобальный климат» не имеет адекватного физического содержания, и его следует отнести к «понятиям» из области мистификаций. Тем не менее с использованием подобной терминологии на основе тенденции роста расчетной средней глобальной температуры на Земле некоторыми аналитиками делаются попытки дать прогноз, насколько в ближайшем будущем вырастет эта температура в каждом отдельном регионе. Причем при изготовлении подобных прогностических предположений едва ли учитывается тот факт, что отмечаемый рост средней на планете температуры, как уже говорилось, не обязательно сопровождается ее положительным трендом во всех без исключения регионах [9], что прослеживается на многих картах, подобных опубликованной на сайте Национальных центров экологической информации США (National Centers for Environmental Information) [7]. Так что возникающие порой без учета региональных особенностей этого фактора прогнозы климатических последствий недостаточно обоснованно называемого *глобальным* потепления климата для каждого отдельного региона Земли могут оказаться не только весьма далекими от реальности, но и просто заведомо ошибочными.

Как показывают результаты многолетнего климатического мониторинга состояния природных сред [10], цикличный характер их динамики и другие колебательные изменения различных геофизических характеристик (сезонных, инерционных, сейшевого типа и т.п.) приводят к тому, что степень соответствия элементов реальной погоды климатической норме весьма мала и в действительности может лишь изредка наблюдаться главным образом в периоды быстротекущих фазовых переходов в этих процессах. Так, например, температура приземного воздуха в регионе средних широт в наибольшей степени может приближаться к так называемой климатической норме осенью и весной, то есть в моменты естественной внутригодовой смены основных природных сезонов. В остальное время показатели погоды на большей части поверхности планеты, за исключением ее экваториально-тропического пояса, как правило, значительно отличаются в ту или иную сторону от их расчетной средней величины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вполне понятно, что в приведенных выше рассуждениях как содержание, так и сама форма изложения сути вопроса о смысле терминов «*климат*», «*глобальный климат*» и «*глобальное потепление*» несколько условны и сознательно упрощены. Некоторая степень условности предмета такого обсуждения определяется также и общим абсолютным несовершенством существующих на сей день знаний об окружающей природе, о закономерностях функционирования которой современному человеку до сих пор известно далеко не все. Положение это, как мы попытались здесь показать, искусственно усугубляется неадекватностью некоторых важных терминологических определений, широко используемых в «климатологических» дискуссиях. С этим связано и вынужденное упрощение приведенных в работе рассуждений о рассматриваемых природных процессах, без чего едва ли бы удалось в наиболее общем, «заостренном», виде обозначить вопрос о *глобальности* современного климата, как нам представляется, одной из жизненно важных проблем современного природоведения. Понятно, что на самом деле процессы формирования таких природных явлений, которые еще нашими далекими предками стали называться *погодой* и *климатом*, физически настолько сложны, что возможностей человеческого разума оказывается порой недостаточно для создания адекватного алгоритма, абсолютно точно и всесторонне описывающего данные события. Может быть, и все существующие математические климатические модели пока еще весьма далеки от совершенства, поскольку до сих пор никому не удалось создать адекватную физическую модель современной климатической системы и описать ее реальную динамику. А раз так, то все прогнозы текущей погоды еще долго будут представлять большую проблему как для тех, кто их производит, так и для всех потребителей результатов такого прогнозирования. Тем важнее находить возможность вовремя избавляться от иногда искусственно создаваемых самими же естествоиспытателями мистификаций, в частности в области непрерывно совершенствующихся знаний о климате и погоде.

Погода и климат – что от чего зависит, что первично и что вторично? Ответ на этот вопрос заключается в структурной основе современной климатической парадигмы, базирующейся на классической концепции климата, в которой представлена общепризнанная климатическая триада в следующей иерархической конфигурации: климатическая система – погода – климат. Отсюда следует, что при том значении термина «*климат*», которое ему присуще по определению, первичной является *погода*, в то время как соотношение этих двух понятий вопреки здравому смыслу часто трактуется наоборот. Но, как бы там ни было, надо понимать климатическую парадигму так, что климат это аналитическое понятие, то, чего нельзя измерить, но можно только вычислить на основе данных о погоде. В правильном понимании того, что сейчас принято называть климатом, это статистика погоды, ее средние характеристики и их дисперсия по некоторому ряду пространственно-временных масштабов.

По существующей статистике определенных характеристик состояния природной среды в конкретном месте за конкретный период можно сделать с определенной статистической погрешностью предположение (прогноз) о возможном характере предстоящей погоды. Однако реальная погода не может быть привязана с достаточной точностью к существующему на данный момент представлению о климате до тех пор, пока в нем не успели учесть ее текущее состояние. Другими словами, неправильно считать, что завтрашняя погода якобы должна в идеале укладываться в существующие по определению климатологов рамки их сегодняшнего представления о климате. Погода, являясь «продуктом деятельности» климатической системы, связана с этим климатом гносеологически, но не функционально. Поэтому вне зависимости от так называемой климатической нормы она может быть какой угодно «ненормальной» и абсолютно непредсказуемой из-за возможных случайных внезапных сбоев в динамике этой системы (природные катаклизмы, глобальные антропогенные катастрофы и другие, в том числе пока не объяснимые экстраординарные ситуации). Так что, фигурально выражаясь, если в разгар летней жары вдруг ударит мороз и закрутит вьюга – это не климат внезапно изменился. Для нас он изменится только завтра, когда начнется новый рабочий день и на вахту заступят стражи погоды – метеорологи, в обязанности которых наряду с прочим входит оперативная корректировка параметров климата с учетом текущей погоды.

Публикация подготовлена Г.Г. Матишовым в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гр. проекта АААА-А18-118122790121-5, В.Г. Нейманом в рамках реализации ГЗ ИО РАН № гр. проекта 0149-2019-0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монин А.С., Шишков Ю.А. 1979. *История климата.* Л., Гидрометеоиздат: 407 с.
2. Монин А.С., Сонечкин Д.М. 2005. *Колебания климата по данным наблюдений. Тройной солнечный и другие циклы.* М., Наука: 192 с.
3. Монин А.С. 1969. *Прогноз погоды как задача физики.* М., Наука: 184 с.
4. Монин А.С. 1982. *Введение в теорию климата.* Л., Гидрометеоиздат: 246 с.
5. Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В. 2009. О пространственной неоднородности глобальной изменчивости некоторых параметров современного климата. *Доклады Академии наук.* 426(4): 543–548.
6. *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge – New York – Melbourne – Madrid – Cape Town – Singapore – São Paolo – Delhi, Cambridge University Press: 996 p.
7. *NOAA. National Centers for Environmental Information. National Oceanic and Atmospheric Administration.* Available at: https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/service/global/map-blended-mntp/201902.gif (last update 15 April 2020).
8. Матишов Г.Г., Дженюк С.Л., Моисеев Д.В., Жичкин А.П. 2010. Климатические изменения морских экосистем европейской Арктики. *Проблемы Арктики и Антарктики.* 3(86): 7–21.
9. Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А. 2006. О существенных различиях крупномасштабных изменений приземной температуры над океанами и материками. *Океанология.* 46(2): 165–177.
10. Матишов Г.Г. 2008. Влияние изменчивости климатического и ледового режимов на судоходство. *Вестник Российской академии наук.* 78(10): 896–902.

REFERENCES

1. Monin A.S., Shishkov Yu.A. 1979. *Istoriya klimata.* [*The history of climate*]. Leningrad, Gidrometeoizdat: 407 p. (In Russian).
2. Monin A.S., Sonechkin D.M. 2005. *Kolebaniya klimata po dannym nablyudeniy. Troynoy solnechnyy i drugiye tsikly.* [*Climate fluctuations based on observational data. Triple solar and other cycles*]. Moscow, Nauka: 192 p. (In Russian).
3. Monin A.S. 1969. *Prognoz pogody kak zadacha fiziki.* [*Weather forecast as a physics problem*]. Moscow, Nauka: 184 p. (In Russian).
4. Monin A.S. 1982. *Vvedeniye v teoriyu klimata.* [*Introduction to the theory of climate*]. Leningrad, Gidrometeoizdat: 246 p. (In Russian).
5. Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., Serykh I.V. 2009. On the spatial nonuniformity of some parameters of global variations in the recent climate. *Doklady Earth Sciences*. 426(1): 705–709. doi: 10.1134/S1028334X09040436
6. *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge – New York – Melbourne – Madrid – Cape Town – Singapore – São Paolo – Delhi, Cambridge University Press: 996 p.
7. *NOAA. National Centers for Environmental Information. National Oceanic and Atmospheric Administration.* Available at: https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/service/global/map-blended-mntp/201902.gif (last update 15 April 2020).
8. Matishov G.G., Dzhenyuk S.L., Moiseev D.V., Zhichkin A.P. 2010. [Climatic changes of the European Arctic marine ecosystems]. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* 3(86): 7–21. (In Russian).
9. Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A. 2006. On the essential differences between the large-scale variations of the surface temperature over the oceans and continents. *Oceanology*. 46(2): 147–158. doi: 10.1134/S0001437006020019
10. Matishov G.G. 2008. [Influence of climate and ice variability on navigation]. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk.* 78(10): 896–902. (In Russian).

Поступила 14.07.2020

УДК 910.1: 338.2
DOI: 10.7868/S25000640200402

РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ РАЦИОНАЛЬНОГО МОРСКОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ [1]

© 2020 г. Академик Г.Г. Матишов[1, 2], Г.Д. Титова[3]

Аннотация. Обсуждено развитие научных основ рационального морского природопользования, которое требует адекватного понимания новых черт, отражающих изменения в функционировании морских экосистем в меняющихся природных условиях и при растущем прессе антропогенного воздействия. Для осуществления рационального морского природопользования необходимо фундаментальное понимание явлений и процессов, происходящих в морях и океанах. Рассмотрены вопросы: что является основным объектом управления в морепользовании; что представляет собой интегрированное (комплексное) управление морской экосистемой; в чем заключается суть экосистемного подхода в морепользовании; каков арсенал средств, входящий в экономическую составляющую рационального морепользования. Проведенный анализ позволил сформулировать наиболее перспективный инструментарий обеспечения устойчивого экологически безопасного развития морской экономики. К нему отнесены: интегрированное (комплексное) управление морепользованием с использованием экосистемного подхода, морское пространственное планирование, применение предосторожного подхода в планировании морской деятельности, направленного на снижение экологических рисков в зонах экстремальных климатических условий, оценка услуг морских экосистем в системе принятия управленческих решений в морепользовании. Совершенствование перечисленного инструментария должно стать целью научного поиска по созданию теории управления морским природопользованием.

Ключевые слова: научные основы, рациональное морепользование, интегрированное управление, экосистемный подход, услуги экосистем.

THE DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC BASIS OF MARINE NATURAL RESOURCE USE

Academician RAS G.G. Matishov[1, 2], G.D. Titova[3]

Abstract. The paper discusses the development of scientific basis of marine natural resource use. The authors believe that rational marine environmental management requires an adequate understanding of features that reflect changes in the functioning of marine ecosystems under changing natural conditions and the growing pressure of anthropogenic impacts. A fundamental understanding of the phenomena and processes occurring in the seas and oceans is necessary for the transition to such marine use. The authors try to answer the following questions: what is the main object of management in marine use; what is the integrated management of the marine ecosystem; what is the essence of the ecosystem approach in marine use; what is the range of tools included in the economic component of rational marine use. The analysis carried out in the article allowed the authors to formulate the most promising tools for ensuring sustainable and environmentally safe development of the marine economy. It includes: integrated management of marine activities using an ecosystem approach, marine spatial planning, application of a precautionary approach in planning marine activities aimed at reducing

[1] Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: matishov_ssc-ras@ssc-ras.ru

[2] Мурманский морской биологический институт Российской академии наук (Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17

[3] Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук (St Petersburg Scientific Research Center for Ecological Safety of the Russian Academy of Sciences, St Petersburg, Russian Federation), Российская Федерация, 197110, г. Санкт-Петербург, ул. Корпусная, 18

[1] **Оригинальный текст:** *Матишов Г.Г., Титова Г.Д.* Развитие научных основ рационального морского природопользования // Наука Юга России. 2020. Т. 16. № 4. С. 9–18.

environmental risks in areas of extreme climatic conditions, assessment of marine ecosystem services in the system of management decisions in marine use. The authors conclude that the improvement of these tools should be the goal of scientific research to create a theory of marine environmental management.

Keywords: scientific foundations, rational use of the sea, integrated management, ecosystem approach, ecosystem services.

ВВЕДЕНИЕ

Во второй половине XX века моря и океаны планеты подверглись беспрецедентному антропогенному воздействию. Появились многочисленные признаки критического истощения запасов основных промысловых биоресурсов, казавшихся ранее неисчерпаемыми. Стали расти угрозы экологическому благополучию морей от загрязненных стоков из систем водосбора на суше, судоходства, подводного недропользования, захоронения различных отходов, включая радиоактивные вещества и сильнодействующие токсичные соединения, рекреационной деятельности, трансграничного переноса загрязнений атмосферы, связанных с выбросами устойчивых органических веществ, тяжелых металлов, соединений серы и азота промышленными, энергетическими и транспортными источниками и т.д. В целом же антропогенная деятельность на побережьях и в прибрежных морях стала все больше воздействовать на морские экосистемы, не только вызывая потери биоразнообразия, сокращая трофические цепи, разрушая среду обитания и береговые линии, но и оказывая влияние на климат [1].

Тревожные тенденции деградации океанов и морей впервые были отражены в документах Стокгольмской конференции ООН по окружающей среде (1972 г.), после которой мировое сообщество приступило к поиску способов противодействия этому явлению в глобальном масштабе.

Этот поиск привел к созданию научных основ рационального морского природопользования, которые стали развиваться в рамках концепции устойчивого развития, принятой на Конференции ООН по окружающей среде и развитию в Рио-де-Жанейро в 1992 г. Анализ становления этих основ, выполненный в работе [2], свидетельствует о том, что принятый в 1992 г. мировым сообществом экологический императив был заявлен в России задолго до принятия концепции устойчивого развития в международном масштабе. Успех концепции устойчивого развития в России обусловлен близостью ее к отечественной концепции рационального природопользования.

Рациональное морское природопользование требует адекватного понимания новых черт, отражающих изменения в функционировании морских экосистем в изменяющихся природных условиях и при растущем прессе антропогенных воздействий. Для осуществления рационального морского природопользования необходимо фундаментальное понимание явлений и процессов, происходящих в морях и океанах. Такого понимания нет, поскольку до сих пор не создана теория управления морскими экосистемами, на неотложную необходимость разработки которой впервые было обращено внимание еще в 1998 г. в докладе академиков М.Е. Виноградова, Г.Г. Матишова и Д.С. Павлова на заседании Президиума РАН [3].

С наступлением XXI века актуальность развития теории управления морскими экосистемами обострилась, поскольку в Мировом океане усугубились практически все отмеченные выше экологические проблемы. К ним присоединилось и глобальнее потепление климата, создающее новые возможности для развития бизнеса в Арктике. Многие государства планируют активизировать свое участие в освоении арктических пространств и ресурсов. Это несет дополнительные угрозы для уязвимых экосистем арктических морей. Поэтому столь необходимо выстраивать эффективный экономический и институциональный механизм их защиты от антропогенных воздействий, который бы соответствовал международным обязательствам России. В отсутствие этих механизмов воздействие экономических факторов на «здоровье» морских экосистем в России игнорируется.

Задача данной статьи – обсудить, как развивались основы рационального морского природопользования в последние два десятилетия, и раскрыть основные составляющие теории рационального природопользования, а именно показать:

– что является основным объектом управления в морепользовании;

– что представляет собой интегрированное (комплексное) управление морской экосистемой;

– в чем заключается суть экосистемного подхода в морепользовании;

– каков арсенал средств, входящий в экономическую составляющую рационального морепользования.

МОРСКИЕ ПРИРОДНО-ХОЗЯЙСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

В качестве объекта управления в морепользовании могут рассматриваться как отдельные физико-географические объекты (моря, заливы и т.д.), так и морские экосистемы, в том числе так называемые большие морские экосистемы [2].

Еще в 1999 г. академик В.А. Котляков обратил внимание на то, что для реализации концепции устойчивого развития необходимо выстраивать систему защиты природных экосистем в границах эколого-экономических систем (ЭЭС) или природно-хозяйственных систем (ПХС), то есть при принятии управленческих решений наряду с экологическими факторами должны учитываться и экономические факторы [4]. В этих системах функционирование общественного производства рассматривается в тесной связи с обусловленными им природными процессами. Иными словами, ЭЭС и ПХС – это интеграция экономики и природы, представляющая собой взаимосвязанное и взаимообусловленное функционирование общественного производства и протекание естественных процессов в природе.

Введение масштабов промышленной деятельности в рамки ассимиляционной емкости природных систем и рациональное использование и воспроизводство природных ресурсов – основное целевое предназначение устойчивого функционирования ЭЭС и ПХС.

В работе [2: 29] сформулированы требования к морскому объекту управления, который должен:

«– представлять собой целостный физико-географический и экосистемный объект;

– быть областью перекрывающихся экономических интересов различных пользователей;

– быть объектом регулирования минимальным количеством субъектов правоприменения».

Такому подходу более всего отвечает концепция больших морских экосистем, которая в конце 1980-х гг. была выдвинута группой американских исследователей под руководством К. Шермана и получила широкое распространение в мире [5]. Как отмечает академик В.М. Котляков [4], в географии и экологии суши накоплен достаточный опыт управления ЭЭС, чего не скажешь о морях. Признано, что наиболее эффективным методом управления ЭЭС является система комплексного интегрированного управления. Концепция интегрированного подхода включает следующие четыре элемента:

«– связи между всеми основными экосистемными компонентами в пределах выделенной акватории, водной толщи, дна и берегов (как абиотическими, так и биотическими);

– управленческие действия, которые должны планироваться и реализовываться в контексте долговременной стратегии развития;

– отношения между различными природопользователями и связанные с ними социально-экологические интересы и ценности должны рассматриваться совместно;

– территориальные противоречия природопользования, которые должны решаться путем поиска механизма трансформации корпоративных интересов в общегосударственные в целях достижения стратегического компромисса» [2: 30].

ЭКОСИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В СИСТЕМЕ ИНТЕГРИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ МОРЕПОЛЬЗОВАНИЕМ

Основным компонентом интегрированного управления морепользованием является экосистемный подход (ЭП). Концепция ЭП в управлении морской деятельностью возникла в 1980-х гг. как реакция на необходимость снижения растущих экологических угроз в морских экосистемах. Концептуально-правовые основы ЭП были заложены Всемирной хартией природы, принятой в 1982 г. Генеральной Ассамблеей ООН [6].

Принципы Хартии гласят: 1) природа должна охраняться, а основные процессы в ней не нарушаться; 2) генетическое разнообразие на Земле не должно ставиться под угрозу; 3) принципы охраны природы должны распространяться на всю Землю: на сушу и на океан; 4) все экосистемы и природные ресурсы должны использоваться так, чтобы сохранялась оптимальная устойчивая продуктивность; 5) природа должна быть застрахована от деградации, связанной с военными действиями.

Эти принципы были развиты в концепции устойчивого социо-эколого-экономического развития, принятой на Конференции ООН в Рио-де-Жанейро в 1992 г.

ЭП представляет собой управление на основе лучшего понимания экологических процессов, необходимых для восстановления и поддержания «здоровья» морских экосистем, их целостности, функций и ценностей, а также качества жизни населения посредством интегрированного управления морскими экосистемами, согласованного с целями и потребностями общества. Он направлен на содействие устойчивому развитию морской деятельности.

Международный совет по исследованию моря (ICES) закрепил рабочее определение ЭП как «всестороннее комплексное управление деятельностью человека на основе наилучших научных знаний об экосистеме и ее динамике в целях выявления и принятия мер в отношении факторов, которые имеют решающее значение для „здоровья" морской экосистемы, тем самым обеспечения устойчивое использования экосистемных товаров и услуг и поддержание целостности экосистемы» [7].

И все же, несмотря на множество нормативно-правовых актов, принятых в целях внедрения ЭП в практику управления морепользованием, спустя 10 лет после Конференции ООН Рио-1992 ЭП не стал основным компонентом концепции устойчивого развития. Сложившаяся ситуация подвигла группу ученых из университетов и морских колледжей США в 2005 г. подготовить для Конгресса США, научных изданий и СМИ заявление о консенсусе по проблеме управления морской деятельностью на основе экосистемных подходов. Заявление подписали более 220 авторитетных исследователей, изучающих проблемы Мирового океана.

В заявлении в популярной форме изложено, что представляют собой морские экосистемы и объяснены выгоды от их рационального использования, получаемые обществом, показаны цели экосистемного управления, его ключевые элементы, раскрыта многошаговая процедура перехода к новой форме управления, порядок принятия управленческих решений, перечислен используемый при этом инструментарий [8].

В заявлении сказано, что управление морской деятельностью на основе экосистемного подхода:

– сконцентрировано на сохранении структуры экосистемы, ее услуг и функций в установленных границах (при этом объектом управления может быть не только экосистема в целом, но и ее отдельный участок);

– сосредоточено на оценке совокупного уровня воздействия всех морских секторов на состояние экосистемы;

– учитывает взаимосвязи и взаимовлияния разных видов гидробионтов в границах экосистемы, признает важность оценки взаимовлияния как между целевыми (используемыми промыслом), так и нецелевыми видами;

– принимает во внимание взаимосвязь морской экосистемы с другими экосистемами (воздушными, наземными, пресноводными);

– признает экологические, социальные, экономические и институциональные перспективы устойчивого развития всех секторов морской деятельности и их взаимодействие при достижении общей цели.

Такой целью является поддержание морской экосистемы в здоровом, производительном и эластичном состоянии для обеспечения современных и будущих потребностей человека в производимых экосистемой услугах.

Столь авторитетное заявление дало толчок к разработке большого числа руководств для практической реализации идеи экосистемного управления морской деятельностью.

В последние 30 лет принципы ЭП все шире внедряются в практику обеспечения долгосрочного устойчивого использования природных ресурсов и охраны окружающей среды. Внедрение показало, что экосистемному управлению свойственны следующие черты: фокусирование на долгосрочной устойчивости ресурсов; поддержание и улучшение структуры биоразнообразия; мышление в широком пространственном и временном масштабах; интеграция экономики, социологии и экологических систем в процесс планирования; корректировка планов управления в связи с мониторингом и новой информацией; признание сложности взаимодействия экосистем; признание того, что люди являются частью экосистемы.

В настоящее время методы ЭП в планировании морской деятельности успешно развиваются в США, Австралии, Норвегии, Канаде, Мексике, на Филиппинах, в Сенегале, в странах Балтии [7]. Но наиболее последовательно эти методы применяются в Великобритании, где для практической реализации их в 2007 г. был создан Департамент охраны окружающей среды и сельского хозяйства (DEFRA) при Министерстве энергетики и изменений климата. В 2011 г. DEFRA принят документ, повышающий общий статус ЭП для выработки политики сохранения «здоровья» морских экосистем и применения его в широком диапазоне принятия управленческих решений [9].

DEFRA использует пять ключевых принципов использования экосистемного подхода в морской деятельности:

1. Обеспечение более целостного подхода к разработке и использованию политики с акцентом на поддержание «здоровья» и функций экосистем.

2. Учет полной стоимости экосистемных услуг в принятии управленческих решений.

3. Обеспечение соблюдения экологических ограничений в контексте устойчивого развития.

4. Принятие решений в соответствующих пространственных масштабах с учетом кумулятивных последствий этих решений.

5. Адаптивное управление морской средой, гибко учитывающее в системе планирования новых знаний о динамике морских процессов изменение природных, включая изменение климата, и социально-экономических факторов.

Эти принципы охватывают все аспекты ЭП без навязывания одного жесткого определения. Не все принципы могут быть уместны в разных ситуациях и для всех заинтересованных сторон. Это предполагает свободу выбора ЭП для конкретного случая и определенных обстоятельств.

Неотложная необходимость изучения и практической реализации ЭП в системе защиты «здоровья» морских экосистем отражена в среднесрочных программах ЮНЕП, которые относят его к важной составляющей теории управления. Так, в среднесрочной программе ЮНЕП на период 2018–2021 гг. содержится призыв к странам, правительствам и международным организациям осуществлять «экосистемный подход» надлежащим образом, поскольку не существует единого пути внедрения данного подхода. Его реализация должна зависеть от местных, районных, национальных, региональных или глобальных условий. Иными словами, каждая страна, омываемая морями, должна стремиться сохранить «здоровье» морских экосистем исходя из общих принципов, но при этом внося в них коррективы с учетом собственных особенностей: природных, состояния научного потенциала и организационно-экономических условий экосистем [10].

В последние годы разработан ряд методов внедрения ЭП в морском планировании. Они варьируют от простых качественных оценок с привлечением экспертов и картографических программ до сложных, ресурсоемких компьютерных программ с применением пространственных инструментов, таких как зонирование морских охраняемых акваторий, компьютерное программное обеспечение интеграции социальных и экономических данных с целью облегчения принятия решений, а также комплексного имитационного моделирования и моделей оценки воздействий. Для выявления взаимосвязей между видами морской деятельности также предлагается широкий спектр ГИС-технологий, которые могут использоваться для выявления потенциальных конфликтов или оказания помощи в зоне разграничения деятельности, для облегчения оценки риска кумулятивного эффекта антропогенных воздействий и т.д.

ПРИЧИНЫ, СДЕРЖИВАЮЩИЕ ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМНОГО ПОДХОДА

Несмотря на 40-летний период исследований по использованию принципов ЭП в управлении морской деятельностью, их внедрение в практику пока не принесло желаемых результатов: тенденции деградации морских экосистем продолжаются, нарастают и темпы истощения запасов гидробионтов. Анализ многочисленных публикаций по причинам незначительного эффекта от практической реализации ЭП в комплексном управлении морской деятельностью [1] позволяет назвать основные из них. К ним относятся:

– слабая осведомленность политиков и управленцев о сути и значении ЭП в системе принятия решений по морской деятельности;

– историческая инерция и традиционное сопротивление лиц, принимающих решения, нововведениям и нежелание их овладевать новыми знаниями;

– превалирование ведомственных подходов к управлению морской деятельностью;

– знания о законах функционирования морских экосистем и реакции их на антропогенные воздействия часто недостаточны для принятия научно обоснованных решений, поэтому высок риск управленческих ошибок;

– отсутствие нормативно-правовой базы для использования современных методов морского пространственного планирования при разработке стратегических планов развития и размещения морской деятельности;

– слабая проработанность методов ценностной оценки услуг морских экосистем и порядка перевода этих оценок в имеющие размерность инструменты управления;

– отсутствие во многих странах, включая Россию, политической повестки дня по содействию развитию новой области знаний – экономики морских экосистем и биоразнообразия, позволяющей комплексно решать социо-эколого-экономические проблемы в условиях планируемой активизации морской деятельности;

– конкуренция между научными школами (включая «войны» за сферы влияния между учеными от рыболовства, не желающими позволить экологам, исследователям из университетов и академических институтов иметь иной, чем у них, взгляд на проблему оценки состояния морских экосистем, к тому же воспринимающих «чужаков» конкурентами при финансировании научных изысканий). Отсюда и неразвитость программ междисциплинарных исследований, способных повысить эффективность экосистемного управления морской деятельностью.

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ МОРСКИМИ ЭКОСИСТЕМАМИ

Как отмечено в предыдущем разделе, причинами, сдерживающими внедрение ЭП в практику управления морскими экосистемами, являются недостаточная проработанность методов ценностной оценки экосистемных услуг и отсутствие во многих странах, включая Россию, политической повестки дня по содействию развитию новой области знаний – экономики морских экосистем и биоразнообразия.

Понятие «экосистемные услуги» (ЭУ) неразрывно связано с другим понятием – «природный капитал», который является одним из ключевых понятий концепции устойчивого развития. Введение понятия ЭУ значительно расширило понятие «природный капитал». Если до Конференции ООН в Рио-де-Жанейро-1992 «природный капитал» в литературе характеризовался как «совокупность природных ресурсов, стоимость которых измеряется на основе рыночных цен на сырье и товары», то после Рио-1992 под ним стала пониматься «совокупность природных активов, предоставляющих человечеству природные ресурсы (сырье) и экосистемные услуги» [11].

ЭУ – это выгоды, которые получают от экосистем люди и сами экосистемы. По международной классификации, принятой в 2010 г. и отраженной в руководствах по оценке экосистем и биоразнообразия (The Economics of Ecosystems and Biodiversity – TEEB) [12], они делятся на обеспечивающие, регулирующие, культурные и поддерживающие услуги (табл. 1).

Взгляд на природу через призму ЭУ и выгод, которые люди получают от этих услуг, создает стимулы для сохранения природного капитала. TEEB стремится привнести процедуру оценки ЭУ в основной процесс принятия решений, который является важной частью политики, связанной с бизнесом, социальным и экономическим развитием, а не только политикой, непосредственно связанной с управлением окружающей средой. Иными словами, ЭУ состоят из двух элементов: способности экосистем и биоразнообразия предоставлять услуги (биофизический и экологический элемент) и выгод от этих услуг для человека (социальный, культурный и экономический элементы) [13].

Таблица 1. Структура экосистемных услуг
Table 1. Structure of ecosystem services

Обеспечивающие услуги Provisioning services	Регулирующие услуги Regulatory services	Культурные услуги Cultural services	Поддерживающие услуги Supporting services
Пища Food	Регулирование климата Climate regulation	Природные красоты Natural beauty	Первичная продуктивность Primary productivity
Вода Water	Контроль наводнений Flood control	Духовные и религиозные / Spiritual and religious	Почвообразование Soil formation
Природное сырье Natural raw material	Регулирование болезней Disease management	Рекреация и экотуризм Recreation and ecotourism	Трофические связи Trophic relationships
Генетические ресурсы Genetic resource		Вдохновение Inspiration	Круговорот питательных веществ / Nutrient cycle
Биохимические соединения Biochemical compounds		Образовательные Educational	Ассимиляция загрязнений Assimilation of pollution
		Культурное наследие Cultural heritage	Депонирование CO_2 Deposition of CO_2

Более 9/10 выгод, получаемых от ЭУ, находится вне зоны рыночной оценки, то есть не учитывается в системе принятия решений по охране окружающей среды. Это является одной из главных причин ярко выраженной тенденции быстрой деградации планетарных экосистем, ибо нельзя эффективно управлять природным объектом, не зная его реальную экономическую ценность и выгоды, получаемые от его использования [14].

И все же каков порядок выгод, скрытых от управленцев, принимающих решения в морепользовании?

Недавние (2015 г.) оценки «активов» Мирового океана, используемых человеком, показали, что океан «работает» как одна из крупнейших национальных экономик: годовой валовый продукт экономики океана превышает 2,5 трлн долларов. По величине валового продукта экономика Мирового океана занимает седьмое место среди национальных экономик. Но это если в расчет экономики океана принимать только прямые выгоды от части обеспечивающих экосистемных услуг (рыболовство, аквакультура, биотехнологии, использование транспортом прибрежных и океанических акваторий), культурных услуг (туризм, образование) и поддерживающих услуг (депонирование CO_2), которые поддаются денежной оценке.

Если же учесть и ценные не торгуемые активы (роль океанов и морей в регулировании климата, в производстве кислорода, в стабилизации температуры на планете, а также в обеспечении духовных и культурных услуг), то дополнительные услуги окажутся на порядок выше видимого валового продукта океана. С учетом их общая ценность активов океана составит более 24 трлн долларов в год, что выше ВВП США [15].

В результате многолетнего поиска сложились принципиальные подходы к экономической оценке ЭУ. Признано, что большинство из них нельзя оценить в денежном эквиваленте. Но денежные оценки можно дополнить количественными и качественными (описательными) характеристиками. Три вида оценки были объединены общим понятием – «ценностные» оценки.

При этом термин «ценность» означает важность, значимость, полезность ЭУ как для человека, так и для окружающей среды. В данном случае ценность – не синоним рыночной цены, хотя последняя также используется для формирования общей экономической ценности экосистемных услуг. То есть вне контекста денежных оценок ценность характеризует качественные или количественные параметры тех свойств экосистемы, которые невозможно измерить в денежном выражении.

Вот как прокомментировал применяющиеся в практике методы ценностной оценки ЭУ бывший министр природных ресурсов и экологии РФ В.И. Данилов-Данильян: «Функция денежных оценок экологических благ и услуг состоит вовсе не в том, чтобы „отражать“ истинные оценки, „приближаться“ к ним и т.д., от них это не только не требуется – это в принципе им не дано. Денежные оценки – лишь операциональные средства, которые могут быть полезными... в определенных условиях. Мы можем лишь заключить условное соглашение: будем считать, что денежные оценки экологических благ и услуг удовлетворительно представляют экологические ценности, если помогают решать связанные с ними проблемы управления охраной природы» [16: 23].

На рисунке 1 в качестве примера приведена принципиальная схема оценки услуг морских экосистем (по [1]). Из него следует, что общая ценность услуг включает денежные, качественные и количественные оценки.

Поскольку быстро растет число стран, участвующих в оценке услуг морских экосистем, появились различные организации, аккумулирующие информацию по результатам оценок. Наиболее представительной среди них является Общество по услугам морских экосистем (Marine Ecosystem Services Partnership – MESP), представляющее собой виртуальный центр по сбору и обмену информацией об использовании морских экосистем в планетарном масштабе [17]. Общество основано в 2010 г. Главная функция его – оказание помощи в выработке политики устойчивого управления океаническими и прибрежными экосистемами с использованием данных по результатам оценки услуг морских экосистем.

Всего на сегодняшний день в базе MESP находится около 2 тысяч публикаций и иной информации, посвященной оценке услуг морских экосистем. Благодаря обществу оценщики разных стран могут работать сообща, обмениваясь опытом по методам оценки услуг экосистем.

Сотрудничеству помогает использование многих способов информационного сближения, включая размещение оценок на динамической карте, на которой зоны проведения работ по оценке услуг морских экосистем выделены черным цвет [17]. Карта позволяет заинтересованным лицам полу-

Рис. 1. Принципиальная схема оценки общей ценности услуг морских экосистем (по [1]).
Fig. 1. Schematic diagram for assessing the overall value of marine ecosystem services (by [1]).

чать информацию о названии проекта и его разработчиках, месте, времени проведения исследований, используемых методах и результатах оценки. Для этого пользователю достаточно щелкнуть мышью по интересующей его зоне, и он получит информацию о проведенных в ней оценках.

Анализ состояния работ по оценке услуг морских экосистем позволил установить факт, что такие работы проводятся практически во всех странах мира за исключением России – белого пятна на карте MESP.

Напомним, что рост работ по оценке услуг морских экосистем в зарубежных странах во многом обусловлен обязанностью выполнения ими международных договоров и соглашений. В 2010 г. 10-й Конференцией ООН по биоразнообразию в Нагое (Япония) было принято решение, предписывающее странам-участницам Конвенции ООН по биоразнообразию, в состав которых входит и Россия, предпринять усилия по учету стоимости природного капитала в системах национальных счетов, а также поставлена задача научиться измерять и учитывать ценность ЭУ в системах принятия управленческих решений всех уровней [18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен вопрос, каким должен быть управленческий механизм, направленный на уменьшение экологических угроз на основе использования новых знаний по защите «здоровья» морских экосистем. Анализ литературных источников позволил сделать заключение, что наиболее обстоятельный ответ на этот вопрос дан в прогнозе развития мировой морской экономики до 2030 г., который был разработан в 2016 г. при поддержке Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР). В подготовке прогноза приняли участие более 200 экспертов разных областей знаний из многих стран мира. Ими проанализированы сотни документов и научных публикаций по воздействию на морскую среду морской деятельности и изменение состояния среды Мирового океана вследствие потепления климата и подъема уровня воды и после 2030 г.: до 2050 и даже до 2100 г. [19].

В прогнозе ОЭСР обоснован наиболее перспективный инструментарий обеспечения устойчивого экологически безопасного развития морской экономики. К нему отнесены: интегрированное (комплексное) управление морской деятельностью с использованием экосистемного подхода, морское пространственное планирование, применение предосторожного подхода в планировании морской деятельности, направленного на снижение экологических рисков, особенно в зонах экстремальных климатически условий, оценка услуг морских экосистем в системе принятия управленческих решений в морепользовании. ОЭСР планирует поддерживать научные изыскания, которые направлены на совершенствование перечисленных направлений научного поиска.

Очевидно, и в России при разработке научных основ рационального морского природопользования должны найти поддержку аналогичные направления поиска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Титова Г.Д. 2012. Проблемы становления экономики морских экосистем. *Вестник Российской академии естественных наук (Санкт-Петербург)*. 16(2): 120–124.
2. Матишов Г.Г, Денисов В.В., Дженюк С.Л. 2007. Интегрированное управление природопользованием в шельфовых морях. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 3: 27–40.
3. Матишов Г.Г. 2013. Современное состояние биоресурсов и экологическая ситуация в морях Западной Арктики. *pandia.ru*. URL: https://pandia.ru/text/77/465/8765.php (дата обращения: 18.10.2020).
4. Котляков В.М. 2001. *Избранные сочинения. Книга 3. География в меняющемся мире*. М., Наука: 411 с.
5. Sherman K., Duda A.M. 1999. Large marine ecosystems: an emerging paradigm for fishery sustainability. *Fisheries*. 24(12): 15–26. doi: 10.1577/1548-8446(1999)024<0015:LME>2.0.CO;2
6. *Всемирная хартия природы*. 1982. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/charter_for_nature.shtml (дата обращения: 18.10.2020).
7. Титова Г.Д., Родионов В.З. 2017. Современные принципы реализации экосистемного подхода в морском планировании. *Региональная экология*. 3(49): 17–23.
8. *Scientific Consensus Statement on Marine Ecosystem-Based Management (signed by 221 academic scientists and policy experts with relevant expertise)*. 2005. Washington, DC, Island Press: 21 p.
9. *Marine planning*. 2011. URL: http://www.parliament.uk/documents/post/postpn388_Marine-Planning.pdf (дата обращения: 18.10.2020).
10. *UNEP medium term strategy 2018–2021*. URL: http://hdl.handle.net/20.500.11822/7621 (дата обращения: 18.10.2020).
11. Costanza R., Daly H.E. 1992. Natural capital and sustainable development. *Conservation Biology*. 6(1): 37–46.
12. *TEEB. The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature. A synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB*. 2010. Malta, Progress Press: 36 p.
13. Kettunen M., Vihervaara P., Kinnunen S., D'Amato D., Badura T., Argimon M., Ten Brink P. 2012. *Socio-economic importance of ecosystem services in the Nordic Countries. Synthesis in the context of The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB)*. Copenhagen, Nordic Council of Ministers: 290 p.
14. Титова Г.Д. 2014. Понятие «природный капитал», развитие методологии и методов его экономической оценки. *Вестник СПбГУ. Серия 7. Геология. География*. 1: 114–124.
15. *Reviving the Ocean Economy: the Case for Action-2015*. 2015. Gland, Geneva, WWF International: 60 p.
16. Данилов-Данильян В.И. 2010. Экологические ценности и экономические оценки. В кн.: *Экономика экосистем и биоразнообразия: потенциал и перспективы стран Северной Евразии: Материалы совещания TEEB – экономика экосистем и биоразнообразия: перспективы участия России и других стран ННГ (Москва, 24 февраля 2010 г.)*. М., изд-во Центра охраны живой природы: 19–26.
17. *Marine Ecosystem Services Partnership*. URL: http://www.marineecosystemservices.org/ (дата обращения: 18.10.2020).
18. *План действий ООН по защите живой природы на 10 лет принят в Нагое*. URL: http://ecoportal.su/news.php?id=49562 (дата обращения: 18.10.2020).
19. OECD. 2016. *The Ocean Economy in 2030*. Paris, OECD Publishing: 256 p. doi: 10.1787/9789264251724-en

REFERENCES

1. Titova G.D. 2012. [Problems of formation of the economy of marine ecosystems]. *Vestnik Rossiyskoy akademii estestvennykh nauk (Sankt-Peterburg)*. 16(2): 120–124. (In Russian).
2. Matishov G.G., Denisov V.V., Dzhenyuk S.L. 2007. [Integrated Nature Use management in the shelf seas]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 3: 27–40. (In Russian).
3. Matishov G.G. 2013. [Current state of bioresources and ecological situation in the seas of the Western Arctic]. *pandia.ru*. Available at: https://pandia.ru/text/77/465/8765.php (accessed 18 October 2020). (In Russian).
4. Kotlyakov V.M. 2001. *Izbrannye sochineniya. Kniga 3. Geografiya v menyayushhemsya mire*. [*Selected Essays. Book 3. Geography in a Changing World*]. Moscow, Nauka: 411 p. (In Russian).
5. Sherman K., Duda A.M. 1999. Large marine ecosystems: an emerging paradigm for fishery sustainability. *Fisheries*. 24(12): 15–26. doi: 10.1577/1548-8446(1999)024<0015:LME>2.0.CO;2

6. *Vsemirnaya khartiya prirody.* [*World Charter for Nature*]. 1982. Available at: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/charter_for_nature.shtml (accessed 18 October 2020). (In Russian).

7. Titova G.D., Rodionov V.Z. 2017. [Modern principles of the ecosystem approach in marine planning]. *Regional'naya ekologiya.* 3(49): 17–23. (In Russian).

8. *Scientific Consensus Statement on Marine Ecosystem-Based Management (signed by 221 academic scientists and policy experts with relevant expertise)*. 2005. Washington, DC, Island Press: 21 p.

9. *Marine planning.* 2011. Available at: http://www.parliament.uk/documents/post/postpn388_Marine-Planning.pdf (accessed 18 October 2020).

10. *UNEP medium term strategy 2018–2021.* Available at: http://hdl.handle.net/20.500.11822/7621 (accessed 18 October 2020).

11. Costanza R., Daly H.E. 1992. Natural capital and sustainable development. *Conservation Biology.* 6(1): 37–46.

12. *TEEB. The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature. A synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB*. 2010. Malta, Progress Press: 36 p.

13. Kettunen M., Vihervaara P., Kinnunen S., D'Amato D., Badura T., Argimon M., Ten Brink P. 2012. *Socio-economic importance of ecosystem services in the Nordic Countries. Synthesis in the context of The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB*). Copenhagen, Nordic Council of Ministers: 290 p.

14. Titova G.D. 2014. [Concept "the natural capital", development of methodology and methods of its economic valuation]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7. Geologiya. Geografiya*. 1: 114–124. (In Russain).

15. *Reviving the Ocean Economy: the Case for Action-2015*. 2015. Gland, Geneva, WWF International: 60 p.

16. Danilov-Danilyan V.I. 2010. [Environmental values and economic evaluation]. In: *Ekonomika ekosistem i bioraznoobraziya: potentsial i perspektivy stran Severnoy Evrazii: Materialy soveshchaniya TEEB – ekonomika ekosistem i bioraznoobraziya: perspektivy uchastiya Rossii i drugikh stran NNG (Moskva, 24 fevralya 2010 g.).* [*Economics of ecosystems and biodiversity: potential and prospects of Northern Eurasia countries: Proceedings of the meeting "TEEB Project – Economics of Ecosystems and Biodiversity: participation prospects for Russia and other NIS countries" (Moscow, February 24, 2010)*]. Moscow, Biodiversity Conservation Center: 19–26. (In Russian).

17. *Marine Ecosystem Services Partnership*. Available at: http://www.marineecosystemservices.org/ (accessed 18 October 2020).

18. *Plan deystviy OON po zashchite zhivoy prirody na 10 let prinyat v Nagoe.* [*UN action plan for the protection of wildlife for 10 years adopted in Nagoya*]. Available at: http://ecoportal.su/news.php?id=49562 (accessed 18 October 2020). (In Russian).

19. OECD. 2016. *The Ocean Economy in 2030*. Paris, OECD Publishing: 256 p. doi: 10.1787/9789264251724-en

Поступила 03.09.2020

СОДЕРЖАНИЕ

РАДИАЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ

ГИДРОБИОЛОГИЯ, ЭКОЛОГИЯ МОРЯ

ОХРАНА ПРИРОДЫ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МОРЕЙ

Научное издание

АЗОВСКОЕ МОРЕ: ОКЕАНОГРАФИЯ, ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ, ГИДРОБИОЛОГИЯ

(в научных трудах академика Г.Г. Матишова
и сотрудников ЮНЦ РАН)

Том III
(сентябрь 2020 г. – февраль 2022 г.)

Техническая редактура *Бабаевой А.С.*
Оригинал-макет *Безбородовой Л.В.*
Оформление обложки *Безбородовой Л.В.*
Перевод *Михалюка Р.Г.*

Формат 60 × 84/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 49,29. Уч.-изд. л. 34,21. Тираж 300 экз.

Издатель – Российская академия наук

Отпечатано в экспериментальной цифровой типографии РАН

Издается по решению Научно-издательского совета
Российской академии наук (НИСО РАН) от 01.02.2022 г.
и распространяется бесплатно