# СОДЕРЖАНИЕ

**Том 48, номер 5, 2021**

## ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Речное прошлое озера Селигер

*Е. А. Константинов, А. В. Панин, Н. В. Карпухина, С. С. Бричева, О. К. Борисова, Н. Н. Нарышкина, А. Л. Гуринов, А. Л. Захаров* 481

Один из подходов к численному исследованию гидрологии дельтовой области Дона

*А. Л. Чикин, А. В. Клещенков, Л. Г. Чикина* 492

Наводнения в Венецианской лагуне и их причины

*М. В. Михайлова* 500

## ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Численное гидродинамическое 2D-моделирование затопления г. Тулуна на р. Ия в паводок 2019 г.

*В. В. Беликов, Н. М. Борисова, А. В. Глотко* 513

Сейшевые колебания в системе севастопольских бухт

*Ю. В. Манилюк, Д. И. Лазоренко, В. В. Фомин* 526

Геофильтрация в окрестности вертикальной циркуляционной скважины, обладающей скин-эффектом

*П. Е. Морозов* 537

## ГИДРОХИМИЯ, ГИДРОБИОЛОГИЯ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Оценка качества вод крупной речной системы Европейского Севера России по макрозообентосу

*И. А. Барышев* 547

Летучие органические соединения в устьевых областях малых рек Татарского пролива в период ледостава

*Л. А. Гаретова, Н. К. Фишер, А. М. Кошельков* 556

Современные особенности и динамика баланса биогенных веществ в бассейне реки Кудьмы 2. Сезонный вынос азота и фосфора

*С. В. Долгов, Н. И. Коронкевич* 568

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОД СУШИ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

Признаки и значение структур подповерхностного стока на территории криолитозоны

*И. В. Чеснокова, А. П. Безделова, Д. О. Сергеев, Н. И. Тананаев, Е. А. Гришакина* 578

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ, ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ

Прогноз водопотребления в российской части бассейна Дона

*А. П. Дёмин, А. В. Зайцева* 588

*ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, 2021, том 48, № 5, с. 481–491*

## ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

*УДК 551.89*

# РЕЧНОЕ ПРОШЛОЕ ОЗЕРА СЕЛИГЕР[1]

**© 2021 г. Е. А. Константинов[a, *], А. В. Панин[a, b], Н. В. Карпухина[a], С. С. Бричева[a, c], О. К. Борисова[a], Н. Н. Нарышкина[a], А. Л. Гуринов[a], А. Л. Захаров[a]**

[a] *Институт географии РАН, Москва, 119017 Россия*

[b] *Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия*

[c] *Институт водных проблем РАН, Москва, 119234 Россия*

**e-mail: eakonst@igras.ru*

Поступила в редакцию 19.12.2019 г.
После доработки 17.01.2021 г.
Принята к публикации 30.03.2021 г.

Озеро Селигер традиционно считается бывшим ледниковым водоемом – остатком обширного приледникового озера, существующим со времени освобождения территории от последнего ледникового покрова 18–19 тыс. л.н. Внимание привлекли участки южных плесов озера, похожие на подтопленные меандрирующие русла рек. На трех таких участках проведено бурение донных отложений и на двух из них – георадиолокационное профилирование. Установлено, что озерные илы мощностью в несколько метров подстилаются крупными песками, имеющими, скорее всего, речное происхождение. В пользу этого говорит характерный асимметричный профиль дна на предполагаемых участках древних речных излучин и время перехода от активного стока к режиму стоячего водоема – начиная с 14.5 тыс. л.н.: в это время край ледника располагался уже далеко и талые ледниковые воды не проникали на эту территорию. Показано, что подтопление участков речных долин и их превращение в озерные плесы было вызвано подпруживанием р. Селижаровки, изначально вытекавшей из оз. Селигер в районе г. Осташкова. Около 14.5 тыс. л.н. Селижаровка начала подпруживаться интенсивно растущей внутренней дельтой своего левого притока р. Крапивенки. За 2 тыс. лет подпруживание распространилось на весь 15-километровый отрезок долины и достигло истока реки из оз. Селигер. В голоцене рост уровня продолжился, но темпы его снизились. Уровень озера суммарно поднялся на 7–8 м, что вызвало подтопление низовьев впадающих в озеро речных долин и превращение их в эстуарии. Показано, что гляциоизостатические деформации земной коры не были способны реверсировать сток из Селигера в бассейн Балтики. После освобождения от последнего ледника оз. Селигер и его притоки всегда принадлежали бассейну Волги, что следует учитывать при реконструкциях величин стока Волги и водного баланса приемного водоема (Каспия).

*Ключевые слова:* история озер, палеодолины, донные отложения, позднеледниковье, голоцен.

**DOI:** 10.31857/S0321059621050114

## ВВЕДЕНИЕ

Озеро Селигер – крупнейшее на Валдайской возвышенности, главном водоразделе Восточно-Европейской равнины, разделяющем водосборные бассейны Каспийского, Черного и Балтийского морей. Расположенная в краевой зоне последнего оледенения Валдайская возвышенность имеет типичный послеледниковый рельеф с конечноморенными грядами, камами, озами и моренными западинами. Традиционно происхождение котловины оз. Селигер связывают с гляциальными процессами – ледниковым выпахиванием, неравномерной ледниковой аккумуляцией и воздействием потоков талых ледниковых вод [1, 10, 14, 21, 22, 25]. Главные аргументы в пользу ледниковой гипотезы следующие: 1) высокая изрезанность береговой линии; 2) обилие островов и заливов неправильной, хаотичной формы; 3) наличие ледниковых и водно-ледниковых отложений и форм рельефа в бассейне озера [17]. Конфигурация озерной котловины с ее протяженными плесами иногда связывается с доледниковым рельефом. Согласно материалам [8, 16], озерная депрессия наследует доледниковую долинную сеть, которая открывалась на СЗ и затем оказалась частично погребена в результате ледниковой аккумуляции.

[1] Полевые работы, георадарное исследование, радиоуглеродное датирование, спорово-пыльцевой анализ и геолого-геоморфологический анализ истории развития о. Селигер проводились в рамках проекта РНФ 17-17-01289. Реконструкция направлений послеледникового стока – в рамках проекта РНФ 19-17-00215. Литологические исследования колонок донных отложений выполнены в рамках ГЗ Института географии РАН 0127-2019-0008.

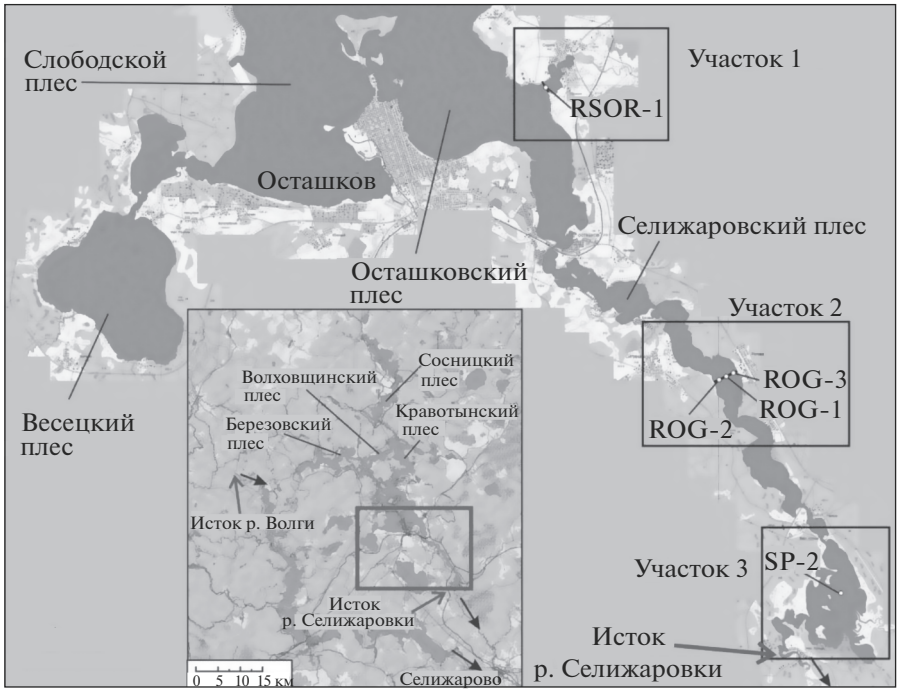


**Рис. 1.** Картосхема южных плесов оз. Селигер с участками работ. На врезке – обзорная картосхема оз. Селигер и прилегающих территорий.

Вопросы генезиса рельефа дна и берегов Селигерских плесов слабо раскрыты в опубликованной литературе. Внимание исследователей фокусировалось большей частью на изучении формы и размеров островов, а также на измерении длины береговой лини [4, 7, 20]. Между тем в рельефе плесов (рис. 1) выражены черты речной морфологии, труднообъяснимые с позиции имеющихся представлений. Так, обращает на себя внимание вытянутая и регулярно изогнутая плановая форма ряда Селигерских плесов (Селижаровского, Березовского, Сосницкого, Кравотынского, Волоховщинского), характерная для речных долин. В рельефе дна Селижаровского, Березовского и Волоховщинского плесов читаются плавно изгибающиеся протяженные ложбины, напоминающие по форме русла рек. У отдельных притоков озера (например, у р. Сороги) наблюдаются воронкообразные устья, которые расширяются в направлении озера, образуя заливы-эстуарии. Не хватает достоверных данных по истории изменений уровня озера в послеледниковое время. Отдельными исследователями стоянок каменного века на берегах Селижаровского плеса высказано мнение о высоком (значительно выше современного) уровне озера в финальном мезолите [5]. Однако на другом берегу озера изучено поселение того же времени (7–8 тыс. л.н.), располагавшееся всего в 1.5–3.0 м над современным уровнем воды [18], что противоречит вышеупомянутой реконструкции.

Следует констатировать, что оз. Селигер недостаточно изучено в палеогеографическом отношении. Нет ясности в отношении генезиса котловины и возраста озера. Отсутствуют достоверные реконструкции истории колебания уровня. Нет объяснения широкого распространения песков под озерными илами [15] и флювиальной морфологии ряда селигерских плесов.

В настоящей статье представлены результаты изучения рельефа и донных отложений южных плесов оз. Селигер. Цель исследования – реконструкция ранних этапов истории озера, определение возраста озера и генезиса рельефа на выбранных участках.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Озеро Селигер представляет собой систему из 24 полуизолированных заливов – так называемых плесов, образующих в плане форму креста. По данным [9, 13], протяженность озера с С на Ю составляет 60 км, с З на В 35 км. Площадь акватории 212 км$^2$, средняя глубина 5.8, максимальная 24 м. Площадь водосбора 2310 км$^2$. При нормальном уровне (205.48 м) полный объем озера составляет 1.3 км$^2$. Амплитуда колебаний уровня, зафиксированная за период наблюдений, составляет 206 см. В годовом ходе уровня наблюдаются два сопоставимых пика – весенний и осенний. Береговая линия очень извилистая и протяженная, ее длина 528 км. В озере насчитывается >160 остро-

**Таблица 1.** Радиоуглеродные (AMS) даты по донным осадкам оз. Селигер

| № | Лабораторный номер ($IGAN_{AMS}$) | Скважина | Глубина от дна, м | Материал | $^{14}C$ дата, л. н. ($\pm1\sigma$) | Калиброванный возраст, кал. л. н. ($\pm1\sigma$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 6174 | RSOR-1 | 0.6 | Растительный детрит | 490 ± 20 | 520 ± 10 |
| 2 | 6175 | RSOR-1 | 0.85 | Общий органический углерод | 2800 ± 20 | 2900 ± 30 |
| 3 | 6176 | RSOR-1 | 1.6 | Растительный детрит | 10860 ± 30 | 12730 ± 20 |
| 4 | 6184 | RSOR-1 | 1.82 | То же | 10900 ± 35 | 12760 ± 30 |
| 5 | 6177 | ROG-3 | 4.8–4.83 | Общий органический углерод | 9855 ± 30 | 11250 ± 20 |
| 6 | 6178 | ROG-3 | 6.12 | Растительный детрит | 20680 ± 50 | 24920 ± 160 |
| 7 | 6179 | ROG-2 | 0.76 | Общий органический углерод | 4960 ± 25 | 5680 ± 30 |
| 8 | 6180 | ROG-2 | 0.53–0.63 | То же | 5750 ± 50 | 6550 ± 60 |
| 9 | 6181 | SP-2 | 3.2–3.25 | То же | 9510 ± 30 | 10850 ± 130 |
| 10 | 6182 | SP-2 | 4.42 | Растительный детрит | 11960 ± 35 | 13810 ± 70 |

вов, крупнейший из которых – о. Хачин. Селигер имеет >100 притоков. Самые крупные притоки – реки Крапивенка, Сорога и Серемуха. Вытекает из оз. Селигер р. Селижаровка, которая в районе пгт Селижарово впадает в Волгу. С середины XX в. озеро испытывает сильную антропогенную нагрузку, которая стала одной из причин перехода озера из олиготрофного состояния в мезотрофное, а в отдельных плесах наблюдаются признаки эвтрофии [2, 10–12].

В январе–марте 2018 г. были проведены полевые работы на трех участках акватории (рис. 1): 1) устье р. Сороги; 2) центральная часть Селижаровского плеса в створе д. Рогожи; 3) южное расширение Селижаровского плеса в районе д. Нижние Котицы. Бурение озерных отложений выполнялось со льда модифицированным поршневым буром Ливингстона [30]. Керны были упакованы на месте в пластиковые контейнеры и транспортированы в лабораторию. Для участков 1 и 2 проведено профилирование георадаром “Питон”. Профили выполнялись в 2–3-кратной повторности со сменой антенн, центральные частоты которых составляли 25, 50 и 100 МГц.

Для образцов из кернов опорных скважин были определены потери при прокаливании (ППП) и магнитная восприимчивость (МВ), а также выполнен спорово-пыльцевой анализ. Определение ППП выполнялось по стандартной методике [23]. ППП 550°С отражают содержание органического вещества, а разница ППП 950–550°С (ППП Δ950) характеризует потери $CO_2$ из карбонатов [23, 26]. С целью стратиграфического расчленения отложений и корреляции между кернами выполнено измерение МВ. Этот показатель зависит от концентрации и формы нахождения магнитных частиц в осадке [3, 19], что связано как с источниками поступления материала, так и с биогеохимическими процессами в осадке. Измерение проводилось на портативном каппаметре “ZH Instruments SM 30”. При подготовке препаратов для спорово-пыльцевого анализа была использована сепарационная методика В.П. Гричука [6].

Радиоуглеродный анализ выполнялся в ЦКП “Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии” Института географии РАН и центра изотопных исследований Университета Джорджии (США). По валовым образцам озерных илов и растительным макроостаткам получено 10 дат (табл. 1) методом ускорительной масс-спектрометрии (AMS). Калибровка, т.е. приведение 14С дат к календарной шкале времени, проводилась в программном пакете OxCal 4.3 [24] на основе калибровочной кривой IntCal13 [28]. В тексте статьи и на рисунках к ней приведен календарный (калиброванный) возраст в формате “лет назад”.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### *Ключевой участок 1*

Ключевой участок 1 расположен в широком приустьевом заливе (эстуарии) р. Сороги, которая впадает в Осташковский плес с восточного берега (рис. 2а). Сорога – самая длинная река, впадающая в озеро. По данным [10], ее длина 27 км, площадь водосбора 141.6 км, среднегодовой расход воды 1.26 $м^3/с$, объем годового стока 33.69 млн $м^3$, годовой объем твердого стока, поступающего в озеро в виде наносов, равен 7.94 т. Уклоны реки малые, что в условиях легкоразмываемых берегов позволяет реке интенсивно меандрировать. В нижнем течении Сороги ширина русла заметно возрастает (с 5 до 40 м), а излучины значительно укрупняются. Эстуарий Сороги имеет протяженность 1.7 км и переменную ширину – от 80 до 360 м. Конфигурация в плане видна четко с ритмичным чередованием расширений и суже-

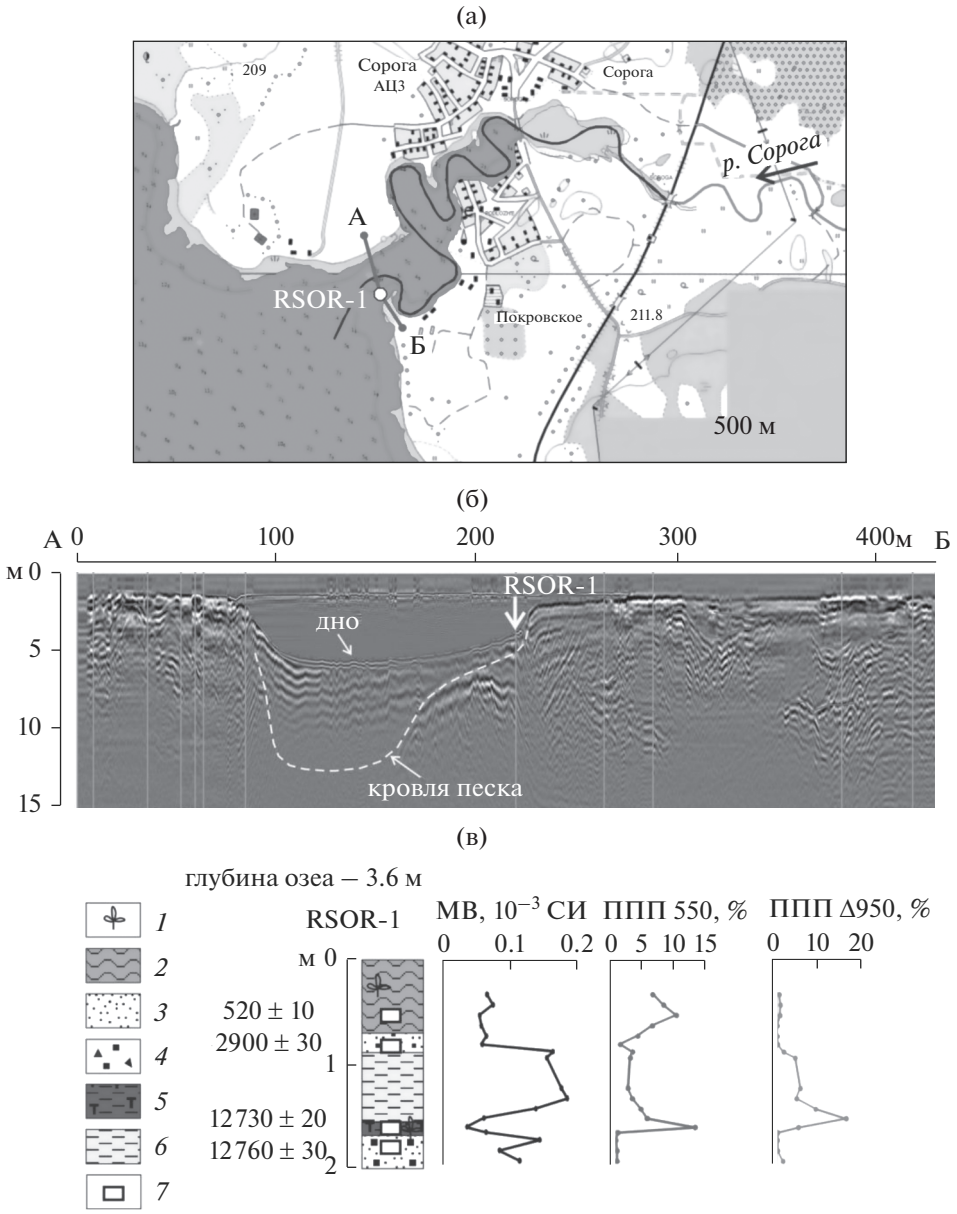


**Рис. 2.** Участок 1 "Сорога". а – картосхема приустьевой зоны р. Сороги, линия А–Б – георадарный профиль, белый круг – скважина RSOR-1, извилистая линия – предполагаемое положение затопленного русла р. Сороги; б – георадарный профиль, антенна частотой 100 МГц; в – литологическая колонка скважины RSOR-1 с результатами анализов: МВ – магнитная восприимчивость, ППП – потери при прокаливании; *1* – растительный детрит, *2* – органо-минеральный ил (гиттия), *3* – песок, *4* – гравий и дресва; *5* – оторфованный суглинок, *6* – минеральный ил (озерный суглинок), *7* – места отбора образцов на радиоуглеродный анализ. Даты приведены к календарной шкале времени в формате "среднее ± σ" лет назад (отсчет от 1950 г.).

ний. Береговая линия представляет собой серию закругленных карманов. Глубина эстуария меняется от 0.5 до 7 м, в среднем 2–4 м. Рельеф дна дифференцирован. Участки максимальных глубин тяготеют к вогнутым берегам, вдоль которых проходит плавно изогнутая по форме берега ложбина. К выпуклым берегам приурочены участки мелководья.

На данном участке был заложен один георадарный профиль, пересекающий эстуарий в его нижней части – на выходе в Осташковский плес (рис. 2б). Здесь эстуарий сужается, ширина между берегами составляет 250 м. Профиль также захватывает участки южного (низкого) и северного (высокого) берегов. Общая длина профиля составила 430 м. На линии профиля имеется одна буровая скважина RSOR-1.

Скважина RSOR-1 пробурена в 15 м от южного низкого берега, заросшего тростником. Глубина озера в точке бурения 3.6 м. Общая длина полученного керна – 2 м. Скважина вскрыла 5 слоев донных отложений (рис. 2в): 1) 0.0–0.7 м – сапропель; 2) 0.7–0.9 м – песок мелкий; 3) 0.9–1.6 м – серый озерный суглинок; 4) 1.6–1.65 м – прослой, насыщенный слаборазложившимися растительными остатками; 5) 1.65–2.0 м – песок разнозернистый, местами с гравием, мелкий и слоистый сверху и крупный с гравием внизу.

Из слоев 4 и 5 получены радиоуглеродные даты по растительному детриту, которые указывают на то, что завершение накопления нижней пачки песков приходится на время 12.7 тыс. л.н. Верхний прослой песка и покровный сапропель сформировались за последние 3 тыс. лет. Наличие верхнего песчаного прослоя может указывать на прохождение крупного паводка и эрозию верхней части донных осадков на этом участке.

При анализе радарограммы обнаружена асимметрия поперечного профиля (рис. 2б). К высокому северному берегу тяготеет ложбина, которая практически полностью заполнена наносами. По аналогии со скважиной RSOR-1, эти наносы, вероятно, представлены органоминеральным илом, под которым залегает толща песка. Ширина ложбины 50–70 м, кровля песка в тальвеге ложбины имеет глубину 10–12 м ниже уреза озера (н.у.о.). Южный подводный береговой склон пологий, он образует ступень, где кровля песка поднимается до 5–7 м н.у.о. На этой ступени и расположена скважина RSOR-1.

Результаты литологического анализа керна скважины RSOR-1 (рис. 2в) согласуются с выделенными при описании слоями. Слои 1 и 4 обогащены органикой (до 10–15%), но имеют низкие показатели МВ. Слой 4 имеет повышенное значение ППП Δ950, что указывает на присутствие карбонатов. Слой 3 имеет высокие значения МВ при низком содержании органики и карбонатов. Залегающий в основании слой 5 имеет низкие значения по всем показателям, что говорит о его силикатном составе и терригенной природе.

### *Ключевой участок 2*

Ключевой участок 2 расположен в акватории Селижаровского плеса в створе д. Рогожи (рис. 3а). Плес на участке профиля имеет ширину 700 м. Восточный берег, на котором расположена д. Рогожа, – высокий и вогнутый в плане, западный – низкий и выпуклый в плане. Промеры глубин показали, что максимальные глубины (3.5–4.0 м) тяготеют к центральной и восточной частям профиля. Результаты бурения (рис. 3в) показали, что максимальные мощности (>4 м) сапропеля тяготеют к восточному берегу (скв. ROG-3). Под сапропелем вскрываются минеральные серые суглинки мощностью 1.8 м. Ниже суглинков залегает грубый песок с гравием. В скважинах ROG-1 и ROG-2 мощность озерных осадков существенно сокращается – до 1.0–1.5 м. Кровля песка расположена значительно выше. По данным радиоуглеродного датирования, переход от суглинков к сапропелям происходит в самом начале голоцена – после 11.3 тыс. л.н. Серый суглинок, залегающий под сапропелем, формировался в позднеледниковье. Дата 24000 ± ± 920 кал. л.н., полученная по растительному детриту из песков в низах скважины ROG-3, не отражает реального возраста вмещающих песков. Полученная дата приходится на этап, когда Селигер перекрывался ледником, или непосредственно перед этим. Вероятно, датированные растительные остатки были переотложены из более древних отложений при их послеледниковом размыве.

На радарограмме (рис. 3б) отчетливо прослеживаются две границы: дно и кровля песка. Рельеф кровли песка указывает на наличие крупной погребенной ложбины, протягивающейся вдоль восточного берега. Ширина ложбины составляет 200–230 м, глубина под урезом озера ~10 м. К З от ложбины в районе скважины ROG-2 наблюдается вал шириной ~80 м. Кровля песка в верхней точке вала поднимается до 5 м н.у.о. За валом в направлении западного берега кровля песка продолжает плавно подниматься до 3–4 м. Рельеф кровли песка напоминает типичный профиль днища долины равнинной реки. Ложбина у крутого выпуклого берега соответствует руслу палеореки, вал в прибровочной части низкого берега – прирусловой вал, за валом – древняя пойма.

### *Ключевой участок 3*

Ключевой участок 3 (рис. 4) расположен в южном расширении Селижаровского плеса – Нижнекотицком заливе. Ширина залива составляет 1.6 км при длине 2.9 км. Из юго-западной части залива вытекает р. Селижаровка, а в юго-восточную часть впадает р. Крапивенка – крупнейший приток Селигера. Устье Крапивенки представлено клювовидной дельтой размерами 900 м на 800 м. В заливе насчитывается 5–6 островов. Средние глубины залива 2.5–3.0, максимальные 4 м. Скважина SP-2 расположена в центральной части залива, где зафиксирована глубина 3.65 м (рис. 1).

Длина керна скважины SP-2 составляет 5 м (рис. 4). В керне выделено 3 слоя: 1) 0.0–3.5 м – сапропель; 2) 3.5–4.5 м – серый озерный суглинок; 3) 4.5–5.0 м – песок мелкий и средний. Верхний сапропелевый слой (1) богат органическим веществом – до 58%. При этом в нем отсутствуют карбонаты и отмечаются низкие значения МВ. Суглинок слоя 2 характеризуется высокими зна-

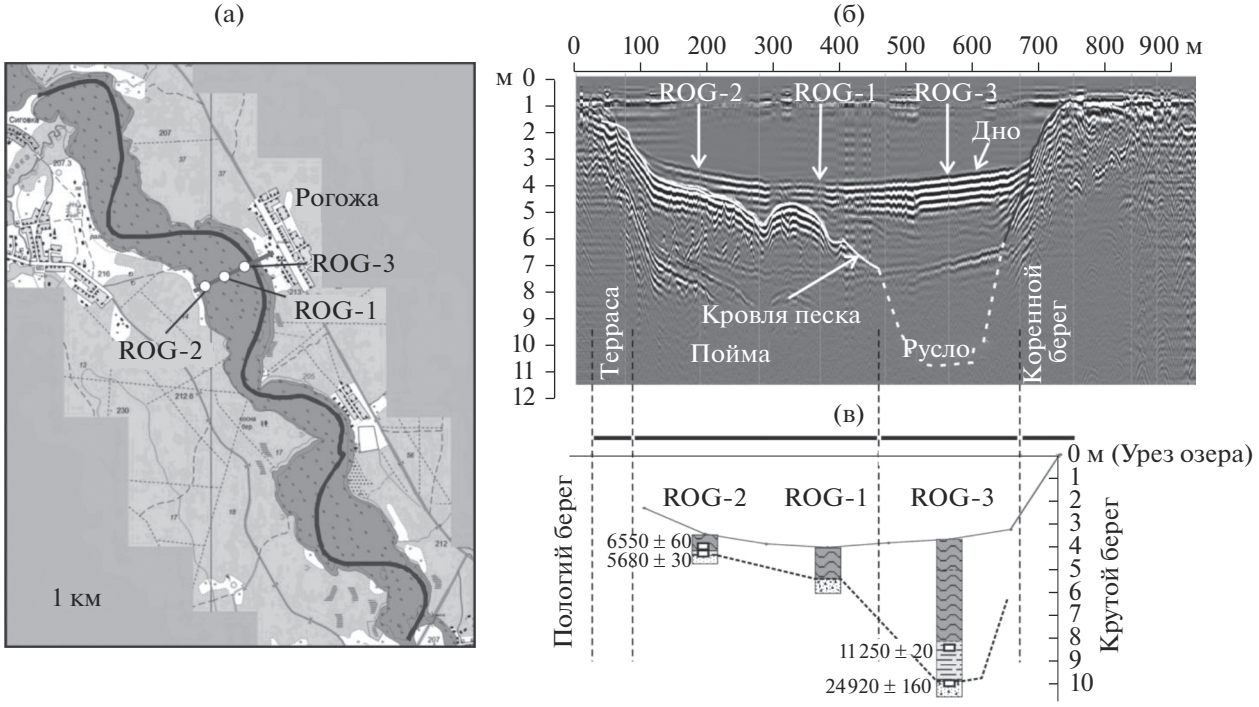


**Рис. 3.** Участок 2 "Рогожа". а – карта участка работ, извилистая линия – предполагаемое положение затопленного русла р. Сороги. б – георадарный профиль, антенна частотой 50 МГц; в – буровой профиль.

чениями ППП Δ950 (до 25%), что говорит о значительной доле карбонатов в осадке. В нижней части слоя 2 выделяется аномально высокий пик МВ. Пески слоя 3, залегающие в основании разреза, характеризуются низкими значениями всех измеренных показателей, что говорит об их силикатном составе и терригенной природе.

Для нижней части керна SP-2 проведен спорово-пыльцевой анализ (рис. 5). Пыльцевая диаграмма отражает развитие растительности на окружающей водоем территории с начала позднеледниковья до бореальной эпохи голоцена. На ней отчетливо прослеживаются все холодные стадии позднеледниковья, разделенные теплыми интерстадиалами: ранний дриас (DR-I), бёллинг (BØ), средний дриас (DR-II), аллерёд (AL) и поздний дриас (DR-III). При этом временные границы этапов климатостратиграфической шкалы Блитта–Сернандера в целом соответствуют границам локальных пыльцевых зон, выделенных на диаграмме и подтвержденных анализом статистического сходства пыльцевых спектров по программе CONISS из специализированного пакета TILIA.

В позднеледниковье содержание пыльцы травянистых растений в общем составе спектров достигает 40% в холодные и относительно сухие стадии и снижается до 15–20% во время интерстадиальных потеплений бёллинг и аллерёд. В составе пыльцы трав и кустарничков наибольших содержаний достигает пыльца полыней (*Artemisia*), представителей семейств осоковых, маревых и злаков. Кроме этого, отмечено присутствие пыльцы гелиофильных растений (*Helianthemum* sp., *Hippophaë rhamnoides*), а также ксерофитов (*Ephedra*) и гипоарктоальпийского вида плаунка *Selaginella selaginoides*. В составе древесных пород преобладает пыльца сосны и березы. Бёллингу и аллерёду соответствует хорошо выраженный "нижний максимум ели" (до 40% суммы пыльцы наземных растений), который, как и более плавный пик пыльцы сосны, разделен на две части спадом, соответствующим среднему дриасу. Такое отчетливое проявление этого кратковременного похолодания (<400 лет) крайне редко прослеживается по палинологическим данным и заслуживает особого внимания.

В колонке SP-2 этому холодному и относительно сухому интервалу отвечает наибольшее содержание и морфологическое разнообразие пыльцы полыней и рост содержаний пыльцы берез. Потепление в аллерёде, помимо увеличения роли еловых лесов, отмечено появлением единичных пыльцевых зерен широколиственных пород дуба (*Quercus, Ulmus*, *Tilia*). Возможно, в это время данные породы еще не достигли окрестностей оз. Селигер в процессе расселения из рефугиумов ледникового времени, однако границы их ареалов должны были существенно приблизиться к этому району. Пыльца лещины (*Corylus*), напротив, встречается в течение всего позднелед-

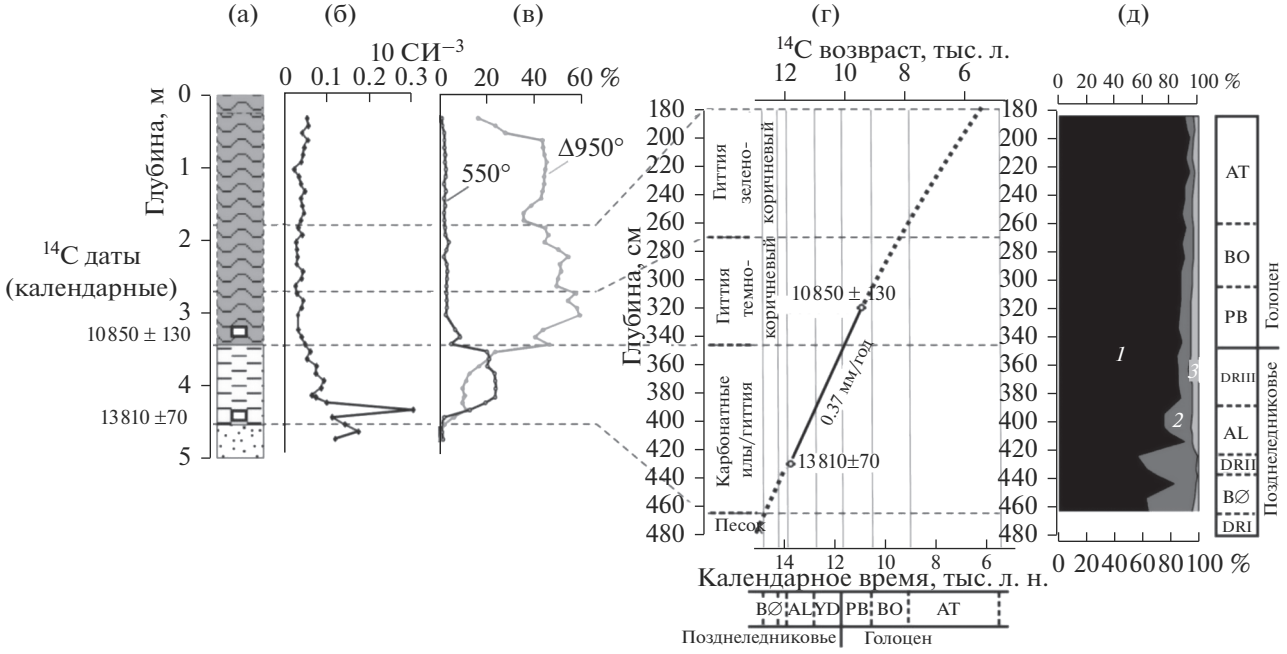


**Рис. 4.** Строение озерных отложений в скважине SP-2 (участок 3, глубина озера 3.65 м): а – литологическая колонка (условные обозначения – на рис. 2), б – магнитная восприимчивость, в – потери при прокаливании, г – состав спорово-пыльцевых спектров, д – структура спорово-пыльцевых спектров: *1* – пыльца деревьев, *2* – пыльца трав и кустарников, *3* – споры. Климатические периоды: DR1 (OD) – ранний дриас, BØ – бёллинг, DR2(MD) – средний дриас, AL – аллерёд, DR3 (YD) – поздний дриас.

никовья в большем количестве, чем в раннем голоцене, и в ее распределении в этот период нет связи с этапами потеплений. Этот факт, а также присутствие единичных пыльцевых зерен граба дают основание предполагать, что пыльца лещины здесь переотложена из осадков микулинского межледниковья, для которых характерны ее огромные содержания. Похолоданию позднего дриаса соответствуют наиболее высокие по разрезу содержания пыльцы березы (до 60% суммы пыльцы наземных растений), снижение доли пыльцы сосны и почти полное отсутствие пыльцы ели. Как и в среднем дриасе, довольно высоки содержания пыльцы ивы (до 10% суммы пыльцы деревьев и кустарников), встречается пыльца кустарниковой ольхи (*Alnaster*).

Началу голоцена соответствует появление широколиственных пород, прежде всего вяза (*Ulmus*), в составе березовых и сосновых лесов. Позднее происходит постепенное распространение дуба и липы, богаче становится состав подлеска (отмечена пыльца лещины (*Corylus*), бузины (*Sambucus*), калины (*Viburnum*)). Среди травянистых растений преобладают злаки и осоковые, возрастает разнообразие мезофильного разнотравья, встречается пыльца вересковых кустарничков, споры сфагновых мхов, обильны споры папоротников. Тем не менее в слоях раннего голоцена присутствует пыльца ксерофильных растений – хвойника (*Ephedra*) и представителей семейства молочайных (Euphorbiaceae), что, вероятно, свидетельствует об относительно сухом и теплом лете и о широком развитии песчаных почв. Пыльца водных и прибрежных растений (рогоза, ежеголовки) встречается в небольшом количестве, однако интересно отметить, что уже в самом начале позднеледниковья в озере обитали кубышки (*Nuphar*) и кувшинки (*Nymphaea*), что говорит о достаточном прогревании воды в летний сезон.

В целом, полученные данные позволяют заключить, что лесные сообщества (редколесья, а затем и северотаежные леса) впервые появились на данной территории уже во время потеплений позднеледниковья – бёллинг и аллерёд. Современный облик растительности начал складываться здесь в раннем голоцене (пребореал/бореал) и окончательно сформировался к середине атлантического времени. Климатостратиграфические построения по палинологическим данным хорошо соответствуют радиоуглеродной хронологии и подтверждают ее надежность. Радиоуглеродные даты (табл. 1) и биостратиграфические данные позволяют заключить, что вскрытые скважиной отложения накапливались непрерывно в течение позднеледниковья и голоцена. Экстраполируя возрастные определения по двум имеющимся радиоуглеродным датам, получаем, что кровля

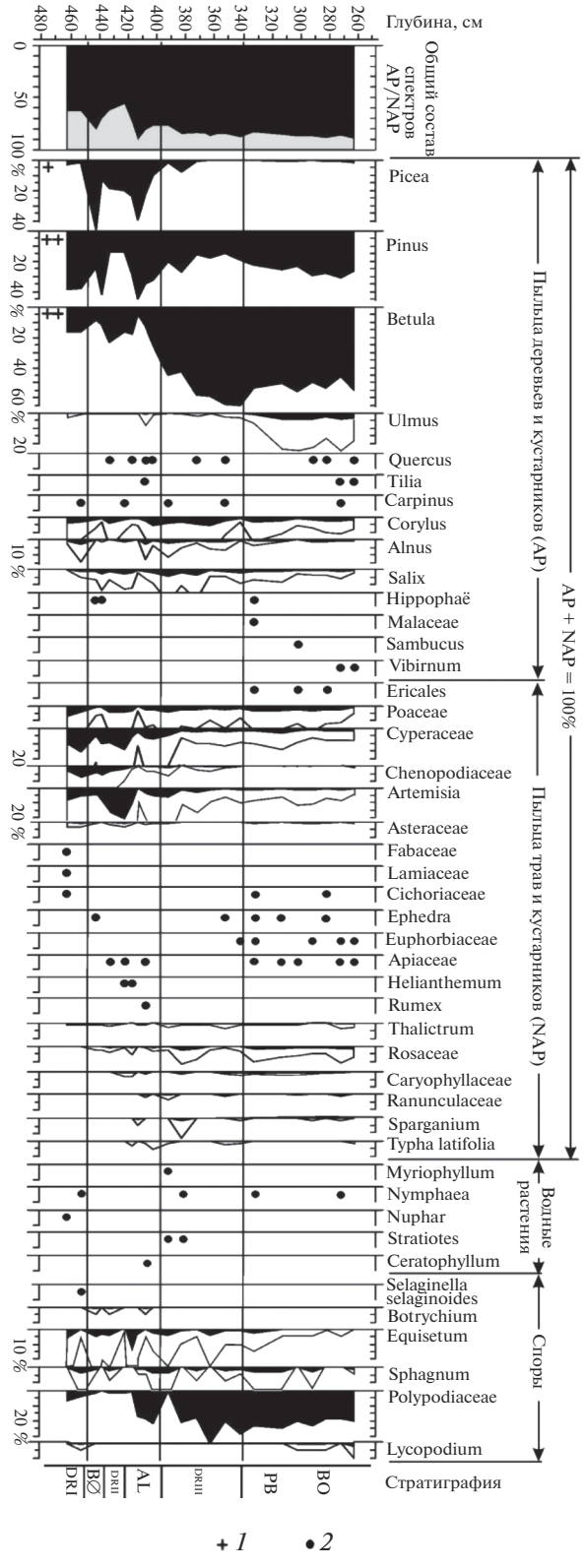


**Рис. 5.** Спорово-пыльцевая диаграмма для нижней части керна SP-2. *1* – единичные находки пыльцевых зерен; *2* – пыльца и споры в количестве <%; дополнительные кривые приведены с увеличением в 5 раз.

песка соответствует хронологическому уровню ~14.5 тыс. л.н., а подошва сапропеля – 11.7 тыс. л.н. (рис. 4г).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Во всех скважинах на дне озера обнаружены 1–3-метровые, а в отдельных случаях 6-метровые озерные илы. Верхняя часть ила имеет темно-серый цвет (иногда с зеленоватым оттенком) благодаря обогащению органическим веществом (30–60%). Это голоценовый сапропель (гиттия). Нижние слои ила во многих скважинах имеют светло-серый или сине-серый цвет, так как они содержат мало (3–10%) органического вещества. Это признак образования осадка в холодном климате – в конце последней ледниковой эпохи. Везде под илом встречаются грубые пески, транспорт которых предполагает достаточно высокие скорости течения воды. Есть основания полагать, что это речной русловой аллювий, а не отложения потоков талых ледниковых вод. Во-первых, в очертаниях как эстуария меандрирующей р. Сороги, так и узкого Селижаровского Плеса отчетливо прослеживаются регулярные изгибы, напоминающие меандрирующее русло (рис. 2а, 3а). На изученных участках поперек таких изгибов кровля песков обнаруживает характерный асимметричный профиль с наибольшими глубинами ближе к вогнутому берегу (рис. 2б, 3б). Это типично для речных излучин: линия наибольших глубин прижата к вогнутому берегу. Во-вторых, в кровле песка на профилях прослеживается более высокая поверхность во внутренней части изгиба, которую можно интерпретировать как прирусловую отмель (побочень), переходящую в пойму (рис. 2б, 3б). В-третьих, торфяной прослой над песком в скважине RSOR-1 (рис. 2) указывает на этап развития в субаэральном режиме (т.е. на открытом воздухе, а не под водой), который был бы невозможен, если бы гипотетически существовавшее большое приледниковое озеро просто плавно снижало уровень.

Таким образом, есть основания полагать, что Селижаровский плес и эстуарий р. Сороги – затопленные участки речных долин. Прекращение речного стока произошло вследствие подпора, вызванного поднятием уровня воды в озере. Исходя из высотного положения погребенных илами и затопленных палеорусел на участках 1 и 2 (рис. 2б, 3б) величину подъема уровня озера можно оценить в 7–8 м. Смена речного режима на озерный геологически выражена сменой речных песков озерными илами. Согласно радиоуглеродным датам (рис. 4) и данным палинологии (рис. 5), на южном окончании Селижаровского плеса эта смена произошла на этапе перехода от стадиала (холодной климатической осцилляции) ранний дриас (DR1) к интерстадиалу (теплой климатиче-

ской осцилляции) бёллинг (BØ). Следовательно, ~14.5 тыс. л. н. уровень озера поднялся выше отметки 197.4 м абс. Даты на границе песков и озерных илов в эстуарии р. Сороги (рис. 2в) указывают на то, что после 12.7 тыс. л.н. уровень воды превысил отметку 200.3 м абс. Это означает, что за ~2 тыс. лет подпруживание распространилось на весь 15-километровый отрезок долины и достигло истока реки из оз. Селигер. А уровня древней поймы на участке 2 (201.5 м. абс.) озеро достигло ~ 6 тыс. л.н. Во второй половине голоцена уровень воды в озере медленно поднимался вплоть до современных отметок (рис. 6).

В чем же причина трансформации речной системы в озерную? Гипотетически представляются возможными два сценария.

Во-первых, могли происходить общее изменение направления стока и миграция главного водораздела в результате гляциоизостатических деформаций – подъема земной поверхности – в результате освобождения от ледниковой нагрузки. Скорость и общая величина этого подъема в послеледниковое время нарастала к СЗ в сторону Ботнического залива Балтийского моря, где толщина ледника и, следовательно, нагрузка на земную кору были максимальными. Поэтому при послеледниковом поднятии происходил перекос земной поверхности к ЮВ. Если речной сток в позднеледниковье был направлен на С в бассейн р. Полы, то такой перекос, направленный против течения, теоретически мог вызвать падение уклонов до нулевых значений и подпруживание части речной системы. Однако градиенты такого перекоса слишком малы, чтобы обеспечить эффект подпруживания, а специально проведенное полевое обследование в районах возможного перетока вод к СЗ следов такого перетока не обнаружило. Таким образом, данный сценарий представляется маловероятным.

Во-вторых, поднятие уровня Селигера могло происходить из-за подпруживания долины р. Селижаровки, изначально вытекавшей из Селигера в районе г. Осташкова, естественной дамбой в районе д. Нижние Котицы. Данный сценарий предполагает, что в позднеледниковье сток по будущему Селижаровскому плесу был направлен, как и в настоящее время, в бассейн Волги. На вероятное подпруживание долины в районе д. Нижние Котицы указывают приведенные ниже признаки.

1. На продольном профиле озерного и речного дна от Осташкова до пгт Селижарово читается пологий вал в районе Нижних Котиц, выше которого расположен широкий и мелководный Нижнекотицкий залив, а ниже – исток р. Селижаровки.

2. Устье р. Крапивенки представлено относительно крупной клювовидной дельтой, вдающейся в Нижнекотицкий залив с ЮВ, что указывает на активную аккумуляцию речных наносов в заливе.

3. В долине среднего течения р. Крапивенки по космическим снимкам читаются следы крупных разветвленных русел, которые могут указывать на бóльшие объемы стока в прошлом. Высокий сток мог обеспечивать интенсивное поступление наносов, за счет которого при низких уклонах формировалась внутренняя дельта. Большие величины климатического (не ледникового) речного стока в бассейне Волги и в целом в центральной части Русской равнины в позднеледниковье установлены ранее в [27, 29].

4. Западное побережье Нижнекотицкого залива имеет признаки аллювиально-дельтовой аккумуляции – низменное заболоченное пространство с наличием брошенных меандрирующих русел, дешифрируемых на космических снимках. Дельта расположена в устье относительно крупной (ширина до 200 м, глубина 10–15 м) долины с частично заболоченным днищем. В настоящее время по долине протекает ручей, берущий начало у д. Спицино. Вероятно, дельта имеет реликтовую природу и связана с этапами высокого стока по долине.

Таким образом, можно предположить, что палеодолина р. Селижаровки была перегорожена крупными конусами выноса (внутренними дельтами) р. Крапивенки и реки, впадавшей с СЗ в Нижнекотицкий залив. Максимальные темпы роста аллювиальной дамбы (и уровня озера) пришлись на позднеледниковье и начало голоцена (рис. 6). Вероятно, это было связано с этапом высокого стока по долинам рек, поставлявшим большие объемы наносов в низину Нижнекотицкого залива. Во второй половине голоцена темпы поступления наносов снизились и рост высоты аллювиальной дамбы замедлился. Уровень озера с момента его формирования постоянно поднимался, поэтому сценарий более высокого, чем сейчас, стояния озера в эпоху мезолита [5] подтверждения не находит.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Озеро Селигер на отдельных участках (наиболее крупный из них – Селижаровский плес) представляет собой затопленную систему речных долин. Трансформация речной системы в озерную произошла в последнее позднеледниковье – в период потепления бёллинг–аллерёд (14.5–12.5 тыс. л. н.). Подъем уровня воды в озере происходил на протяжении позднеледниковья и голоцена и составил суммарно 7–8 м. Максимальные темпы роста уровня озера пришлись на позднеледниковье и начало голоцена. Вероятной причиной превращения речной системы в озеро стало аллювиальное подпруживание палеодолины р. Селижаров-

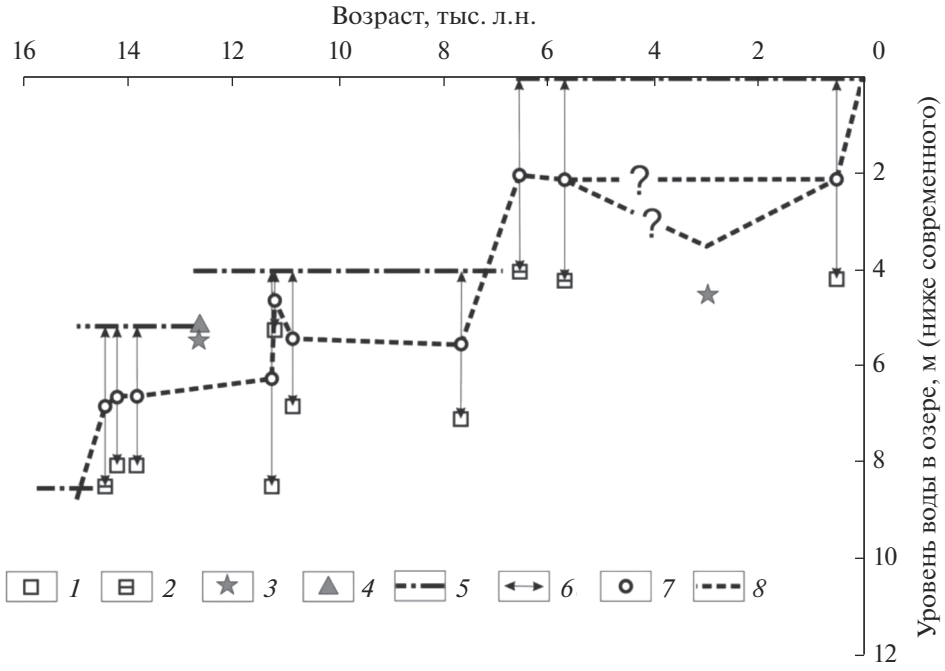


**Рис. 6.** Изменение уровня воды в системе оз. Селигер за последние 14.5 тыс. лет. Кривая построена на основе совмещения результатов фациального анализа и радиоуглеродного датирования отложений. *1* – озерный ил, *2* – подошва озерных илов, 3 – речной песок, *4* – торф, 5 – максимальный вероятный средний уровень воды, *6* – интервал неопределенности, *7* – средняя точка интервала неопределенности, *8* – кривая изменения среднего многолетнего уровня воды.

ки крупными конусами (внутренними дельтами), формировавшимися за счет интенсивного поступления наносов из долин ее двух притоков – р. Крапивенки и ручья без названия, берущего начало у д. Спицино. После освобождения территории от последнего ледника сток из бассейна о. Селигер всегда направлялся в бассейн Волги, что следует учитывать при реконструкциях величин ее стока и водного баланса приемного водоема (Каспия).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Анучин Д.Н.* Озера области истоков Волги и верховьев Западной Двины. М.: Т-во “Типография А.И. Мамонтова”, 1898. 56 с.
2. *Бреховских Б.Ф., Волкова З.В., Золотарев Н.С.* Современное экологическое состояние озера Селигер // Вод. ресурсы. 1997. Т. 24. № 3. С. 344–351.
3. *Большаков В. А.* Использование методов магнетизма горных пород при изучении новейших отложений. М.: ГЕОС, 1996. 192 с.
4. *Бурмистров И.Ф.* Морфологическая и гидрохимическая характеристика озера Селигер // Озеро Селигер и его рыбные ресурсы. Калинин, 1963. С. 15–36.
5. *Верещагина И.В.* Поселения южного побережья Селижаровского плеса оз. Селигер // Каменный век Верхневолжского региона. Вып. 2. СПб.: ИИМК РАН, 1997. С. 63–105.
6. *Гричук В.П., Заклинская Е.Д.* Анализ ископаемых пыльцы и спор и его применение в палеогеографии. М.: ОГИЗ, ГЕОГРАФГИЗ, 1948. 224 с.
7. *Дорофеев А.А.* К вопросу о классификации островов озера Селигер // Географ. вестн. 2013. Т. 2 (25). С. 110–122.
8. *Квасов Д.Д.* Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы. Л.: Наука, 1975. 278 с.
9. *Коновалова Н.И.* Озеро Селигер // Вопр. географии. М., 1951. Сб. 26. Гидрология. С. 267–274.
10. *Косов В.И., Косова И.В.* Экология озера Селигер. Тверь: Булат, 2001. 344 с.
11. *Косов В.И., Косова И.В., Левинский В.В. и др.* Исследование распределения тяжелых металлов в донных отложениях оз. Селигер // Вод. ресурсы. 2004. Т. 31. № 1. С. 51–59.
12. *Леонов А.В., Шапоренко С.И., Шилькрот Г.С., Ясинский С.В.* Геоэкологическая характеристика озера Селигер // Вод. ресурсы. 2002. Т. 29. № 2. С. 152–167.
13. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1. Вып. 23. Ч. 1. 1986. 628 с.
14. *Никитин С.Н.* Бассейн Волги (Исследования Гидрогеологического отдела 1894–1898 гг.) // Тр. экспедиции для исследования источников главнейших рек Европейской России, издаваемые Начальником Экспедиции, Генерал-Лейтенантом А.А. Тилло. СПб.: Типо-литогр. К. Биркендельфа, 1899. 228 с.

15. *Соловьев М.М.* Исторический очерк сапропелевого дела в районе озера Селигер // Тр. Сапропелевого ин-та. Л. 1934. Т. 1. С 19–26.
16. *Столярова Т.И.* Дочетвертичные отложения. Геологическая карта СССР. Масштаб 1 : 200000. Сер. Московская. Лист О-36-XXVIII / Под ред. *В.А. Котлукова*. М.: М-во геологии и охраны недр СССР, 1961.
17. *Столярова Т.И.* Четвертичные отложения. Геологическая карта СССР. Масштаб 1 : 200000. Сер. Московская. Лист О-36-XXVIII / Под ред. *В.А. Котлукова*. М.: М-во геологии и охраны недр СССР, 1961.
18. *Тимофеев В.И.* Стоянки Залесья и некоторые вопросы изучения Валдайской неолитической культуры // Каменный век Верхневолжского региона. Вып. 2. СПб.: ИИМК РАН, 1997. С. 107–168.
19. *Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А. и др.* Палеомагнитология. Л.: Недра, 1982. 312 с.
20. *Цыганов А.А.* Морфометрия плесов и островов озера Селигер // Вестн. ТвГУ. Сер. География и геоэкология. 2011. Т. 1 (9). С. 35–48.
21. *Чеботарева Н.С., Фаустова М.А.* Формы рельефа краевых зон, созданных в период деградации последнего оледенения // Последний ледниковый покров на северо-западе Европейской части СССР / Гл. ред. *И.П. Герасимов*. М., 1969. С. 31–57.
22. *Шапоренко С.И.* Общая физико-географическая характеристика района озера Селигер // Структура и функционирование геосистемы озера Селигер в современных условиях. СПб.: Наука, 2004. С. 26–32.
23. *Bengtsson L., Enel M.* Chemical analysis, in Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology. Chicago: John Wiley & Sons, 1986. P. 423–451.
24. *Bronk Ramsey C.* Bayesian analysis of radiocarbon dates // Radiocarbon. 2009. 51 (1). P. 337–360.
25. *Gorlach A., Hang T., Kalm V.* GIS-based reconstruction of Late Weichselian proglacial lakes in northwestern Russia and Belarus // Boreas. 2017. V. 46. № 3. P. 486–502.
26. *Heiri O., Lotter A.F., Lemcke G.* Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results // J. Paleolimnol. 2001. V. 25. P. 101–110.
27. *Panin A., Matlakhova E.* Fluvial chronology in the East European Plain over the last 20 ka and its palaeohydrological implications // Catena. 2015. V. 130. P. 46–61.
28. *Reimer P.J., Bard E., Bayliss A. et al.* IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50000 years cal BP // Radiocarbon. 2013. 55 (4). P. 1869–1887.
29. *Sidorchuk A.Yu., Panin A.B., Borisova O.K.* Morphology of river channels and surface runoff in the Volga River basin (East European Plain) during the Late Glacial period // Geomorphol. 2009. V. 113. P. 137–157.
30. *Wright H.E.* A square-rod piston sampler for lake sediments // J. Sedimentary Res. 1967. V. 37. № 3. P. 975–976.

*ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, 2021, том 48, № 5, с. 492–499*

## ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

*УДК 532.543.2*

# ОДИН ИЗ ПОДХОДОВ К ЧИСЛЕННОМУ ИССЛЕДОВАНИЮ ГИДРОЛОГИИ ДЕЛЬТОВОЙ ОБЛАСТИ ДОНА[1]

**© 2021 г. А. Л. Чикин[a], *, А. В. Клещенков[a], Л. Г. Чикина[b]**

[a] *Федеральный исследовательский центр ЮНЦ РАН, Ростов-на-Дону, 344006 Россия*

[b] *Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344006 Россия*

**e-mail: chikin1956@gmail.com*

Поступила в редакцию 04.11.2020 г.
После доработки 23.03.2021 г.
Принята к публикации 30.03.2021 г.

Движение воды в дельте р. Дон описывается системой уравнений Сен-Венана, записанной в характеристической форме. Область расчета представлена в виде графа, ребра которого соответствуют открытым участкам русла, а вершины – узлам разветвления. Решение задачи проведено конечно-разностными методами, уравнения системы аппроксимируются неявными схемами. Проведено сравнение расходов воды и скоростей течения в основных рукавах дельты Дона по результатам расчетов и наблюденным данным, что показывает адекватность представленной модели. С помощью модели восстановлена картина течений в рукавах, которая наблюдалась в период с 13 по 15 сентября 2016 г.

*Ключевые слова:* русловой поток, вычислительный эксперимент, уравнения Сен-Венана.

**DOI:** 10.31857/S0321059621050072

## ВВЕДЕНИЕ

Устьевая область Дона состоит из устьевого участка реки протяженностью от ст. Раздорской до вершины дельты в районе г. Ростова-на-Дону, дельтового участка, а также Таганрогского залива вплоть до условной линии, соединяющей Должанскую и Белосарайскую косы [13, 14]. В ее пределах наблюдаются такие опасные и неблагоприятные процессы, как сгонно-нагонные колебания уровня, заиление рукавов и морских каналов, а также поступление морских трансформированных вод в рукава дельты Дона [12].

Устьевая область Дона – район с развитыми судоходством и хозяйственной деятельностью. Это приводит к необходимости изучения и прогнозирования гидрофизических явлений для управления природно-хозяйственной системой дельты Дона и минимизации последствий упомянутых выше опасных явлений и процессов. Так, при значительных сгонных явлениях в устьевой области Дона возникают ситуации, когда суда вынуждены простаивать по несколько дней в восточной части Таганрогского залива или на рейде портов Азов и Ростов [11].

Понимание закономерностей распределения стока по рукавам дельты Дона в условиях преобладания как прямых (из реки в Таганрогский залив), так и обратных (из залива в реку) течений дает ключ к оценке развития водотоков дельты, их заиления и размыва, переформирования гидрографической сети дельты и, в конечном итоге, является ключевым элементом рационального природопользования в устьевой области Дона. Это особенно важно с учетом тенденций сокращения жидкого и твердого стока Дона в современный маловодный период. Недоучет гидрологических факторов может в ближайшем будущем привести к деградации дельтовых ландшафтов, что частично происходит уже сейчас – заиление и отмирание мелких рукавов и ериков дельты приводит к сокращению ценных нерестилищ, заболачиванию отдельных участков [11].

Исследованиям гидрологии устьевой области Дона посвящены работы плеяды исследователей, таких как Н.А. Родионов, В.Г. Симов, В.В. Краюшин, В.Н. Михайлов, В.Ф. Полонский и др. С развитием научных знаний об устьевых областях рек в практику гидрологических исследований

[1] Работа выполнена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН в части анализа гидрологических процессов (государственная регистрация АААА-А18-118122790121-5), научного проекта РФФИ в части разработки методов численного моделирования (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 Южного федерального университета "Высокопроизводительные вычисления".

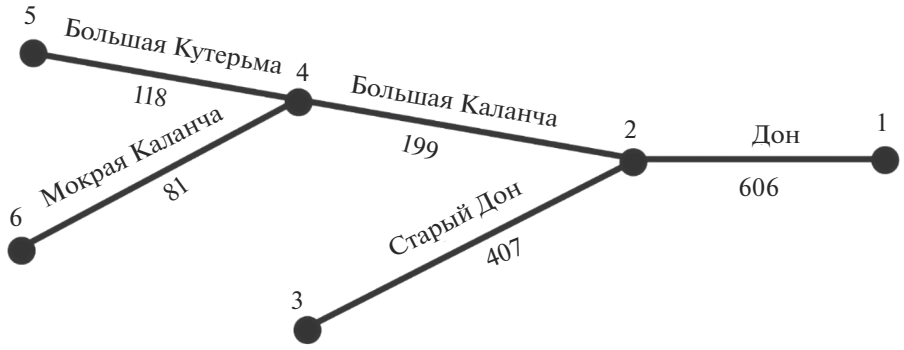


**Рис. 1.** Схема дельты Дона и распределение расходов воды $Q$ (м$^3$/с) по рукавам при среднем расходе поступающей воды (ст. Раздорская). 1–6 – концевые узлы и узлы разветвления.

стали применяться численные методы гидрологического моделирования. Они широко используются для задач исследования поступления морских вод в устья рек [5, 10], анализа перераспределения стока по рукавам в дельтах [1, 9], изучений колебаний уровенного режима [9].

Много работ посвящено моделированию течений в открытом русле, основанных на уравнениях мелкой воды. Численное исследование стратифицированных многослойных речных потоков приведено в [4]; при этом допускается, что рельеф дна может иметь сложную морфометрию. В работе [16] подробно описан алгоритм моделирования течений, где область расчета может иметь как разрывы дна, так и зоны осушения. Алгоритм основан на методе конечных объемов с использованием неструктурированных треугольно-четырехугольных сеток.

В настоящей работе представлен один из подходов к численному исследованию гидрологии дельтовой части Дона, когда основное русло распадается на несколько рукавов, впадающих в Таганрогский залив.

## ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Для основного русла Дона от ст. Раздорской до вершины дельты, состоящего только из одной открытой части, в [15] с помощью математической модели проведено численное исследование зависимости поверхностного уровня воды от расхода поступающей воды и уровня воды в принимающем водоеме. В данной работе область расчета состоит из открытых русел, концевых узлов и узлов разветвления.

Следуя [3], дельту Дона представим в виде основных рукавов – Старый Дон, Большая Каланча, переходящая в Мокрую Каланчу и Большую Кутерьму, и узлов разветвлений. Дельта Дона схематично изображена на (рис. 1) и представляет собой граф из пяти ребер, соответствующих участкам открытых русел, и шести вершин, четыре из которых соответствуют концевым узлам, а две – узлам разветвлений.

Нумерацию отрезков можно проводить произвольно. На решение задачи это не влияет, влияет только на ширину ленты матрицы системы линейных алгебраических уравнений, получаемых при конечно-разностной аппроксимации уравнений движения воды в русле.

Отрезкам соответствуют распределенные параметры $Q(x,t), z(x,t)$, а узлам разветвлений – сосредоточенные параметры $Q_*(x,t), z_*(x,t)$.

Движение воды в открытом русле без распределенного бокового притока задается следующей системой дифференциальных уравнений [8, 17]:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial W}{\partial t} + \dfrac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ \dfrac{\partial Q}{\partial t} + \alpha_s \dfrac{\partial \left(Q^2/W\right)}{\partial x} + \mathrm{g}W\left(\dfrac{\partial z}{\partial x} + \dfrac{Q|Q|}{K^2}\right) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $Q$ – расход воды, м$^3$/с; $t$ – время, с; $W$ – площадь живого сечения, м$^2$; $z$ – уровень воды, м; $x$ – координата, м; $K$ – модуль расхода, м$^3$/с; g = 9.81 – ускорение свободного падения, м/с$^2$. Коэффициент $\alpha_s \geq 1$ учитывает неравномерное распределение скоростей по живому сечению потока. Для идеализированных русел рукавов с параболической формой поперечного сечения $\alpha_s$ обычно близок к единице. Модуль расхода $K$ вычисляется по формуле: $K = WC\sqrt{R}$, здесь $R$ – гидравлический радиус; $C$ – коэффициент Шези, найденный по формуле Маннинга: $C = \dfrac{R^{\frac{1}{6}}}{n}$, $n$ – шероховатость дна.

В случае, когда поперечное сечение русла имеет параболический профиль, система (1) может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial z}{\partial t} + \dfrac{1}{B}\dfrac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ \dfrac{\partial Q}{\partial t} + \mathrm{g}W\dfrac{\partial z}{\partial x} + \alpha_s v\dfrac{\partial Q}{\partial x} = -\alpha_s Q\dfrac{\partial v}{\partial x} - \mathrm{g}W\dfrac{Q|Q|}{K^2}, \end{cases} \quad (2)$$

где $B$ – ширина русла, м. Здесь воспользовались тем, что $\dfrac{Q}{W} = v$ – скорости течения.

Систему (2) запишем в операторном виде:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + A\frac{\partial \bar{U}}{\partial x} = \bar{b}, \quad (3)$$

где $\bar{U} = \begin{pmatrix} z \\ Q \end{pmatrix}$, $A = \begin{pmatrix} 0 & 1/B \\ \mathrm{g}W & \alpha_s v \end{pmatrix}$, $\bar{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ \varphi \end{pmatrix}$, $\varphi = -\alpha_s Q\dfrac{\partial v}{\partial x} - \mathrm{g}W\dfrac{Q|Q|}{K^2}$.

Собственные значения оператора $A$ находим из уравнения $\det|A - \lambda E| = 0$, откуда получаем

$$\begin{vmatrix} \lambda & 1/B \\ \mathrm{g}W & \alpha_s v - \lambda \end{vmatrix} = 0.$$

Решая это уравнение, получаем два собственных значения $\lambda_{1,2} = \dfrac{\alpha_s v \pm \sqrt{(\alpha_s v)^2 + 4c^2}}{2}$, где $c^2 = \dfrac{\mathrm{g}W}{B}$. Собственные векторы $I^k = \begin{pmatrix} x_1^k \\ x_2^k \end{pmatrix}, k = 1,2$ находим из системы уравнений

$$\begin{pmatrix} x_1^k & x_2^k \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 0 & 1/B \\ \mathrm{g}W & \alpha_s v - \lambda \end{pmatrix} = \frac{\alpha_s v \pm \sqrt{(\alpha_s v)^2 + 4c^2}}{2}\begin{pmatrix} x_1^k & x_2^k \end{pmatrix}.$$

Обозначим $C^+ = \dfrac{\alpha_s v + \sqrt{(\alpha_s v)^2 + 4c^2}}{2}$, $C^- = \dfrac{\alpha_s v - \sqrt{(\alpha_s v)^2 + 4c^2}}{2}$. Полагая $x_1^k = \mathrm{g}W$, получим собственные векторы $\bar{I}_1 = \left(\mathrm{g}W;\ C^+\right)$, $\bar{I}_2 = \left(\mathrm{g}W;\ C^-\right)$. Умножая (3) слева на собственные векторы, получим характеристическую форму системы (3):

$$\begin{cases} \left(\mathrm{g}W\ \ C^+\right)\begin{pmatrix} \dfrac{\partial z}{\partial t} \\ \dfrac{\partial Q}{\partial t} \end{pmatrix} + \left(\mathrm{g}W\ \ C^+\right)\times \\ \times\begin{pmatrix} 0 & 1/B \\ \mathrm{g}W & \alpha_s v \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \dfrac{\partial z}{\partial x} \\ \dfrac{\partial Q}{\partial x} \end{pmatrix} = \left(\mathrm{g}W\ \ C^+\right)\begin{pmatrix} 0 \\ \varphi \end{pmatrix} \\ \left(\mathrm{g}W\ \ C^-\right)\begin{pmatrix} \dfrac{\partial z}{\partial t} \\ \dfrac{\partial Q}{\partial t} \end{pmatrix} + \left(\mathrm{g}W\ \ C^-\right)\times \\ \times\begin{pmatrix} 0 & 1/B \\ \mathrm{g}W & \alpha_s v \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \dfrac{\partial z}{\partial x} \\ \dfrac{\partial Q}{\partial x} \end{pmatrix} = \left(\mathrm{g}W\ \ C^-\right)\begin{pmatrix} 0 \\ \varphi \end{pmatrix}. \end{cases} \quad (4)$$

Перемножив матрицы (4) и разделив первое из уравнений на $C^+ \neq 0$, а второе на $C^- \neq 0$, получаем уравнения течения в характеристическом виде:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{g}W}{C^+}\dfrac{\partial z}{\partial t} + \dfrac{\partial Q}{\partial t} + \mathrm{g}W\dfrac{\partial z}{\partial x} + C^+\dfrac{\partial Q}{\partial x} = \varphi \\ \dfrac{\mathrm{g}W}{C^-}\dfrac{\partial z}{\partial t} + \dfrac{\partial Q}{\partial t} + \mathrm{g}W\dfrac{\partial z}{\partial x} + C^-\dfrac{\partial Q}{\partial x} = \varphi \end{cases}. \quad (6)$$

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 $z_k(X_k,t)$. Для сосредоточенных параметров задаются условия сопряжения, которые связывают значения распределенных параметров на концах отрезков и значения сосредоточенных параметров в вершинах. Условия сопряжения задаются следующим образом: сумма притоков–оттоков в узле разветвления равна нулю: $\sum_i Q_*^i = 0$ ($i$ – число рукавов, приходящих в узел разветвления), а уровни водной поверхности равны между собой: $z_i = z_*$.

## КОНЕЧНО-РАЗНОСТНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ

Приведем конечно-разностную аппроксимацию системы (6) на произвольном отрезке. Разобьем каждый отрезок, соответствующий открытому руслу, на $L$ узлов с шагом $\Delta = x_{j+1} - x_j$, $j = 2,3,\ldots,L-1$ (число $L$ для каждого отрезка может быть различным). Шаг по времени обозначим через $\tau$. При аппроксимации во внутренних точках отрезков разностный аналог системы (6) имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{g}W_j^n}{C^+\tau}\left(z_j^{n+1}-z_j^n\right)+\dfrac{1}{\tau}\left(Q_j^{n+1}-Q_j^n\right)+ \\ +\dfrac{\mathrm{g}W_j^n}{\Delta}\left(z_j^{n+1}-z_{j-1}^{n+1}\right)+\dfrac{C^+}{\Delta}\left(Q_j^{n+1}-Q_{j-1}^{n+1}\right)= \\ =-\left(\mathrm{g}W_j^n\dfrac{\left|Q_j^n\right|}{K^2}+\alpha_s\dfrac{v_j^n-v_{j-1}^n}{\Delta}\right)Q_j^{n+1} \\ \dfrac{\mathrm{g}W_j^n}{C^-\tau}\left(z_j^{n+1}-z_j^n\right)+\dfrac{1}{\tau}\left(Q_j^{n+1}-Q_j^n\right)+ \\ +\dfrac{\mathrm{g}W_j^n}{\Delta}\left(z_{j+1}^{n+1}-z_j^{n+1}\right)+\dfrac{C^-}{\Delta}\left(Q_{j+1}^{n+1}-Q_j^{n+1}\right)= \\ =-\left(\mathrm{g}W_j^n\dfrac{\left|Q_j^n\right|}{K^2}+\alpha_s\dfrac{v_{j+1}^n-v_j^n}{\Delta}\right)Q_j^{n+1}. \end{cases} \quad (7)$$

Систему (7) представим в виде

$$\begin{cases} c_1z_{j-1}+c_2Q_{j-1}+c_3z_j+c_4Q_j=f_j^n \\ m_3z_j+m_4Q_j+m_5z_{j+1}+m_6Q_{j+1}=q_j^n, \end{cases} \quad (8)$$

где

$$c_1=-\frac{\mathrm{g}W_j^n}{\Delta},\quad c_2=-\frac{C^+}{\Delta},\quad c_3=\frac{\mathrm{g}W_j^n}{C^+\tau}+\frac{\mathrm{g}W_j^n}{\Delta},$$

$$c_4=\frac{1}{\tau}+\frac{C^+}{\Delta}+\frac{\mathrm{g}W_j^n\left|Q_j^n\right|}{K^2}+\alpha_s\frac{v_j^n-v_{j-1}^n}{\Delta},$$

$$f_j^n=\frac{\mathrm{g}W_j^n}{C^+\tau}z_j^n+\frac{Q_j^n}{\tau},$$

$$m_3=\frac{\mathrm{g}W_j^n}{C^-\tau}-\frac{\mathrm{g}W_j^n}{\Delta},\quad m_4=\frac{1}{\tau}-\frac{C^-}{\Delta}+\frac{\mathrm{g}W_j^n\left|Q_j^n\right|}{K^2}+$$

$$+\alpha_s\frac{v_{j+1}^n-v_j^n}{\Delta},\quad m_5=\frac{\mathrm{g}W_j^n}{\Delta},\quad m_6=\frac{C^-}{\Delta},$$

$$q_j^n=\frac{\mathrm{g}W_j^n}{C^-\tau}z_j^n+\frac{Q_j^n}{\tau}.$$

При аппроксимации на левом конце каждого отрезка ($j=1$ – его начало) берем второе уравнение из (7)

$$\frac{\mathrm{g}W_1^n}{C^-\tau}\left(z_1^{n+1}-z_1^n\right)+\frac{1}{\tau}\left(Q_1^{n+1}-Q_1^n\right)+$$

$$+\frac{\mathrm{g}W_1^n}{\Delta}\left(z_2^{n+1}-z_1^{n+1}\right)+\frac{C^-}{\Delta}\left(Q_2^{n+1}-Q_1^{n+1}\right)=$$

$$=-\left(\mathrm{g}W_1^n\frac{\left|Q_1^n\right|}{K^2}+\alpha_s\frac{v_2^n-v_1^n}{\Delta}\right)Q_1^{n+1}.$$

При аппроксимации на правом конце каждого отрезка ($j=L$ – его конец) берем первое уравнение из (7)

$$\frac{\mathrm{g}W_L^n}{C^+\tau}\left(z_L^{n+1}-z_L^n\right)+\frac{1}{\tau}\left(Q_L^{n+1}-Q_L^n\right)+\frac{\mathrm{g}W_L^n}{\Delta}\left(z_L^{n+1}-z_{L-1}^{n+1}\right)+$$

$$+\frac{C^+}{\Delta}\left(Q_L^{n+1}-Q_{L-1}^{n+1}\right)=-\left(\mathrm{g}W_L^n\frac{\left|Q_L^n\right|}{K^2}+\alpha_s\frac{v_L^n-v_{L-1}^n}{\Delta}\right)Q_L^{n+1}.$$

При конечно-разностной аппроксимации всей области расчета ведется сквозная нумерация узлов сетки, и для каждого отрезка в системе (8) будет свой индекс $j$.

Получаемая матрица системы (8) 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.

## ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ

Задача решалась конечно-разностными методами на равномерной сетке. Весь расчетный участок от ст. Раздорской до Таганрогского залива был разбит на ячейки с шагом 1000 м. Шаг по времени был равен 600 с. После индексации ячеек и конечно-разностной аппроксимации системы уравнений получена ленточная матрица общего вида с шириной ленты 85 и общим числом неизвестных 378. Решение системы линейных алгебраических уравнений проводилось с помощью пакета LAPACK.

Калибровка модели проводилась с учетом двух условий. Во-первых, расчетные отметки уровня водной поверхности должны быть равны определенным значениям на станциях наблюдений в городах Ростове-на-Дону и Аксае, станицах Багаевской и Раздорской. При этом предполагалось, что расход воды, вышеуказанные отметки уровня воды и уровень в Таганрогском заливе – средние за период наблюдений с 2001 по 2015 г. [7]. Результаты статистической обработки данных наблюдений приведены в [15], откуда видно, что среднее значение расхода равно 599 м$^3$/с; а уровни водной поверхности на станциях наблюдений приведены в табл. 1. Уровень воды в Таганрогском заливе считался равным –0.34 м (БС). Во-вторых, расчетные величины расходов воды и скорости течения должны совпадать с измеренными величинами на станциях наблюдений (рис. 2). Измерения проводились в период 22–23 сентября 2014 г.

Калибровка модели проводилась путем подбора коэффициентов шероховатости (табл. 2), каждый из которых задавался на определенном участке русла и в процессе расчета не менялся. Для этой цели дельтовая область Дона была разбита на следующие участки: рукава Большая Кутерьма, Мокрая Каланча, Большая Каланча, Старый Дон; участки русла Дона от вершины дельты

до Ростова, от Ростова до Аксая, от Аксая до Багаевской, от Багаевской до Раздорской.

Бесспорно, коэффициенты шероховатости русла имеют большое значение для распределения расходов воды и наносов по рукавам дельты, описывая реальные изменения шероховатости участков русла и их гидравлические сопротивления потоку [2, 5]. Однако в представленной работе значения коэффициентов шероховатости подбираются с целью получения наблюденных значений уровня водной поверхности на гидропостах при заданном расходе поступающей воды, в том числе с использованием соответствующих таблиц (коэффициенты шероховатости $n$ по М.Ф. Срибному и И.Ф. Карасеву) [2]. При этом сохраняются реальные соотношения изменчивости шероховатости отдельных участков русла. Из табл. 2 видно, что рукава Большая Каланча, Мокрая Каланча, Большая Кутерьма характеризуются большим сопротивлением потоку, что обусловлено отсутствием здесь прорези судоходного канала, характерной для остальных рассмотренных участков дельты Дона, чередованием плесов и перекатов, сильным развитием водной растительности и меньшей средней глубиной. Также следует отметить, что в других моделях эти коэффициенты могут принимать иные значения. Также эти коэффициенты могут несколько отличаться от коэффициентов, полученных опытным путем. Например, в работе [12] приведено значение $n = 0.023$, определенное по данным натурных экспериментов, выполненных в 1981 и 1982 гг.

Большое влияние на результаты расчета оказывает начальное приближение исходных данных, так как счет ведется не до получения установившегося решения, а на определенный промежуток времени, как правило – 1–2 сут. При проведении расчетов 22–23 сентября 2014 г. в качестве начального распределения скоростей, расхода и уровня поверхности воды взяты параметры установившегося течения при расходе 453 м$^3$/с и

**Таблица 1.** Средние значения уровня воды на станциях наблюдений за гидрологическими параметрами р. Дон

| Станция наблюдения | Уровень воды, м (БС) |
|---|---|
| Ростов-на-Дону | 0.05 |
| Аксай | 0.23 |
| Багаевская | 0.99 |
| Раздорская | 2.23 |

**Таблица 2.** Значения коэффициентов шероховатости $n$ для участков Дона и основных рукавов его дельты

| Русло Дона | $n$ |
|---|---|
| Дон (от вершины дельты до Ростова) | 0.0284 |
| Дон (от Ростова до Аксая) | 0.0189 |
| Дон (от Аксая до Багаевской) | 0.0164 |
| Дон (от Багаевской до Раздорской) | 0.0144 |
| Старый Дон | 0.0238 |
| Большая Каланча | 0.0360 |
| Мокрая Каланча | 0.0396 |
| Большая Кутерьма | 0.0414 |

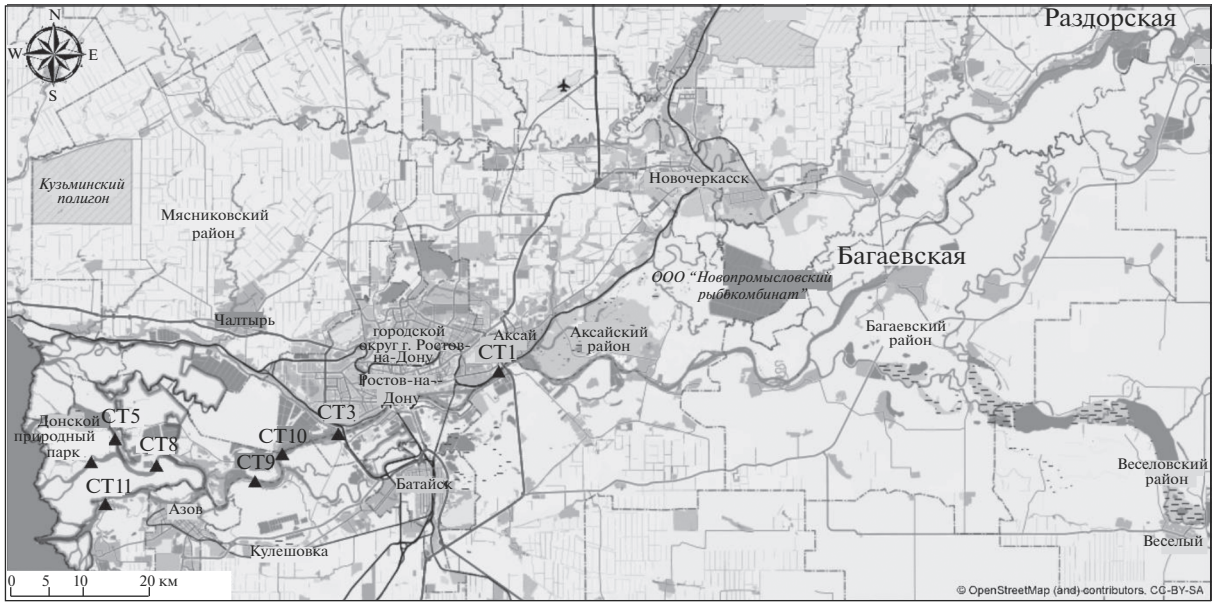


**Рис. 2.** Расположение станций, где проводились наблюдения за гидрологическими параметрами рукавов Дона.

**Таблица 3.** Наблюденные и расчетные значения скорости течения $V_{nat}$ и $V = \frac{Q}{W}$, наблюденные и расчетные величины расхода воды $Q_{nat}$ и $Q$ и относительная погрешность δ при их сравнении (22–23 сентября 2014 г.)

| Станции | Время | $V$, м/с | $V_{nat}$, м/с | δ, % | $Q$, м$^3$/с | $Q_{nat}$, м$^3$/с | δ, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| СТ3 | 22.09.2014, 19:15 | 0.25 | 0.281 | 11.03 | 452.6 | 457 | 0.96 |
| СТ5 | 23.09.2014, 12:50 | 0.06 | 0.079 | 24.05 | 66.3 | 77.3 | 14.23 |
| СТ7 | 23.09.2014, 13:50 | 0.11 | 0.042 | 161.90 | 29.7 | 32.5 | 8.62 |
| СТ8 | 23.09.2014, 14:45 | 0.1 | 0.063 | 58.73 | 104.5 | 104 | 0.48 |
| СТ9 | 23.09.2014, 16:15 | 0.17 | 0.145 | 17.24 | 372.9 | 303 | 23.07 |
| СТ10 | 23.09.2014, 17:00 | 0.18 | 0.196 | 8.16 | 392 | 382 | 2.62 |
| СТ11 | 23.09.2014, 18:10 | 0.13 | 0.139 | 6.47 | 267.1 | 152.5 | 75.15 |

уровне воды в Таганрогском заливе –0.65 м (БС) (эти данные зафиксированы 22 сентября 2014 г.).

В табл. 3 представлены наблюденные на станциях и рассчитанные в ходе подбора коэффициентов шероховатости величины скорости течения и расхода, а также время снятия этих показаний.

Большие расхождения значений скорости течения (СТ7, СТ8), возможно, появляются из-за того, что при моделировании предполагается параболический профиль поперечного сечения русла с наибольшей глубиной в его середине, что на самом деле не совсем так. Возникающая при этом ошибка в вычислении площади сечения приводит к ошибке при расчете скорости течения.

Большое расхождение расчетных и наблюденных величин расхода на СТ11 (75%), возможно, произошло из-за влияния локального подпора воды со стороны моря при формировании противотечения. По закону сохранения объема несжимаемой жидкости сумма расходов на СТ8 и СТ11 должна быть равна расходу на СТ9 с приближением. В данном случае сумма расходов на 47 м$^3$/с меньше расхода на СТ9, что связано с ослаблением восточного ветра и с формированием во время наблюдений на данной станции противотечения из Таганрогского залива в дельту Дона по глубокому врезу судоходного канала в системе рукавов Песчаный – Старый Дон. Расчетные же значения расходов дают практически точное совпадение суммы расходов на СТ8 и СТ11 с расходом на СТ9.

Проведен расчет распределения расходов воды по рукавам Дона при поступающем расходе воды 599 м$^3$/с (ст. Раздорская) и нулевом уровне воды в Таганрогском заливе. Результаты расчетов представлены на рис. 1.

С помощью представленной модели рассмотрена ситуация, когда после сгона воды наблюдался ее резкий подъем. Расход воды у ст. Раздорской задан равным 600 м$^3$/с, начальный уровень воды в Таганрогском заливе был равен –0.20 м (БС). Затем в течение 1.5 ч уровень восстановился до 0 м (БС) и оставался таким на протяжении 8 ч. На рис. 3 представлен график изменения расхода воды в точках, соответствующих станциям наблюдений в рукавах Дона. При таком скачке уровня воды в Таганрогском заливе наблюдается резкое снижение расхода воды в основном русле Дона и рук. Большая Каланча, а в рукавах Старый Дон, Большая Кутерьма и Мокрая Каланча расход принимает отрицательные значения, что соответствует обратному течению воды. Затем в течение 8–12 ч расход становится близким к первоначальному.

Похожая картина течений в рукавах наблюдалась в период с 13 по 15 сентября 2016 г. В десятых числах сентября преобладал ветер северо-восточного направления, что вызвало сгон воды, а затем был ветер северо-западного направления, что способствовало быстрому поднятию уровня воды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный математический подход позволяет достаточно точно аппроксимировать гидрологические параметры в узлах сопряжения, что дает хорошую оценку гидрологической ситуации в дельтовой области Дона. Существенное ограничение применения данной модели – предположение об отсутствии поймы русла и о его параболической форме сечения. Такая идеализация русла при моделировании потоков в рукавах дельты Дона требует дальнейшего изучения. Кроме того, модель не предполагает влияния возможного противотечения, формирующегося по глубокому

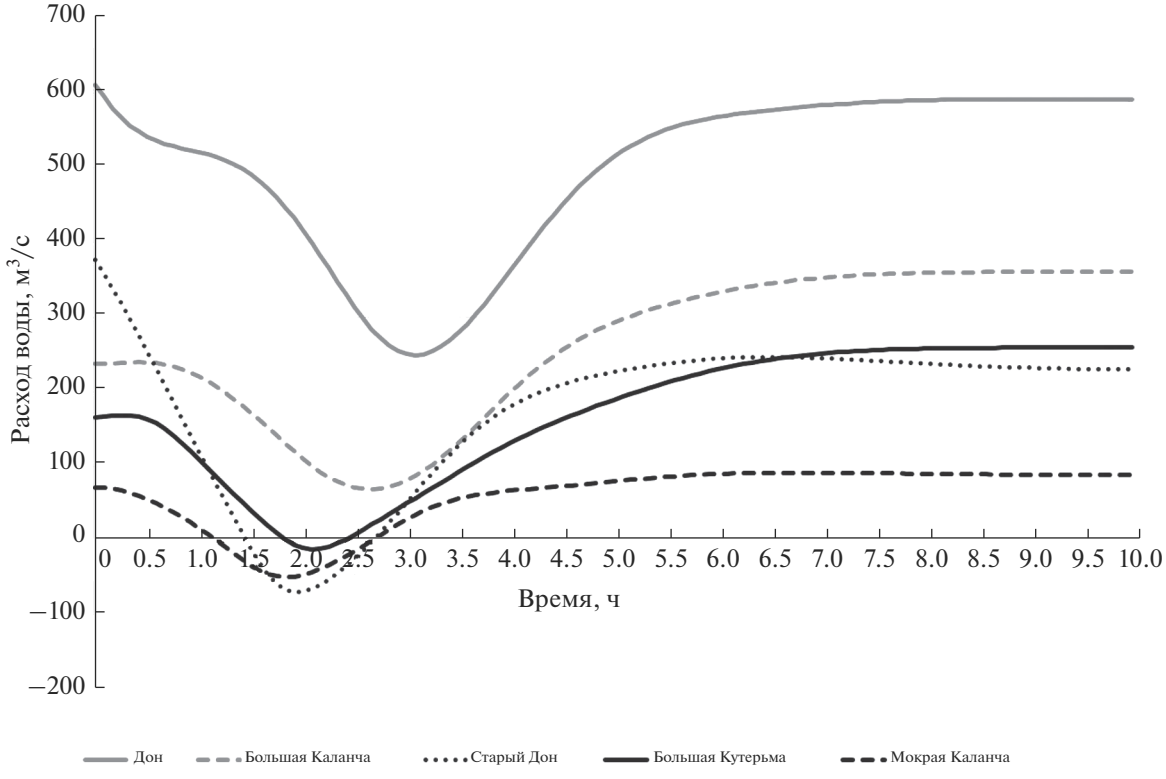


**Рис. 3.** Прогноз изменения расхода воды в рукавах Дона при подъеме уровня воды в Таганрогском заливе.

врезу судоходного канала, на расход в рук. Старый Дон. При выполнении этих условий модель позволяет рассчитывать изменение одних гидрологических параметров в зависимости от других. Предложенная математическая модель позволяет выполнить оценку распределения расходов воды по основным рукавам Дона в разных гидродинамических ситуациях. Сравнение результатов расчета и наблюденных данных подтверждает адекватность построенной математической модели.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алешкин С.А.* Математическое моделирование гидролого-морфологических процессов в неприливных дельтах рек. Дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2004. 243 с.
2. *Барышников Н. Б.* Гидравлические сопротивления речных русел. СПб.: РГГМУ, 2003. 146 с.
3. *Воеводин А.Ф., Никифоровская В.С., Овчарова А.С.* Численные методы решения задачи о неустановившемся движении воды на устьевых участках рек // Тр. ААНИИ. СПб.: Гидрометеоиздат, 1983. Т. 378. С. 23–34.
4. *Жуликов Г.А., Алексюк А.И., Беликов В.В.* Численное моделирование речных течений в приближении многослойной мелкой воды // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения. Сб. науч. тр. Нижний Новгород: Изд-во Студия Ф1, 2019. С. 131–135.
5. *Иванов В.В., Михалев М.А., Марченко А.С., Пискун А.А., Чернин К.Е.* Гидравлический метод расчета водного и руслового режима в многорукавных руслах рек // Тр. ААНИИ. 1984. Т. 378. С. 5–22.
6. *Иванов В.В., Святский А.З.* Численное моделирование вторжения морских вод в устья рек в сезонном временном масштабе // Вод. ресурсы. 1987. № 5. С. 116–122.
7. Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России. [Электронный ресурс]. http://gis.vodinfo.ru/ (дата обращения: 19.06.2017)
8. *Корень В.И.* Математические модели в прогнозах речного стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 200 с.
9. *Крыленко И.Н.* Исследование подпорных явлений в узле слияния рек Сухоны и Юга на основе компьютерного моделирования // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5, География. 2009. № 1. С. 53–58.
10. *Лебедева С.В.* Динамика потока в многорукавном приливном устье крупной реки (на примере р. Северная Двина). Дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2016. 211 с.
11. *Матишов Г.Г., Ермолаев А.И.* Мир каравайки и взморья глазами донских казаков. Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2016. 224 с.

12. *Мишин Д.В., Полонский В.Ф.* Исследование нестационарных водных потоков в неприливном устье реки Дон // Тр. ГОИН. 2013. № 214. С. 166–179.

13. *Остроумова Л.П.* Исследование нагонных и сгонных явлений в морских устьях рек на примере устьевой области р. Дон // Метеорология и гидрология. 2017. № 12. С. 69–82.

14. *Симов В. Г.* Гидрология устьев рек Азовского моря. М.: Гидрометеоиздат, 1989. 328 с.

15. *Чикин А.Л., Клещенков А.В., Чикина Л.Г., Коршун А.М.* Сгонно-нагонные колебания уровня воды устьевой области Дона: численное моделирование и сценарии изменения // Наука Юга России. 2017. Т. 13. № 3. С. 39–49.

16. *Aleksyuk A.I., Belikov V.V.* Simulation of Shallow Water Flows With Shoaling Areas and Bottom Discontinuities // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2017. Т. 57. № 2. С. 318–339.

17. *Savenije H.H.G.* Salinity and Tides in Alluvial Estuaries. Second Completely Revised Edition. 2012. [Электронный ресурс]. http://www.salinityandtides.com (дата обращения: 08.01.2015)

*ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, 2021, том 48, № 5, с. 500–512*

## ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

*УДК 556.54:551.468(262.32)*

# НАВОДНЕНИЯ В ВЕНЕЦИАНСКОЙ ЛАГУНЕ И ИХ ПРИЧИНЫ[1]

**© 2021 г. М. В. Михайлова***

*Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия*

**e-mail: mv.mikhailova@gmail.com*

Поступила в редакцию 16.12.2020 г.
После доработки 15.01.2021 г.
Принята к публикации 21.01.2021 г.

Рассмотрены причины и особенности формирования штормовых нагонов в Венецианской лагуне. Описаны опыт наблюдений за уровнем моря в Венеции и история наводнений, вызванных штормовыми нагонами, в частности “аква альта” 1966 и 2019 гг. Отмечено увеличение частоты штормовых нагонов за последние 60 лет. Рассмотрены гидротехнические меры для защиты Венеции от наводнений.

*Ключевые слова:* Венецианская лагуна, штормовые нагоны, “аква альта”, наводнения, уровень моря, просадка грунта, MOSE.

**DOI:** 10.31857/S0321059621050138

Прибрежные районы, особенно в условиях низменного рельефа, подвержены влиянию повышения уровня моря, приливов и штормовых нагонов. К таким районам относятся объединенная дельта рек Рейн, Маас и Шельда (так называемая Голландская дельта), объединенная дельта Ганга и Брахмапутры в Индии, дельта Миссисипи в США и дельта Невы в России. В похожей ситуации находится северо-западное побережье Адриатического моря, включающее Венецианскую лагуну и дельту р. По, поверхность которого лежит ниже уровня моря.

В лагуне на островах расположена Венеция, некогда главный город Венецианской республики, а теперь – крупный морской порт, транспортный узел, важный промышленный и культурный центр (островная часть города включена в Список Всемирного наследия ЮНЕСКО). В течение многих веков лагуна и город подвергались воздействию сильных штормовых нагонов, вызванные ими наводнения имели катастрофический характер и наносили ущерб городскому хозяйству и населению. Поэтому исследования лагуны всегда представляли для венецианцев не только научный, но и практический интерес. Результаты крупномасштабных исследований, проведенные итальянскими специалистами в последние 30 лет, могут помочь в понимании сложных процессов взаимодействия приливов, штормовых нагонов, изменения уровня моря, просадки грунта. Задача статьи – аналитический обзор результатов исторических и современных гидрологических исследований Венецианской лагуны, выявление причин участившихся наводнений.

Для российских специалистов в области изучения устьевых областей рек, морских берегов результаты исследования Венецианской лагуны могут представлять интерес не только с познавательной, но и с научной точки зрения (в отечественной научной литературе публикаций об этом объекте нет).

## ВЕНЕЦИАНСКАЯ ЛАГУНА, ЕЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ

### *Сведения о современной Венецианской лагуне*

Венецианская лагуна – самая крупная в Италии (рис. 1). Лагуна с севера ограничена р. Силе, с юга – р. Брента. От Адриатического моря лагуну отделяет серия песчаных береговых баров Кавалино, Лидо, Пеллестрина и Кьоджа длиной 60 км [18]. Водообмен лагуны с Адриатическим морем происходит через три пролива: Лидо, Маламокко и Кьоджа (ширина 800, 400 и 380 м соответственно [18]). Венецианская лагуна имеет продолговатую изогнутую форму; ее площадь составляет ~550 км$^2$ [18, 22], длина 50–55 км [4, 28], ширина 8–14 км [4], средняя глубина 1.2 м. Площадь водосборного бассейна лагуны составляет, по разным данным, от 1800 до 2000 км$^2$ [18, 22, 28].

Около четверти площади лагуны (140 км$^2$) занято илистыми отмелями (“barene”), частично

[1] Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема 0147-2019-0001, государственная регистрация АААА-А18-118022090056-0).

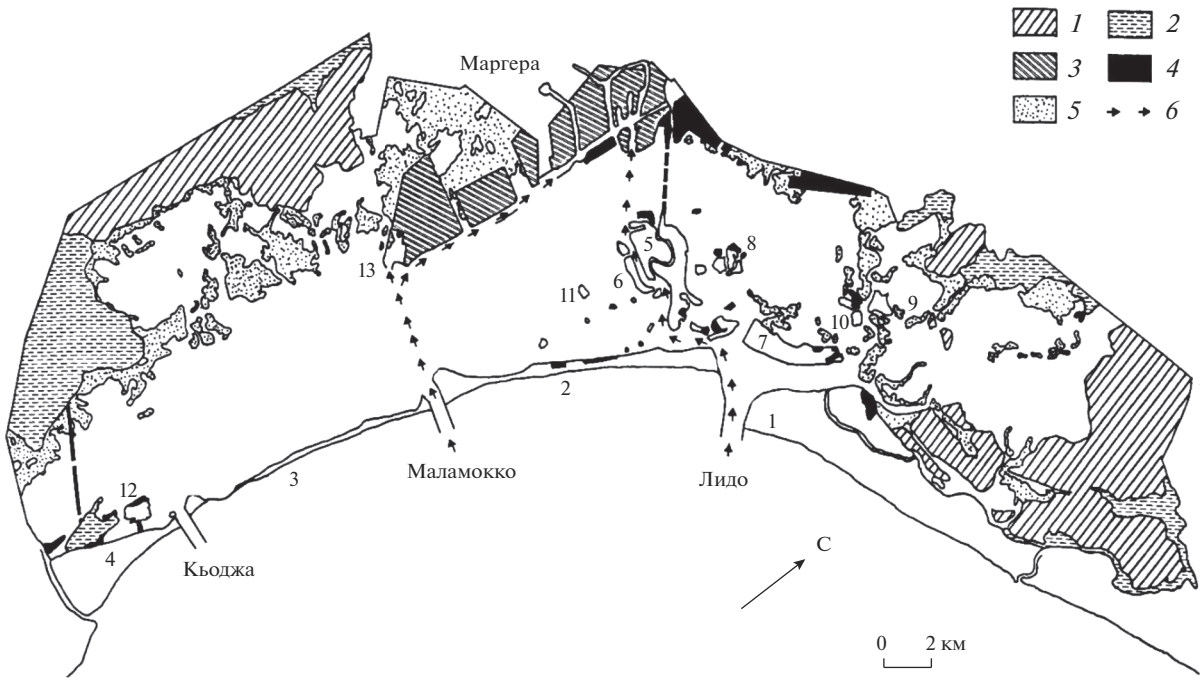


**Рис. 1.** Венецианская лагуна. Береговые бары: Каваллино (1), Лидо (2), Пеллестрина (3), Кьоджа (4). Острова: Венеция (5), Джудекка (6), Сан-Эрасмо (7), Мурано (8), Торчелло (9), Бурано (10), Сакка-Сессола (11), Кьоджа (12), Сан-Леонардо (13). *1* – рыбоводческие хозяйства; *2* – площади, занятые под сельское хозяйство; *3* – обвалованные отмели; *4* – урбанизированные территории; *5* – необвалованные отмели; *6* – судоходные каналы. Основа картосхемы из [26].

заболоченными и обнажающимися только во время отлива. Отмели, которые находятся вдоль каналов, образованы наносами, взмученными со дна каналов приливными течениями. Другие отмели сформированы наносами, вынесенными речными притоками. Отмели имеют разную площадь, распределены по лагуне очень неравномерно. Эти илистые отмели представляют собой своеобразные экосистемы с характерными животными и растениями, которые адаптировались к изменениям солености вод. Во время прилива отмели поглощают большой объем воды, который частично отдают во время отлива. Действуя как губки, они оказывают регулирующее воздействие на уровень воды в лагуне [28].

Еще одна особенность Венецианской лагуны – многочисленные острова, многие из которых находятся в ее центральной части. Острова образовались в результате, во-первых, отложения продуктов эрозии дна лагуны и литоральной зоны (они накапливались на отмелях под воздействием волн и течений); во-вторых, – отложения наносов, выносимых речными притоками в районах с замедленным водообменом. Кроме того, несколько островов созданы искусственно. Так, в 1870 г. был построен о. Сакка-Сессола (0.16 км$^2$), а в 1960 г. – о. Тронкетто (0.18 км$^2$). На некоторых островах были основаны города (например, Венеция, Мурано, Бурано), на других – созданы лазареты, монастыри, больницы. Во времена Наполеона ряд небольших островов использовался как редуты. В настоящее время большинство островов пустынны или находятся в относительно запущенном состоянии [28]. Самые большие острова в лагуне – Венеция (площадь 5.17 км$^2$), Сант-Эрасмо (3.26 км$^2$), Мурано (1.17 км$^2$), меньшие по размеру – Кьоджа, Джудекка, Маццорбо, Торчелло, Сант-Елена, Ла-Чертоза, Бурано, Тронкетто, Сакка-Физола, Сан-Микеле, Сакка-Сессола, Санта-Кристина и др. (рис. 1)

Административно бóльшая часть Венецианской лагуны относится к г. Венеции (столице провинции Венето), а ее юго-западная часть – к провинции Падуя.

### *История формирования Венецианской лагуны*

Венецианская лагуна образовалась 6–7 тыс. лет назад во время фландрской морской трансгрессии, когда воды Адриатического моря затопили приморскую часть палеодолины р. По [4]. Согласно описаниям Витрувия, Страбона, Ливия и Плиния, северо-восточное побережье от Равенны до Триеста представляло собой непрерывную це-

почку лагун и болот [25]. На месте современной Венецианской лагуны и дельты р. По было семь водоемов эстуарного типа (“Septem Maria”), соединяющихся с Адриатическим морем девятью проливами. Большинство этих водоемов заполнилось наносами, и только несколько лагун остались до сегодняшнего дня, включая самую крупную – Венецианскую. Формирование лагуны происходило при сложном сочетании естественных и антропогенных факторов: речного стока воды и наносов, просадки грунта, эвстатического повышения уровня моря, проникновения соленых морских вод, эрозии морского дна, отведения речного стока, углубления проливов и каналов. Об этих факторах будет сказано ниже.

Основное влияние на формирование лагуны оказало интенсивное отложение речных наносов впадавших в нее рек – Адидже, Брента, Баккильоне, Силе, Пьяве, а также дельтового рукава р. По. Отложение наносов этих рек на общем маленьком отрезке устьевого взморья и вдольбереговой поток наносов р. По с Ю привели к формированию серии береговых баров, перегораживающих выход из лагуны в море. Реконструкция эволюции лагуны, сделанная в 1799 г. венецианским историком Теодоро Вьеро, подтверждает, что приблизительно в 1000 г. н. э. у лагуны было девять проливов [12]. Однако в некоторых литературных источниках указывается восемь проливов [14].

Предки венецианцев (венеты) начали заселять регион, окружающий лагуну, с VIII в. до н. э. Они были главным образом купцами; купцами станут и венецианцы. В лагуне находили убежище от нашествий варваров изгнанники с материка. Датой основания г. Венеции принято считать 25 марта 421 г. (День Благовещенья).

Жизнь на островах и отсутствие пахотной земли способствовали развитию мореплавания. Со временем Венеция стала центром интенсивной торговли между странами Европы и Востока. В Европу попадали янтарь, воск, шелк, рис, кофе, пряности. В обратную сторону шли серебро, железо, шерстяные ткани, лес, зерно. Венеция и сама производила ценные товары: соль, муранское стекло и др. Так, лагуна стала основой существования Венецианской республики. Поэтому вся история Венеции сопровождалась крупномасштабными работами по отведению рек, несущих в лагуну большое количество наносов. Еще в XIV в. была построена дамба для отвода вод р. Брента за пределы лагуны, в 1639 г. отведена Пьяве, в 1683 г. – Силе. Эти работы продолжались до XVIII в., пока воздействие моря снова не стало доминирующим фактором, увеличивающим соленость вод лагуны и угрожающим затопить береговой бар между проливами Лидо и Маламокко. Именно тогда венецианцы стали строить защитные стенки (“murazzi”), которые существуют до сих пор [14].

В настоящее время в лагуну впадают лишь несколько небольших рек с суммарным средним расходом ~32 м$^3$/с. Наибольший вклад вносят реки Силоне, Дезе, Навильо-Брента и Тальо-Нуовиссимо (две последние канализованы) [22]. Сток наносов, поступающих в лагуну, – 33 тыс. т/год) [22].

Важно отметить, что отведение рукава р. По из лагуны привело к изменению стадии формирования дельты этой реки. На протяжении последних 2.5 тыс. лет ведущим в развитии дельты реки был процесс естественной миграции ее рукавов по дельтовой равнине. В итоге на побережье за это время сформировалось несколько крупных дельтовых лопастей. Предпосылкой формирования одной из таких лопастей был прорыв (~1150 г.) в районе деревни Фикароло, находящейся выше по течению от г. Феррара, в результате которого речные воды устремились на СВ в северную часть дельтовой равнины р. По. Новый водоток Фикароло быстро превратился в главный рукав дельты. Он дал начало формированию новой дельтовой лопасти, позже названной “дельтой эпохи Возрождения”. Левый рукав в приморской части этой лопасти получил название Форначи; впоследствии этот рукав стал впадать в Венецианскую лагуну. К 1500 г. южная часть лагуны уже была на грани занесения наносами Форначи, что представляло угрозу деятельность порта. Чтобы избежать этого, венецианцы в 1604 г. перенаправили сток рук. Форначи из лагуны по каналу Тальо-ди-Порто-Виро в море. Так началось формирование современной дельты По [2].

Начиная с XIX в. главное вмешательство человека было связано с реконструкцией трех проливов между лагуной и морем. Для того чтобы в лагуну могли заходить большие суда, в 1810–1865 гг. в прол. Маламокко были сооружены молы, в результате чего глубина в канале увеличилась до 9 м. В 1888 г. такие же молы были построены в проходе Лидо, что к 1905 г. увеличило его глубину до 9 м. Навигационные каналы внутри лагуны были углублены между 1820 и 1903 гг., было изъято ~36 млн м$^3$ отложений. В 1930–1934 гг. сооружены молы в прол. Кьоджа, в итоге глубина в нем была увеличена до 8 м. В то же самое время был углублен канал им. Виктора-Эммануила III между портами Маргера и Венеция. И наконец, в 1963–1969 гг. был выкопан новый канал (так называемый “canale dei petroli”) для судов большого тоннажа и нефтяных танкеров. Глубина канала на участке между Маламокко и нефтяным терминалом у о. Сан-Леонардо составляет 14.5 м, между Сан-Леонардо и Маргера – 12 м [14] (рис. 1).

Начиная с XIX в. площадь лагуны стала постепенно уменьшаться. К концу XIX в. часть площа-

ди лагуны была отведена под рыбоводческие хозяйства (“valli da pesca”); в XX в. занята под сельское хозяйство, дороги и аэропорт, новые рыбоводческие хозяйства.

Все эти мероприятия вызвали резкое изменение естественной эволюции лагуны, в частности увеличилась соленость воды, в настоящее время ее величина близка к солености Адриатического моря (30–33‰).

## “АКВА АЛЬТА” И ИСТОРИЯ НАВОДНЕНИЙ В ВЕНЕЦИИ

Явление “аква альта” (“acqua alta”), или “высокая вода”, очень хорошо известно даже тем, кто никогда не был в Венеции. “Аква альта” обычно случается поздней осенью и зимой, когда сочетание приливов, сильного ветра сирокко и штормовых нагонов вызывает большой приток морской воды в Венецианскую лагуну. “Аква альта” наступает, когда уровень моря превышает 80 см относительно нуля поста (за нуль поста принят средний уровень моря, измеренный на гидрологическом посту Пунта-делла-Салюте в 1897 г.). Уровень тротуаров в Венеции в среднем на 80 см выше отметки среднего уровень моря, а некоторые части города (например, площадь Сан-Марко) – всего лишь на 55 см. Поэтому при уровне воды >80 см начинается затопление пониженных частей города. В большинстве случаев наводнение в Венеции охватывает небольшую территорию вокруг площади Сан-Марко и продолжается несколько часов. Когда уровень моря поднимается на >110 см, под водой оказывается ~12% площади Венеции, на 120 см – ~35, 130 см – 69, 140 см – 90%, 180 см – почти вся Венеция бывает затоплена [3]. “Аква альта” наносит ущерб памятникам, фундаментам городских зданий, берегам каналов, набережным, угрожает историческому и художественному наследию города.

Первое описание “аква альта” относится к 589 г. [12], хотя, несомненно, этих событий и раньше было немало. Штормовые нагоны с 787 по 1867 г., приведшие к “аква альта”, подробно описаны в статье [13], содержащей уникальный набор исторических данных, критически рассмотренных и прокомментированных авторами.

Поскольку в исторических хрониках термины “аква альта” и “escrescenza” (подъем, повышение) применялись к наводнениям, вызванными как нагонами, так и морскими приливам и речными паводками, в трактовке каждого конкретного события авторы [13] учитывали контекст. Характеристики наводнений, как правило, были связаны с повседневной жизнью и препятствиями или повреждениями, которые они причиняли городу и его жителям. Приблизительный “масштаб бедствия” был таков: 1) “Сенат не собирается” (уровень воды соответствует современным 90–100 см); 2) “вода проникает в дома и церкви” (110–150 см), “вода повреждает товар” (90–150 см), “вода вторгается на улицы” (90–130 см), “невозможно пройти под мостами на лодке” (80–110 см); 3) “затоплены колодцы”, “затоплен город” (110–150 см); 4) “по площади Сан-Марко и по улицам можно плыть на корабле” (130–200 см). Авторам [13] также было сложно точно интерпретировать высоту подъема уровня воды, о котором сообщается в манускриптах, поскольку за прошедшее время архитектурные элементы зданий, взятые за “точку отсчета”, изменились. Это связано с тем, что здания были построены на рыхлых почвах и болотах и проседали под собственной тяжестью.

Следует особо отметить значительное наводнение 5 ноября 1686 г. О нем свидетельствуют несколько хроник того времени, одна из которых написана ученым: “вода достигла открытой веранды Лоджии” (входа в колокольню Сан-Марко) (“l’acqua arrivò al livello del pavimento esterno della Loggia”). Возможно, это было самое сильное наводнение в истории Венеции. В конце 1960-х гг. ученые, сравнив его с катастрофическим наводнением 4 ноября 1966 г., пришли к выводу, что с учетом реконструкции Лоджии и просадки грунта уровень воды в 1686 г. мог достигать отметки 254 см [15].

Безусловно, “аква альта” за период с 787 по 1867 г. трудно сопоставить с современными наводнениями, какие-то события могут быть переоценены очевидцами, но основные выводы из описаний многочисленных случаев “аква альта”, перечисленные в [13], можно сделать. Почти все наводнения в Венецианской лагуне за этот период вызваны, в первую очередь, сильными штормовыми нагонами и ветром сирокко, редкие наводнения произошли в результате повышения уровня моря во время сизигийного прилива, ливней, гроз, сильного волнения, землетрясений или сочетания нескольких факторов, но, как правило, на фоне штормового нагона.

С началом инструментальных наблюдений за уровнем моря с помощью мареографа сведения о наводнениях, вызванных штормовыми нагонами, стали более подробными. Наиболее известные случаи “аква альта” в XX и XXI вв., уровень моря при которых превышал 140 см, приведены в хронологическом порядке в табл. 1. На сайте [17] для каждого из 20 случаев приведены описание атмосферной ситуации в дни “аква альта”, карты погоды, графики атмосферного давления, ветра, наблюдаемого уровня моря и т.д.

### *Большое наводнение 1966 г. (“Acqua Granda”)*

Катастрофическому наводнению 1966 г. предшествовала следующая синоптическая ситуация:

**Таблица 1.** Сведения о значительных наводнениях в Венеции в XX и XXI вв.

| № | Дата | Уровень моря над нулем поста Пунта-делла-Салюте, см | № | Дата | Уровень моря над нулем поста Пунта-делла-Салюте, см |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 16 апреля 1936 г. | 147 | 11 | 16 ноября 2002 г. | 147 |
| 2 | 12 ноября 1951 г. | 151 | 12 | 1 декабря 2008 г. | 156 |
| 3 | 15 октября 1960 г. | 145 | 13 | 23 декабря 2009 г. | 144 |
| 4 | 4 ноября 1966 г. | 194 | 14 | 25 декабря 2009 г. | 145 |
| 5 | 3 ноября 1968 г. | 144 | 15 | 24 декабря 2010 г. | 144 |
| 6 | 17 февраля 1979 г. | 140 | 16 | 1 ноября 2012 г. | 143 |
| 7 | 22 декабря 1979 г. | 166 | 17 | 11 ноября 2012 г. | 149 |
| 8 | 1 февраля 1986 г. | 158 | 18 | 12 февраля 2013 г. | 143 |
| 9 | 8 декабря 1992 г. | 142 | 19 | 29 октября 2018 г. | 156 |
| 10 | 6 ноября 2000 г. | 144 | 20 | 12 ноября 2019 г. | 187 |

над Испанией образовалась тропосферная ложбина (область относительно низкого атмосферного давления), 3 ноября ложбина углубилась и начала двигаться на В, усиленная местной системой низкого давления и вторичной небольшой депрессией из Северной Африки. Сама по себе депрессия не была особенно выражена; однако зональный градиент был усугублен усиливающимся антициклоном над Юго-Восточной Европой с восточной стороны Адриатического моря. Это привело к очень сильному меридиональному потоку влажного воздуха, который устремился в Адриатику, ограниченную Апеннинами с З и Динарским нагорьем с В. В результате в центральной и северо-восточной части Италии прошли сильнейшие дожди; в северо-восточной за два дня выпало рекордное количество осадков – >750 мм. Реки Пьяве, Брента и Силе больше не могли справляться с дождевыми паводками, излишки речной воды стали поступать в Венецианскую лагуну.

Над всем Адриатическим морем дул интенсивный и устойчивый сирокко [9], приведший к большим волнам в его северном секторе. В результате совместного действия ветра, нагона и волн возник “идеальный шторм” в районе Венецианской лагуны; у берегового бара Лидо в некоторых местах были прорваны “murazzi”. Штормовой нагон распространился через проливы и бреши в лагуну и затопил город и близлежащие острова. Впервые с начала регулярных наблюдений за уровнем (1872 г.) 4 ноября 1966 г. в 18 ч у Пунта-делла-Салюте был достигнут его исторический максимум – 194 см (рис. 2а). Ветер дул вдоль главной оси Адриатического моря с ЮВ на СЗ более 24 ч. Скорости ветра в среднем составляли 24, максимум – 28 м/с [29]. Ущерб был огромен, большая часть города оказалась без электричества, газа, телефонной связи. Наихудших последствий удалось избежать благодаря тому, что ветер вечером сменил направление и ослабил шторм.

*Наводнение 2019 г.*

Весь 2019 г. отличался неблагоприятными погодными условиями и активной штормовой деятельностью. В 2019 г. зафиксировано 28 (из них 15 в ноябре) штормовых нагонов, при которых отметки уровня превысили 110 см; 13 нагонов, при которых уровни превысили 120 см (семь в ноябре); пять нагонов, уровни которых ≥140 см (четыре в ноябре); три нагона, уровни которых ≥150 см (в течение шести дней с 12 по 17 ноября) [17].

В ноябре средиземноморский регион подвергся воздействию глубокого циклона, что привело к резкому ухудшению погоды над итальянским полуостровом. Над Адриатикой дул сильный юго-восточный ветер (сирокко), на восточном побережье Италии наблюдались волны высотой ~4 м. Метеорологическая ситуация хорошо прогнозировалась: ожидалось нагонное повышение уровня ~70 см – высокое, но не исключительное в сравнении с другими историческими событиями [11].

Однако совпадение нескольких факторов привело к катастрофическому штормовому нагону и второму по разрушительности наводнению в истории Венеции. Так, 12 ноября было полнолуние: нагон совпал с одним из максимумов сизигийного прилива. Кроме того, на фоне необычно высокого уровня Средиземного моря в ноябре 2019 г., отражающего общую аномальную атмосферную депрессию над его бассейном, над Адриатикой образовался циклон меньшего масштаба, кото-

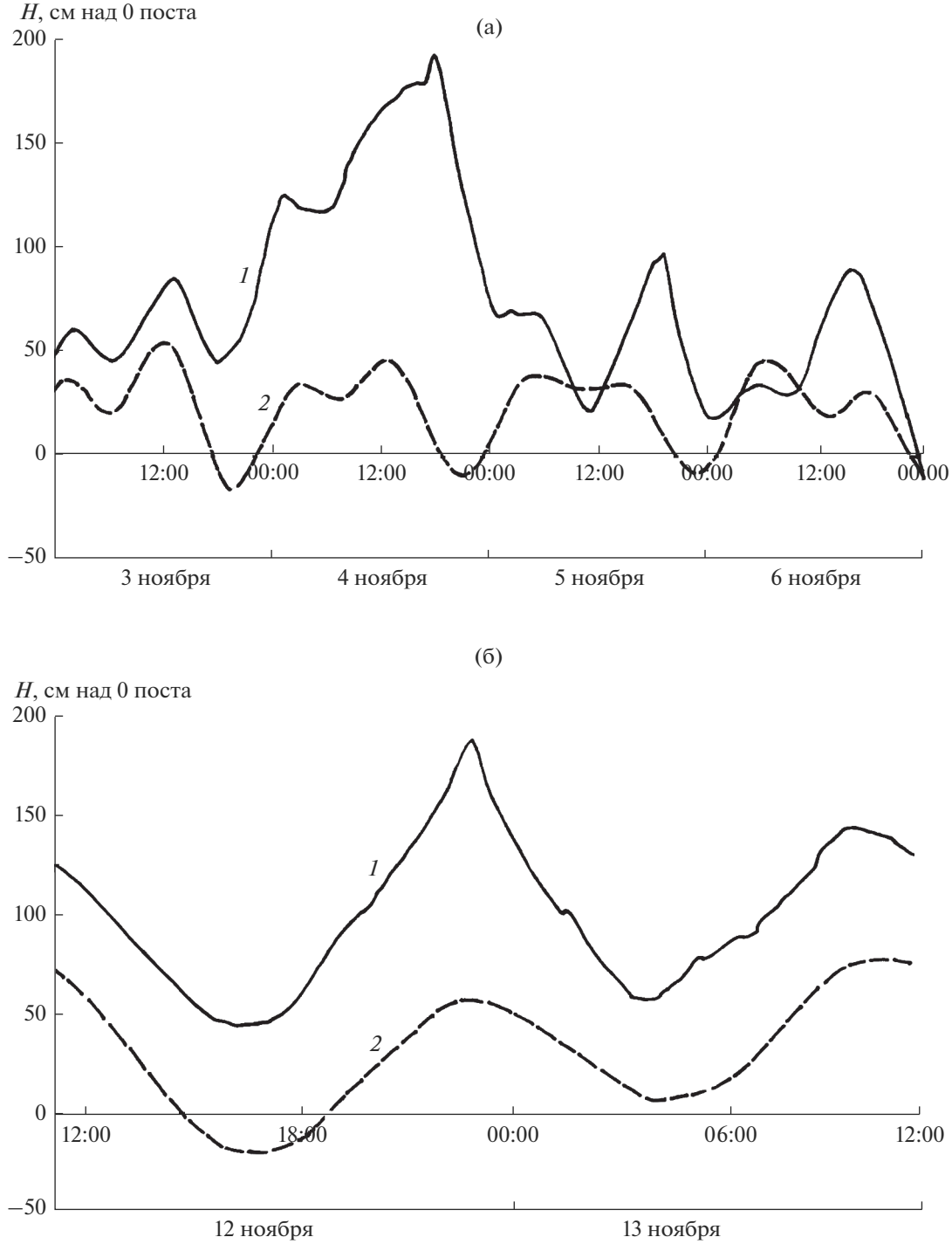


**Рис. 2.** Изменения наблюденного (*1*) и астрономического приливного уровня воды (*2*) во время штормовых нагонов 4 ноября 1966 г. (а) и 12 ноября 2019 г. (б) на посту Пунта-делла-Салюте, по данным [16].

рый быстро продвигался на С. Устойчивый и продолжительный сирокко (средняя скорость ветра 100, порывы до 110 км/ч) нагнетал воду в Венецианскую лагуну, затрудняя отток через прол. Отранто [17].

Уровень воды в Венеции во вторник 12 ноября в 22 ч 55 мин достиг максимальной отметки – 187 см (второй по величине за всю историю наблюдений) (рис. 2б). 90% территории исторического центра оказалось под водой. Площадь Сан-Марко была залита на >1 м, а базилика Сан-Марко затоплена шестой раз за 1200 лет. В районе набережной Рива-дельи-Скьявони затонули три речных трамвайчика – вапоретто. От штормового

нагона пострадало все венецианское побережье, в г. Кьоджа уровень воды был близок к 190 см.

Ситуация была бы намного хуже, если бы нагон совпал с максимумами прилива на 12 ч раньше или позже: пики были бы на ~25 см выше и уровень воды поднялся бы на ~210 см.

В среду 13 ноября уровень составил 145, в пятницу 15 ноября – 154, в воскресенье 17 ноября – 152 см [17].

*Наводнение 1979 г.*

22 декабря 1979 г. Венеция пострадала от наводнения, уступавшего по силе только событиям 4 ноября 1966 и 12 ноября 2019 гг.

20 и 21 декабря над алжирским и тунисским побережьем находился центр атмосферной депрессии, 22 декабря он переместился в центральную часть Лигурийского моря, а фронт окклюзии охватил весь итальянский полуостров. Однако главной причиной штормового нагона стал сильный ветер, точнее “scontraura” (“столкновение”) сирокко (скорость ветра достигала 74 км/ч) в средней и нижней частях Адриатики и боры (78 км/ч) в верхней части Адриатики. Несмотря на то, что нагон был спустя 3 ч после максимума прилива, уровень в 9 ч 10 мин достиг 166 см и оставался >110 см следующие 7 ч. На нагон наложились сейшевые колебания амплитудой 64 см [9, 17].

*Наводнение 1986 г.*

Причиной штормового нагона 1 февраля 1986 г. послужило расширение области низкого атмосферного давления в западной части Средиземного моря в последние дни января и на Корсике 1 февраля, вызвавшее сильный сирокко над центральной и южной частями Адриатического моря (в г. Бари была зарегистрирована скорость ветра 105 км/ч) и бору в верхней части Адриатики (в г. Тессера – 80 км/ч). Эти ветры 1 февраля в 4 ч способствовали подъему уровня на 101 см (на 1 ч позже максимума прилива – 66 см в 3 ч). Пик на посту Пунта-делла-Салюте пришелся на 3 ч 45 мин утра и составил 158 см (четвертое по силе наводнение после событий 1966, 2019 и 1979 гг.) [9, 17].

## ПРИЧИНЫ НАВОДНЕНИЙ В ВЕНЕЦИАНСКОЙ ЛАГУНЕ

*Просадка грунта*

Просадка грунта в прибрежных районах – широко распространенный процесс, имеющий как естественное, так и антропогенное происхождение.

Естественная просадка грунта в венецианском регионе в прошлом отражала в основном тектонические процессы; в период позднего плейстоцена и голоцена она составляла ~1.3 мм/год [10], что было вызвано уплотнением рыхлых отложений во время естественной эволюции лагуны. По оценкам, приведенным в [5], в 1369–1872 гг. средняя скорость естественной просадки составляла 0.2 мм/год.

Антропогенная просадка грунта происходит вследствие уплотнения отложений в результате их обезвоживания. Так, в 1930-х гг. в венецианском регионе началась интенсивная эксплуатация шести артезианских водоносных горизонтов, находящихся в верхних 350 м тысячеметрового слоя неконсолидированных венецианских четвертичных отложений; она достигла пика в 1950-е и 1960-е гг. В период с 1952 по 1969 г. средняя просадка в районе откачки вод и в г. Венеции составила 5 и 6 мм/год, максимальная – 14 и 17 мм/год соответственно [5]. В 1970-х гг. были предприняты решительные меры по сокращению чрезмерной эксплуатация этих скважин и темпы просадки замедлились, а к 1973 г. антропогенная просадка почти прекратилась [10].

*Повышение уровня моря*

По данным [20], в 1990–2010 гг. эвстатическое повышение уровня Мирового океана составило ~3 мм/год. Согласно прогнозам (их обзор дан в [1, 20]), уровень океана в XXI в. продолжит повышаться, что связано с современными изменениями климата, усилением теплового расширения верхнего слоя морских вод, и к концу XXI в. скорость его подъема может возрасти до 8–16 мм/год.

Многолетние изменения среднегодовых уровней воды в береговых зонах (особенно во внутренних морях) могут существенно отличаться от осредненных величин повышения уровня Мирового океана. Так, уровень Атлантического океана повышался со скоростью 1.7, а Средиземного моря – всего 1.2 мм/год. Это объясняется тем, что у Средиземного моря отрицательный пресноводный баланс: оно служит огромным испарителем морских вод, поступающих из Атлантики через Гибралтарский пролив.

Данные наблюдений на гидрологических постах в береговой зоне дают сведения лишь о так называемом относительном повышении уровня моря (ОПУМ), который складывается из обусловленного климатическими факторами эвстатического повышения уровня моря (ЭПУМ) и просадки грунта, достигающей иногда очень больших величин. В настоящее время величина ОПУМ, как правило, превышает величину ЭПУМ. Разделить наблюдаемые на постах изменения уровня моря на эвстатические и обусловленные вертикальными движениями, включая просадку грунта, довольно трудно.

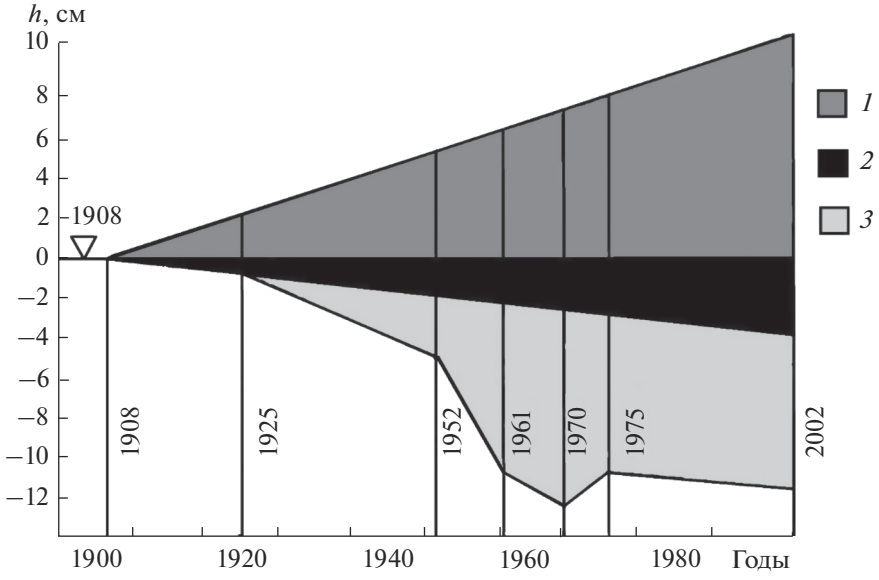


**Рис. 3.** Три составляющие ОПУМ в Венеции. ЭПУМ (*1*), естественная (*2*) и антропогенная просадка (*3*) по [9].

В работе [21] проанализированы данные по 23 постам в Средиземном море (в том числе по девяти в Адриатическом море). ЭПУМ на постах, ряды данных по которым составляют около 100 лет, имеет следующие значения, мм/год: Марсель – 1.25, Генуя – 1.22, Триест – 1.14. Наибольший рост уровня на посту в Венеции – 2.4 мм/год – объясняется именно просадкой грунта. Изменения уровня моря за более короткие периоды также происходили с наибольшей скоростью в Венеции: в 1896–1922 гг. – 3.7, в 1920–1950 гг. – 2.59, а в 1950–1970 гг. – 4.70 мм/год [21].

Рис. 3 иллюстрирует изменение вклада просадки грунта в ОПУМ в Венеции по [10]. В статье [21 приведена количественная оценка изменения среднего уровня моря в Венеции по данным за 1872–2019 гг. (без учета просадки). ОПУМ составило 1.23 мм/год.

### *Приливы*

Приливы в Средиземном и Адриатическом морях определяются в основном распространением приливной волны из Атлантического океана. Распространение приливной волны в Адриатике происходит вокруг амфидромной точки, где амплитуда прилива равна нулю. Эта точка находится между Анконой и Задаром (хорватское побережье). Когда прилив входит в прол. Отранто, он движется через Адриатическое море против часовой стрелки со скоростью ~130 км/ч. Сначала прилив распространяется вдоль побережья Далмации на С, проходит мимо Истрии и продолжает движение к Триесту и Градо, затем поворачивает на З к Линьяно, Венеции и Кьоджа, следует вдоль побережья Италии в направлении к городам Анкора, Вьесте и Бриндизи и завершает свой цикл в Отранто [19]. Прилив в Адриатическом море смешанный, полусуточный (12 ч 12 мин) и суточный (24 ч 25 мин), его средняя величина – 1.0 м [18].

### *Ветер, сейши и штормовые нагоны*

Самые сильные ветры в Адриатике – бора и сирокко – бывают зимой. Бора – это холодный ветер с СВ; его средняя скорость в некоторых местах достигает 15 м/с. Сирокко приносит теплый средиземноморский воздух с ЮВ, его средняя скорость ~10 м/с. Оба ветра обычно связаны с перемещением циклонов, дуют по несколько дней и следуют друг за другом: когда циклон приближается к Адриатике, дует сирокко, когда циклон покидает Адриатику, возникает бора. Поскольку сирокко дует вдоль главной оси Адриатического моря и мало взаимодействует с горными хребтами, он вызывает поступление больших объемов воды в северную часть Адриатического моря и приводит к повышению уровня, особенно сильному в Венецианской лагуне. Когда дует сирокко, уровень моря повышается: от 20 см при скорости ветра 10 км/ч до 100 см при 60 км/ч [5].

Быстрое изменение атмосферного давления и интенсивности ветра над Адриатическим морем вызывает свободные колебания (сейши). Основные сейши в Адриатике имеют первый резонансный период ~21 ч и второй резонансный период 11 ч, что близко к периодам приливов. Сейши могут длиться несколько дней. В Венеции среднее повышение уровня моря, вызванное сейшами, составляет 45 см.

## ИСТОРИЯ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА УРОВНЕМ ВОДЫ

Когда нет никаких количественных данных об уровне моря и приливах, информацию о них и “аква альта” можно получить только качественную, из документальных свидетельств: хроник начиная с VI в., линий водорослей, высоты ступеней морских лестниц, картин старых мастеров и ранних фотографических снимков.

В Венеции есть понятие “Comune Marino” (CM), что можно приближенно перевести на русский язык как “отметка среднего уровня моря”. Это линия, совпадающая с горизонтальной темно-зеленой полосой водорослей на стенах зданий и набережных. Этим фототрофным водорослям нужно солнце для биосинтеза хлорофилла и вода для жизни – т.е. среда, которая может быть попеременно влажной во время прилива и сухой во время отлива. По верхней линии этого пояса водорослей венецианцы в прошлом отмечали среднее положение уровня моря при приливе. Этот маркер давал строителям и инженерам некоторое представление о тенденции повышения уровня моря, необходимое для определения высоты причалов и арочных мостов, для строительства домов, дворцов и других работ. Однако эти отметки были неточными, находились на разных уровнях не только в разных частях города, но даже на противоположных сторонах одного и того же канала.

Уже к концу XVII в. Водный магистрат (“Magistrato alle Acque”) постановил, что CM будет всегда обозначаться выгравированной на камне набережной горизонтальной линией с заглавной буквой “C” над ней.

В историческом центре Венеции удалось идентифицировать и переписать 111 знаков CM. Их отметки подтверждают, что принятый в настоящее время средний уровень моря (ноль поста Пунта-делла-Салюте) находится на 40–45 см ниже, чем в XVIII в. Поскольку нынешний верхний край зеленого пояса водорослей на берегах каналов на 75–80 см выше ноля поста, то с должным приближением можно считать, что всего за два столетия уровень воды поднялся на 30–40 см. Оценки эти не точны также из-за повреждения стен каналов и фундаментов зданий волнами и брызгами, создаваемыми моторными катерами и лодками; венецианцы называют это явление “motondoso”. Измерения итальянскими специалистами [7] в течение четырех дней положения CM на 80 зданиях, выходящих на Гранд-канал, показали, что CM = 47 ± 2 см над нулем поста, т.е. в колебания уровня моря волны вносят вклад ~17 ± 2 см.

В 1727–1758 гг. художники Антонио Каналетто и его племянник Бернардо Белотто, используя портативную камеру-обскура, рисовали виды Венеции с поразительно точными деталями, в том числе отображая положение CM. Сравнивая уровень пояса водорослей на их картинах с сегодняшним и учитывая воздействие волнения на стенки зданий и каналов, создаваемого гребными и моторными лодками, можно оценить ОПУМ и его интенсивность за период с 1700-х по 2000-е гг. – 61 ± 12 см и 2.3 ± 0.4 мм/год соответственно. Интенсивность повышения уровня близка к рассчитанной за инструментальный период наблюдений – 2.4 мм/год) [8].

Позже исследователями было установлено, что в 1571 г. Паоло Веронезе (1528–1588 гг.) также с помощью камеры-обскуры воспроизвел на картине “Мадонна семейства Куччина” дворец, на стене которого можно увидеть положение CM. Сравнение уровня пояса водорослей на этой картине и современного дало величину ОПУМ 92 ± ± 9 см [6]. Таким образом, ОПУМ в период между картинами Веронезе (1571 г.) и Каналетто (1727–1758 гг.) составило 1.2 ± 0.4 мм/год (рис. 4).

Интересно, что сравнение положения нижних ступеней морских лестниц на каналах, которые строители дворцов в стилях разных эпох (готика, ренессанс, барокко) привязывали к определенному уровню моря, позволило ученым использовать лестницы в качестве новых свидетельств повышения уровня моря.

Самые первые измерения уровня моря с помощью рейки были сделаны в 1638 г. Франческо Ринуччини по заданию Галилео Галилея. Регулярные наблюдения за уровнем моря проводились в г. Венеции (в середине лагуны) с 1751 по 1769 г. и в г. Кьоджа (в юго-западной части лагуны) с 1779 по 1792 г. Наблюдения в Венеции проводил архитектор и гидротехник Томмазо Теманза (1705–1789 гг.), который ежедневно записывал метеорологические данные и данные об уровне моря. Наблюдения в г. Кьоджа проводил с 1779 по 1792 г. врач Джузеппе Вианелли (1720–1803 гг.). Высота уровня моря измерялась с помощью вертикальной рейки, разделенной на венецианские футы и дюймы и показывающей расстояние от морского дна. Эти данные, конечно, были более низкого качества, чем современные [27].

В Венеции регулярные инструментальные наблюдения за уровнем моря, а также за полными и малыми водами прилива начались в 1871 г. с помощью механического уровнемера Томсона типа поплавка, помещенного в стоячий колодец.

Первый гидрологический пост с уровнемером (мареографом) установлен инженером Томмазо Мати у Палаццо Лоредан на площади Санто-Стефано в ~100 м от Гранд-канала (рис. 5а); систематические измерения на нем начались 27 ноября 1871 г. В 1888 г. был открыт пост у Венецианского Арсенала. Посты на Санто-Стефано и у Арсенала были выведены из эксплуатации в 1911 и 1917 гг.

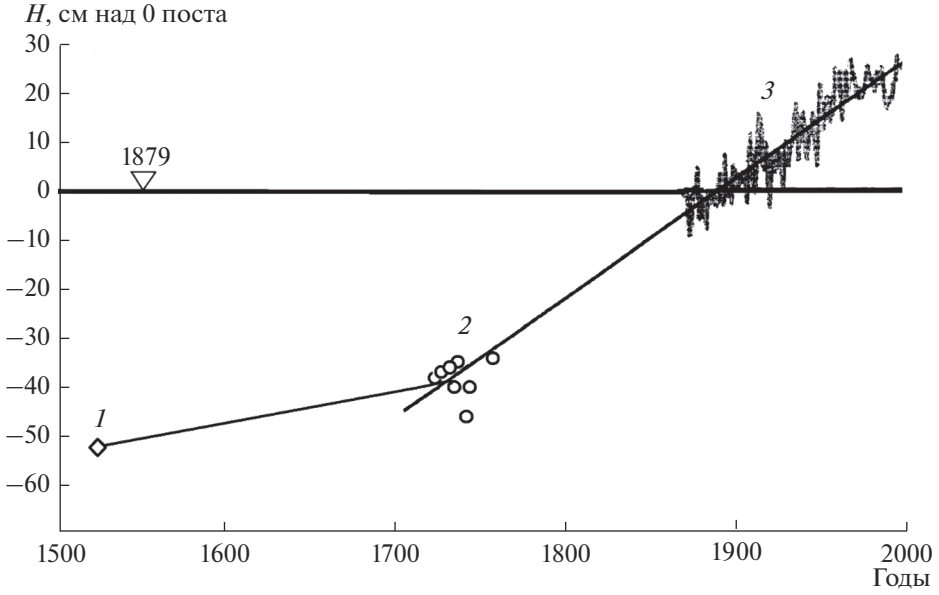


**Рис. 4.** Схема изменения уровня моря в Венеции: в 1571 г. по Веронезе (*1*), в 1727–1758 гг. по Каналетто и Беллотто (*2*) и данным поста Пунта-делла-Салюте в 1872–2002 гг. (*3*) [6, 8].

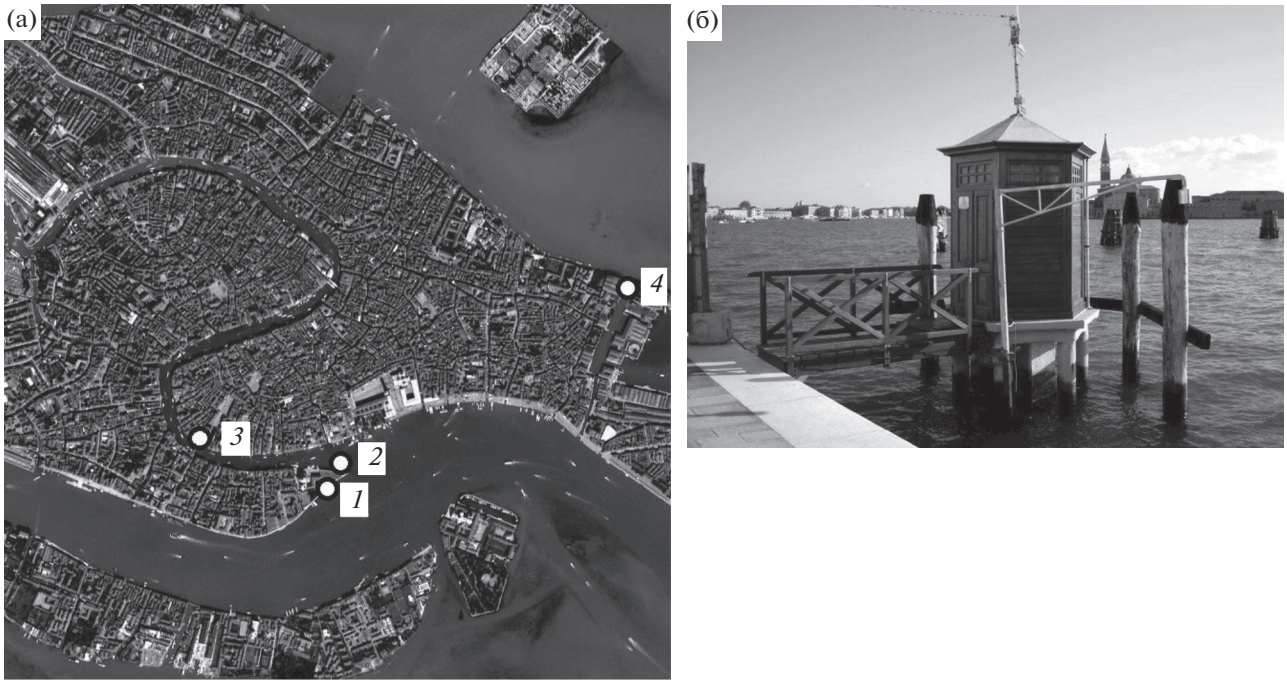


**Рис. 5.** Схема расположения гидрологических постов в Венеции: *1* – Пунта-делла-Салюте (ISPRA) на канале Джудекка; *2* – Пунта-делла-Салюте (CPSM) на Гранд-Канале; *3* – Санто-Стефано, *4* – Арсенале (космоснимок IKONOS 19.06.2004) (а); пост Пунта-делла-Салюте на канале Джудекка из [19] (б).

соответственно. В 1906 г. начал работу пост Пунта-делла-Салюте [24]. Сначала он находился на Гранд-канале около собора Санта-Мария-делла-Салюте, а в 1923 г. был перенесен на канал Джудекка. Этот пост действует под управлением Итальянского национального института охраны окружающей среды и исследований ISPRA (“Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale”) (рис. 5б). С 2002 г. со стороны Гранд-канала возобновлена работа старого поста как дополнительного. Им управляет муниципальный центр

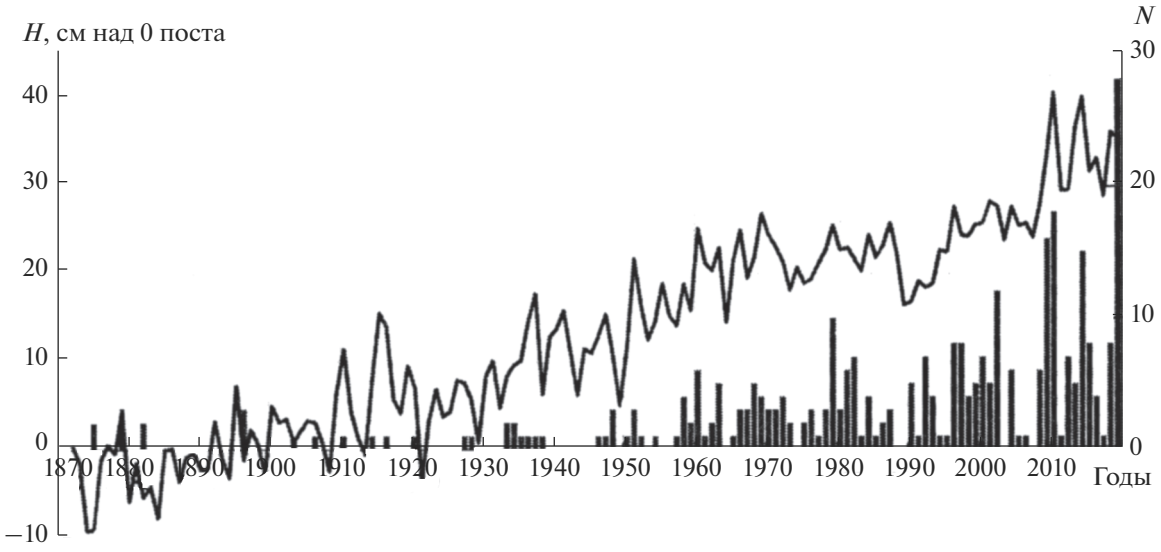


**Рис. 6.** График изменения уровня моря *H* и числа событий “аква альта” *N* на посту Пунта-делла-Салюте с 1839 по 2019 г.

по прогнозированию приливов CPSM (“Centro Previsione e Segnalazione Maree)”.

Увязка данных мареографов на различных постах для получения единого непрерывного ряда данных об уровне воды потребовала точного знания нулей этих постов. До 1910-х гг. вертикальным опорным уровнем в Венеции был СМ. Томаззо Мати установил нуль поста на Санто-Стефано на 150 см ниже СМ 1825 г. В 1910 г. за ноль нового поста Пунта-делла-Салюте (“Zero Mareografico Punta Salute”) принят уровень, рассчитанный путем осреднения данных с 1885 по 1909 г. Он находится на 127.54 см выше нуля поста Санто-Стефано и на 22.46 см ниже СМ 1825 г. Этот пост стал главным ориентиром для г. Венеции и всей лагуны. Длина совмещенного ряда уровней воды с 1872 по 2019 г. составляет 148 лет. Кроме того, CPSM и ISPRA управляют 42 станциями в самой лагуне и в Северной Адриатике. Метеорологические и гидрологические данные по всем постам публикуются в реальном времени на сайтах [16, 19].

На рис. 6 приведен график изменения уровня моря на посту Пунта-делла-Салюте с 1839 по 2019 г. по [19].

## МЕРЫ ПО ЗАЩИТЕ ВЕНЕЦИИ И ВЕНЕЦИАНСКОЙ ЛАГУНЫ ОТ ЗАТОПЛЕНИЯ

Департамент водного хозяйства Венеции регулярно проводит работы по укреплению берега лагуны, поднимает тротуары и пристани, чтобы при слабых наводнениях до них не добралась вода. Городские власти стараются улучшить экологическую обстановку в лагуне: предпринимают усилия, направленные на восстановление исчезнувших солончаковых болот, защиту еще не исчезнувших островков и отмелей, очистку дна каналов лагуны.

Венецианцы принимают “аква альта” как неотъемлемую часть повседневной жизни, но осознают, что ситуация с наводнениями будет усугубляться. Ожидается, что к 2050 г. средний уровень может повыситься на величину от 24 до 32 см [20]. Как Венеция справится с этой ситуацией?

Над способами защиты Венеции от воды думали не одно десятилетие. Наконец, в 1989 г. был предложен проект MOSE (“Modulo Sperimentale Elettromeccanico”, экспериментальный электромеханический модуль) [18]. Во всем мире этот проект известен под библейским именем Моисей (MOSE). Венецианцам, давно привыкшим к наводнениям, разрушающим их бизнес и жизнь, такое сравнение представляется вполне уместным. Несколько раз проект подвергался существенным переделкам и, наконец, был одобрен советом министров Италии в 2001 г. Работы по проекту начались в 2003 г. Предусматривалось размещение в проливах четырех мобильных барьеров: двух в Лидо и по одному – в Маламокко и Кьоджа. Барьеры представляют собой 78 подвижных затворов, которые поднимаются во время прилива, чтобы создать временную плотину. Процесс строительства сопровождался перерасходом средств, коррупцией и противодействием со стороны экологических и природоохранных организаций. MOSE уже стоит 6.4 млрд долл. (5.5 млрд евро) и, вероятно, достигнет 8 млрд долл. (7 млрд евро) к моменту полного завершения проекта в декабре 2021 г.

В 2011 г. в Арсенале, символе торговой и военной мощи Венеции, начал работать Центр управления MOSE, использующий передовые технологии для прогнозирования наводнений, моделирования последствий маневров ворот. Первые испытания MOSE успешно проведены 10 июля 2020 г. А 3 октября 2020 г. MOSE впервые показал себя в "деле". У Пунте-делла-Салюте прогнозировался уровень 130 см, что значительно ниже разрушительных 187 см в ноябре 2019 г., но достаточно, чтобы затопить низменные районы. К 10 ч 10 мин утра 3 октября были подняты все 78 подвижных затворов в трех проливах между Венецианской лагуной и морем. Лагуна была полностью отрезана от моря. В 10 ч 35 мин (максимум прилива) за пределами лагуны был зафиксирован уровень 120 см, а у Пунта-делла-Салюте – 71 см. Несмотря на проливной дождь, наводнение удалось предотвратить и площадь Сан-Марко оказалась незатопленной!

Завершение строительства MOSE намечено на 2021 г., но все понимают, что MOSE в будущем окончательно не решит проблему.

Критики проекта заявляют, что конструкция ворот основана на устаревших прогнозах изменения уровня моря, что разработчики MOSE не учитывали просадку грунта и повышение уровня воды, связанное с продолжительными дождями и ветрами, и что если в течение XXI в. уровень поднимется больше, чем на 32 см, MOSE нужно будет заменить на водонепроницаемые ворота. Сторонники MOSE, наоборот, считают, что ворота и в будущем будут эффективной преградой наводнениям, что больше нет необходимости рассматривать фактор просадки грунта, так как она практически закончилось в 1970-х гг., что использованный при разработке проекта сценарий повышения уровня моря был основан на недавних исследованиях и что барьеры рассчитаны на подъем уровня от 30 до 50 см.

Подробный анализ, изложенный в [29], показывает, что интенсивность повышения уровня моря так или иначе приведет к увеличению числа некогда исключительных наводнений, потребуется еще и более частое использование (закрытие) барьеров MOSE. В итоге уменьшится водообмен лагуны с морем, что приведет к негативным последствиям для экосистемы всей лагуны. Сейчас во время сизигийных приливов через проходы в лагуну поступает ~20000 м$^3$/с (для сравнения: среднемноголетний расход воды р. По составляет 1510 м$^3$/с [2]).

## ВЫВОДЫ

Штормовые нагоны в Венецианской лагуне возникают, как правило, при сочетании нескольких факторов: 1) образования области низкого давления над средиземноморским регионом; 2) возникновения устойчивого и сильного юго-восточного ветра – сирокко (иногда в столкновении с северо-восточным ветром – борой); сирокко дует вдоль главной оси Адриатического моря и стремительно нагнетает воду в Венецианскую лагуну; 3) максимума астрономического прилива. Пик штормовых нагонов в Венецианской лагуне обычно приходится на ноябрь и декабрь [5, 23]. В XX и XXI вв. два случая катастрофической "аква альта" пришлись именно на ноябрь 1966 и 2019 гг. Часто штормовой нагон совпадает с сейшевыми колебаниями в Адриатическом море, образованию которых способствует длинная и узкая конфигурация Адриатического моря и период которых близок к периодам прилива.

За последние полвека частота штормовых нагонов в лагуне увеличилась [10]: если в 1872–1955 гг. они случались в среднем один раз в два года, то в 1955–2010 гг. – по четыре раза в год. Это вызвано влиянием антропогенной просадки грунта в результате откачки природного газа и грунтовых вод в венецианском регионе (особенно интенсивной с 1930 по 1970 г.), углублением судоходного канала Маламокко–Маргера и проходов между барьерными барами и изменением вследствие этого водообмена с Адриатическим морем.

"Аква альта" наступает, когда уровень моря превышает 80 см относительно нуля поста Пунта-делла-Салюте. Наводнения, вызванные штормовыми нагонами, классифицируются как исключительные, когда уровень у Пунта-делла-Салюте превышает 120 см (этого достаточно, чтобы затопить половину города). Исключительные штормовые нагоны случались с 1872 по 1950 г. один раз (16 апреля 1936 г.); с 1951 по 2000 г. – девять раз; с 2001 по 2019 г. – 12 раз. Пока писалась настоящая статья, вечером 8 декабря 2020 г. в Венеции вновь был зафиксирован исключительный уровень – 138 см. На следующие дни прогнозировался уровень до 145 см, но дальнейшее повышение удалось предотвратить, подняв затворы MOSE.

Увеличение случаев "аква альта" в Венецианской лагуне в начале XXI в. – следствие и показатель изменения климата, в частности повышения уровня Мирового океана. Начиная с середины XX в. во многих регионах мира активизировалась циклоническая деятельность, вызванная увеличением температурных контрастов как над океанами, так и над сушей. Возросла частота и сила штормовых нагонов в прибрежных областях, в том числе и в устьях рек. Именно в этот период отмечены экстремальные штормовые нагоны с катастрофическими последствиями в устьях Рейна, Темзы, Эльбы, Миссисипи, Иравади, Ганга и Брахмапутры, Годавари, Красной и др.

Уникальный опыт гидрологических исследований в Венецианской лагуне может быть ис-

пользован в России при оценке воздействия прогнозируемых в XXI в. изменений морских факторов на прибрежные регионы и устьевые области страны.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Михайлов В.Н., Михайлова М.В.* Влияние многолетних изменений морских факторов на устья рек // Водн. ресурсы. 2015. Т. 42. № 4. С. 367–379.
2. *Михайлова М.В.* Гидрологический режим и особенности формирования дельты р. По // Водн. ресурсы. 2002. Т. 29. № 4. С. 405–415.
3. *Battistin D., Canestrelli P.* 1872–2004. La serie storica delle maree a Venezia. Venezia: Istituzione centro previsioni e segnalazioni maree, 2006. 207 p.
4. *Brambati A., Carbognin L., Quaia T., Teatini P., Tosi L.* The Lagoon of Venice: geological setting, evolution and land subsidence // Episodes. 2003. V. 26. № 3. P. 264–268.
5. *Camuffo D.* Analysis of the Sea Surges at Venice from A.D. 782 to 1990 // Theor. Appl. Climatol. 1993. № 47. P. 1–14.
6. *Camuffo D., Bertolin Ch., Schenal P.* A novel proxy and the sea level rise in Venice, Italy, from 1350 to 2014 // Climatic Change. 2017. № 143. P. 73–86.
7. *Camuffo D., Bertolin C., Schenal P., Craievich A., Granziero R.* The Little Ice Age in Italy from documentary proxies and early instrumental records // Méditerranée. 2014. № 122. P. 17–30.
8. *Camuffo D., Sturaro G.* Sixty-cm submersion of Venice discovered thanks to Canaletto's paintings // Climate Change. 2003. V. 58. Iss. 3. P. 333–343.
9. *Canestrelli P., Mandich M., Pirazzoli P.A., Tomasin A.* Venti, depressioni e sesse: perturbazioni delle maree a Venezia (1951–2000). Venezia: Centro Previsioni e Segnalazioni Maree, 2001. 110 p.
10. *Carbognin L., Teatini P., Tosi L.* Land subsidence in the Venetian area: known and recent aspects // Giornale di Geologia Applicata. 2005. № 1. P. 5–11.
11. *Cavaleri L., Bajo M., Barbariol F., Bastianini M., Benetazzo A., Bertotti L., Chiggiato J., Ferrarin C., Trincardi F., Umgiesser G.* The 2019 Flooding of Venice and its implications for future predictions // Oceanography. V. 33. №. 1. P. 42–49.
12. *Comerlati A., Ferronato M., Gambolati G., Putti M., Teatini P.* Saving Venice by seawater // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. P. 1–14.
13. *Enzi S., Camuffo D.* Documentary Sources of the Sea Surges in Venice from AD 787 to 1867 // Natural Hazards. 1995. № 12. P. 225–287.
14. *Ghetti A., Batisse M.* The overall protection of Venice and its lagoon // Nature and Resour. 1983. V. XIX. № 4. P. 7–19.
15. https://oubliettemagazine.com/2019/11/24/la-storia-dellacqua-alta-a-venezia-e-la-gestione-idraulica-della-laguna-ai-tempi-della-serenissima-repubblica
16. https://www.comune.venezia.it/content/centro-previsioni-e-segnalazioni-maree
17. https://www.comune.venezia.it/it/content/le-acque-alte-eccezionali
18. https://www.mosevenezia.eu
19. https://www.venezia.isprambiente.it
20. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
21. *Klein M., Lichter M., Zviely D.* Recent sea-level changes along Israeli and Mediterranean coasts // Horizons Contemporary Israeli Geography. 2004. Special Iss. 60–61. P. 247–254.
22. *Molinaroli E., Guerzoni S., Sarretta A., Cucco A., Umgiesser G.* Links between hydrology and sedimentology in the Lagoon of Venice, Italy // J. Mar. Systems. 2007. V. 68. Iss. 3–4. P. 303–317.
23. *Orlic M., Kuzmic M., Pasaric Z.* Response of the Adriatic Sea to the bora and sirocco forcing // Continental Shelf Res. 1994. V. 14. № 1. P. 91–116.
24. *Parker A, Ollier C.D.* Venice: Rising Water or Sinking Land? // Nonlinear Engineering. 2015. № 4 (3) P. 161–174.
25. *Pirazzoli P.A.* Possible defenses against a sea-level rise in the Venice area, Italy // J. Coast Res. 1991. V. 7. № 1. P. 231–248.
26. *Pirazzoli P.A.* Recent sea-level changes and related engineering problems in the Lagoon of Venice (Italy) // Progress in Oceanography. 1987. V. 18. Iss. 1–4. P. 323–346.
27. *Raicich F.* Long-term variability of storm surge frequency in the Venice Lagoon: an update thanks to 18th century sea level observations // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2015. № 15. P. 527–535.
28. *Ravera O.* The Lagoon of Venice: the result of both natural factors and human influence // J. Limnol. 2000. V. 59. № 1. P. 19–30.
29. *Umgiesser G.* The impact of operating the mobile barriers in Venice (MOSE) under climate change // J. Nature Conservation. 2020. V. 54. P. 1–10.
30. *Zanchettin D., Bruni S., Raicich F., Lionello P., Adloff F., Androsov A., Antonioli F., Artale V., Carminati E., Ferrarin C., Fofonova V., Nicholls R.J., Rubinetti S., Rubino A., Sannino G., Spada G., Thiéblemont R., Tsimplis M., Umgiesser G., Vignudelli S., Wöppelmann G., Zerbini S.* Review article: Sea-level rise in Venice: historic and future trends // Nat. Hazards Earth System Sci. 2020. https://doi.org/10.5194/nhess-2020-351

*ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, 2021, том 48, № 5, с. 513–525*

## ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

*УДК 556.5*

# ЧИСЛЕННОЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ 2D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТОПЛЕНИЯ г. ТУЛУНА НА р. ИЯ В ПАВОДОК 2019 г.[1]

**© 2021 г. В. В. Беликов[a], *, Н. М. Борисова[a], **, А. В. Глотко[a, b]**

[a] *Институт Водных Проблем РАН, Москва, 119333 Россия*

[b] *Национальный исследовательский московский государственный строительный университет, Москва, 129337 Россия*

**e-mail: belvv@bk.ru*

***e-mail: borisovanm@mail.ru*

Поступила в редакцию 13.10.2020 г.
После доработки 15.12.2020 г.
Принята к публикации 21.01.2021 г.

На основе детальной 3D-цифровой модели рельефа местности и высокоточной эффективной программы 2D-моделирования STREAM 2D CUDA с использованием фактической информации о метках высоких вод и динамики изменения уровней воды в паводок 2019 г. на р. Ия в районе г. Тулуна проведена оценка величины максимального расхода воды и построен гидрограф экстремального паводка в районе г. Тулуна. Рассчитанная сложная динамика затопления города, расположенного в обвалованной излучине реки, хорошо совпала с данными наблюдений.

*Ключевые слова:* уравнения мелкой воды, численное моделирование, гидрограф паводка, динамика затопления.

**DOI:** 10.31857/S0321059621040027

## ВВЕДЕНИЕ

Река Ия протекает по территории Иркутской области. Длина реки 484 км, площадь бассейна 18.1 тыс. км$^2$ (до г. Тулун 14.5 тыс. км$^2$). Берет начало на северных склонах Восточного Саяна, впадает в Окинский залив Братского водохранилища. Питание главным образом дождевое и грунтовое. Средний годовой расход воды у г. Тулуна (119 км от устья) 149 м$^3$/с (4.7 км$^3$/год), максимальный расход (без учета 2019 г.) – 4040 (1984 г.), минимальный – 4.5 м$^3$/с. Паводок, накрывший в июне–июле 2019 г. несколько районов Иркутской области, стал крупнейшим в регионе за все время наблюдений. Город Тулун, стоящий на р. Ия, подвергся значительному затоплению и вызванным им масштабным разрушениям. В июне 2019 г. начал расти уровень воды в р. Ия и 29 июня достиг отметки 1382 см над нулем графика водомерного поста, при критической отметке 700 см. Дамбы, отсыпанные за несколько лет до этого, подверглись переливу и оказались неспособны уберечь жилые дома от затопления и разрушения.

После наводнения силами нескольких научно-исследовательских институтов и проектных организаций были выполнены обширные комплексные исследования причин, динамики и последствий этого экстраординарного паводка, а также предложены мероприятия по защите г. Тулуна и других населенных пунктов долины р. Ия от подобных стихийных бедствий в будущем. Поскольку величина максимального расхода воды на пике паводка 2019 г. не была измерена на водопосту р. Ия – г. Тулун либо в каком-то другом поблизости расположенном створе, его достоверная оценка стала одним из ключевых моментов для всех проведенных исследований.

Для определения величины максимального расхода, объема стока и формы гидрографа паводка в створе г. Тулун различными авторами применялись гидрологические, морфометрические и гидродинамические методы, а также физическое моделирование. Одними из первых численное гидрологическое моделирование формирования динамики паводковой волны в долине р. Ия выполнено А.В. Шаликовским и соавторами и опубликовано в работе [5]. Полученный максимальный расход составил ~2900 м$^3$/с.

В Институте водных проблем (ИВП) РАН выполнено численное гидрологическое моделирование паводкового стока на основе программного

[1] Работа выполнена в рамках государственного задания ИВП РАН (Раздел 3.2) (тема 0147-2019-0003, государственная регистрация АААА-А18-118022090105-5).

комплекса ЭКОМАГ [3, 8]. Полученный максимальный расход составил 5640 м$^3$/с. Специалистами ООО "Байкалпроект" на основе гидродинамического 1D-моделирования получен максимальный расход 5630 м$^3$/с.

Государственный гидрологический институт (ГГИ) провел гидрологическое моделирование на основе двух вариантов формирования осадков на водосборе р. Ия (по данным метеостанций и по глобальной модели погоды ICON) с применением программного комплекса "Гидрограф" [4]. Максимальные среднесуточные расходы получились равными 6570 и 4780 м$^3$/с соответственно, максимальный трехчасовой по модели ICON равен 5260 м$^3$/с. Параллельно в ГГИ морфометрическим методом был рассчитан максимальный стационарный расход, который составил 6800 м$^3$/с.

Наконец, Иркутским УГМС путем экстраполяции натурных данных была принята величина максимального расхода паводка 2019 г., равная 7500 м$^3$/с, и на этот расход дано задание на проектирование новых паводкозащитных дамб.

Таким образом, перед началом разработки двумерной численной гидродинамической модели участка р. Ия – г. Тулун в январе 2020 г. имелось не менее 7 различных вариантов величины максимальных расходов катастрофического паводка 2019 г. с разбросом значений в 2.5 раза.

## ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основная цель работы – анализ опасности наводнений и гидродинамическое моделирование для исследования и комплексного анализа факторов опасного развития гидрологической обстановки, а также разработка научно обоснованных рекомендаций для предотвращения катастрофических паводков и обеспечения безопасности территорий Тулунского района Иркутской области.

Задачи исследования были следующие:

численное гидродинамическое моделирование руслового потока р. Ия в пределах городской застройки с учетом влияния всех видов застройки, а также блокировки мостовых переходов;

расчет продвижения волны паводка с расходом воды 1%-й и 0.1%-й обеспеченности по руслу и долине р. Ия в пределах селитебной территории и установление отметок максимального уровня и границ зоны затопления при прохождении других редких и катастрофических паводков;

оценка эффективности существующей и предлагаемой схем инженерной защиты селитебных территорий, в том числе оценка достаточности пропускной способности мостовых переходов;

разработка научных рекомендаций по снижению риска затопления.

В настоящей статье акцент делается на решении одной из ключевых исследовательских задач – определении максимального расхода и формы гидрографа экстраординарного паводка 2019 г. в районе г. Тулуна методами численного гидродинамического моделирования.

## ПОСТРОЕНИЕ ЧИСЛЕННОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ЕЕ КАЛИБРОВКА

Для выполнения исследований разработана двумерная в плане компьютерная модель долины р. Ия в районе г. Тулуна протяженностью по продольнику русла ~21 км. Расчетная сетка, адаптированная к рельефу земной поверхности, дорожным и защитным сооружениям, содержала 104 тыс. ячеек с размером сторон ячеек от 2 до 50 м. Опоры автодорожного и железнодорожного мостов выделялись на сетке, а именно вырезались из расчетной области с учетом их формы (рис. 1). В данной численной модели учитывались две входные границы по рекам Ия и Азей, на которых задавались расходы воды (гидрографы для нестационарных расчетов), и одна граница на выходе из модели, на которой задавался уровень воды либо (для нестационарных случаев) кривая связи расходов и уровней воды (рис. 1).

Построение трехмерной цифровой модели рельефа выполнялось с использованием наложения поверхности TIN (Triangulated Irregular Network) на исследуемый участок, при этом рельеф дна русловой части формировался на основе актуализированных батиметрических промеров русла от 20 сентября 2019 г. Рельеф дна, проинтерполированный на расчетную сетку, приведен на рис. 2, на котором хорошо видна детализация рельефа поймы, выделение русла, дорог и дамб.

Для расчета гидродинамических параметров течения воды применялся программный комплекс STREAM 2D CUDA [1], в котором реализован оригинальный алгоритм, описанный в [6, 7] и распараллеленный на графическом процессоре с использованием технологии CUDA. В основу программы заложена двумерная нестационарная система уравнений мелкой воды (уравнения Сен-Венана), описывающая меженные, паводковые и сгонно-нагонные течения в реках и речных долинах, волны прорыва, вызванные разрушением напорного фронта плотин, и т.п.

Для определения коэффициентов шероховатости русла в меженных условиях был использован продольный профиль водной поверхности р. Ия, полученный в результате водно-технических изысканий, выполненных в сентябре 2019 г. ООО "Байкалпроект" при фактически измеренном в створе гидропоста р. Ия – г. Тулун расходе

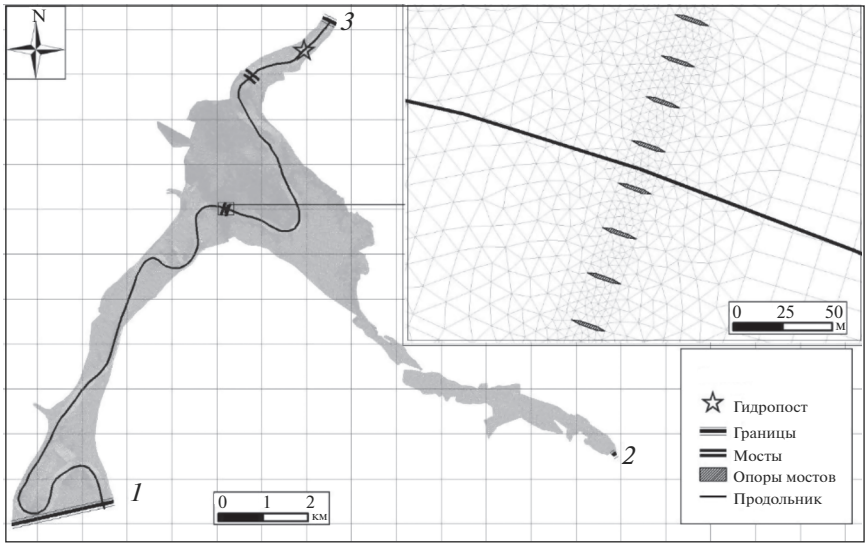


**Рис. 1.** Расчетная сетка области моделирования и ее фрагмент у автодорожного моста. *1*, *2* – входные границы по рекам Ия и Азей, *3* – выходная граница.

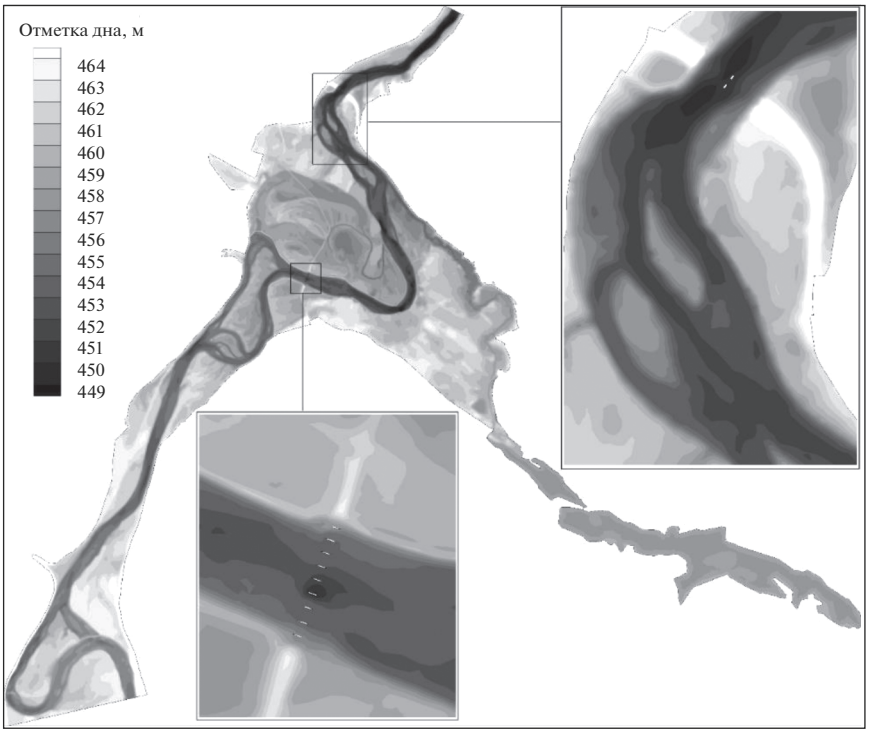


**Рис. 2.** Рельеф земной поверхности области моделирования.

201 м$^3$/с. При этом в расчетах принимался расход по р. Ия 200, по р. Азей – 1 м$^3$/с.

Наилучшее совпадение рассчитанных и измеренных уровней воды по продольному профилю получилось при значении коэффициента шероховатости русла р. Ия по Маннингу на верхнем участке модели $n = 0.035$ с/м$^{1/3}$, на среднем и нижнем $n = 0.03$ с/м$^{1/3}$. Зонирование по шероховатости представлено на рис. 3. На рис. 4 представлено сопоставление продольных профилей водной поверхности при этих значениях $n$. В целом совпадение весьма удовлетворительное. При общем перепаде уровней воды 6 м на участке длиной 20 км (средний уклон 0.3 м/км) среднее отклонение рассчитанных отметок уровней воды от измерен-

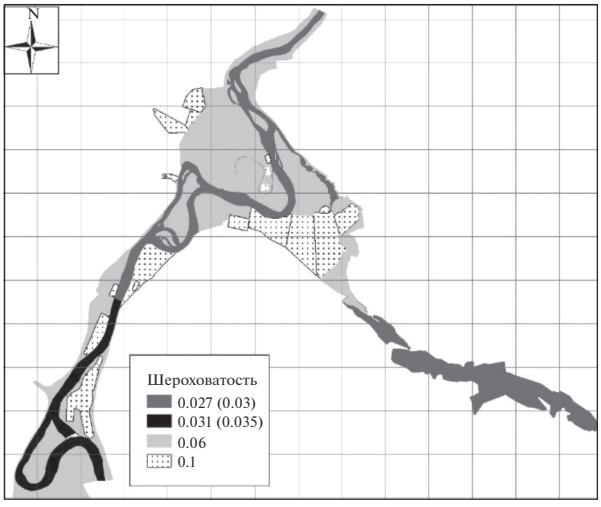


**Рис. 3.** Зонирование коэффициентов шероховатости для паводковых (меженных) условий.

ных на всей длине продольного профиля составило 0.06 м (1%), среднее квадратическое отклонение – 0.08 м (1.2%).

Поскольку максимальный расход на пике паводка 2019 г. не был измерен и был априори неизвестной величиной, в данном случае нельзя выполнить классическую калибровку модели на большие расходы, только подбирая коэффициенты шероховатости поймы (напомним, что для русла они уже определены). Поэтому в настоящей работе верификация разработанной 2D-гидродинамической модели в паводок 2019 г. проводится путем подбора максимальных мгновенных расходов воды и формы гидрографа из условий наилучшего совпадения рассчитанных уровней воды с измеренными отметками высоких вод по продольному профилю и на гидропосту р. Ия – г. Тулун при принятых коэффициентах шероховатости русла и поймы.

В соответствии с таким подходом для больших расходов воды и глубин течения, которые в паводок 2019 г. достигали 10–13 м, коэффициенты шероховатости в руслах по опыту аналогичных исследований (например, [2]) были уменьшены на 10% по сравнению с меженными (определенными в результате калибровки) и приняты по руслам рек Ия и Азей $n = 0.027$ с/м$^{1/3}$, при этом в верхней части модели (участок длиной 7 км у входной границы по р. Ия $n = 0.031$ с/м$^{1/3}$) (рис. 3). В данной ситуации некоторое уменьшение коэффициентов шероховатости относительно меженных значений идет в запас гидравлических расчетов при проектировании защитных мероприятий в том смысле, что при одних и тех же глубинах воды, уклонах водной поверхности и меньших шероховатостях будет проходить больший расход и будут выше скорости течения, которые необходимо учитывать при выборе типов крепления защитных дамб. На пойме на основе опыта аналогичных расчетов по другим объектам и табличных данных принят $n = 0.06$ с/м$^{1/3}$, на заселенных застроенных участках поймы $n = 0.1$ с/м$^{1/3}$. Для верификации модели во всех последующих расчетах использованы метки высоких вод на местности, полученные в результате изысканий ООО “Байкалпроект”.

## РАСЧЕТЫ НА ПОСТОЯННЫЕ РАСХОДЫ ДЛЯ ПАВОДКА 2019 г.

Сначала был выполнен расчет на постоянный расход 5640 м$^3$/с, который был максимальным суточным расходом гидрографа паводка 2019 г. на 29.06.2019, рассчитанного по модели “ECOMAG”, разработанной в ИВП РАН Ю.Г. Мотовиловым [3, 8]. При этом уровень воды на выходной границе расчетной области, выбранной на расстоянии 865 м ниже гидропоста, принимался равным наблюденной максимальной отметке высоких вод 462.50 мБС в этом створе. Этот же уровень воды

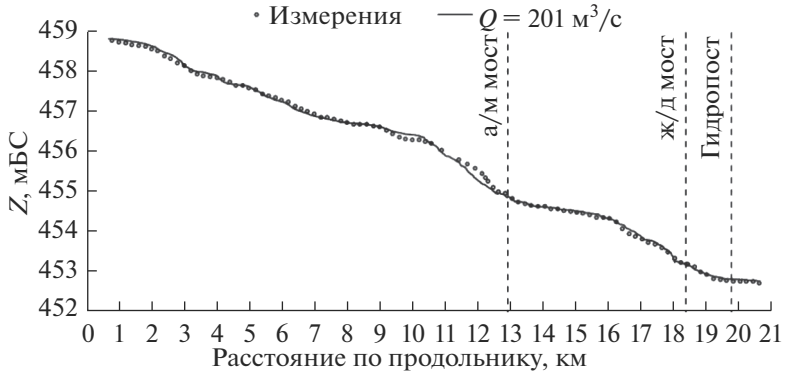


**Рис. 4.** Сопоставление рассчитанных (сплошная линия) и измеренных 20.09.2019 уровней воды при расходе 201 м$^3$/с в створе гидропоста р. Ия – г. Тулун.

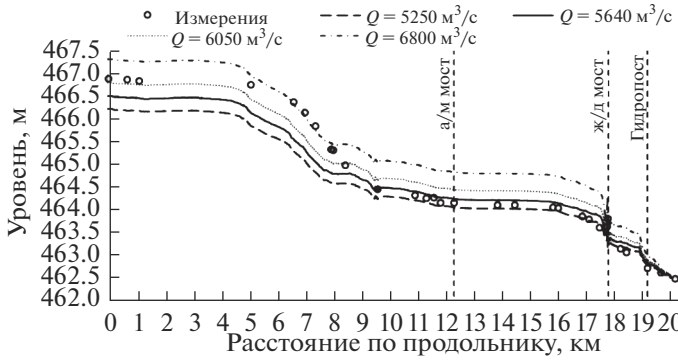


**Рис. 5.** Уровни воды по продольнику при расчете на постоянные расходы для паводка 2019 г. (при одной и той же отметке уровня воды на выходной границе 462.5 мБС).

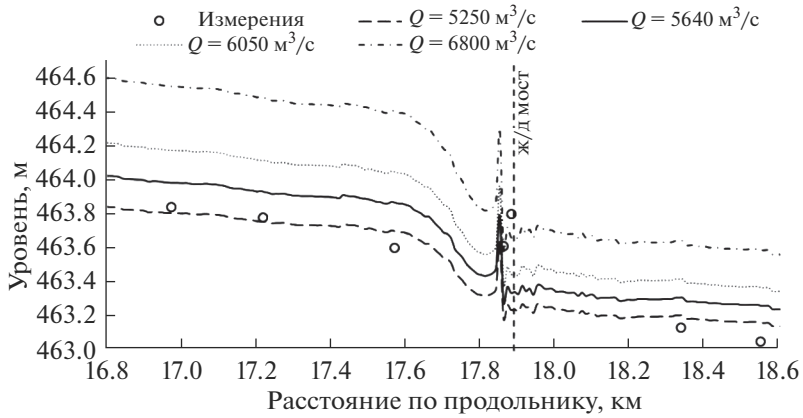


**Рис. 6.** Уровни воды по продольнику при расчете на постоянные расходы для паводка 2019 г. Фрагмент у железнодорожного моста.

на выходной границе принимался и для остальных расчетов для постоянных паводковых расходов. Следует отметить, что практически такой же расход (5630 м$^3$/с) получен в исследованиях ООО "Байкалпроект" по данным натурных наблюдений за отметками высоких вод с применением одномерной программы решения уравнений неравномерного движения в открытых руслах.

Результат расчетов для постоянного расхода 5640 м$^3$/с представлен на рис. 5. При этом уровни воды в верхней части гидродинамической модели (выше основной городской территории) ниже уровней воды, построенных по отметкам высоких вод, на 0.3 м; а на участке между мостами они оказались выше этих отметок на 0.2 м. Под обоими мостами совпадение по уровням воды получилось хорошим. Для железнодорожного моста это демонстрируется на рис. 6, где видно, что рассчитанная отметка уровня воды при набегании на опору совпадает с измеренным уровнем высоких вод. Существенное расхождение (до 0.6–0.8 м) с отметками высоких вод наблюдается только на участке 6–8 км.

Далее при тех же значениях *n* русла и поймы и уровне воды на выходной границе был выполнен расчет для постоянного расхода 6800 м$^3$/с, полученного ГГИ гидравлическим способом по формуле Шези и путем экстраполяции кривой скоростей на водомерном посту р. Ия – г. Тулун. Соответствующий продольный профиль водной поверхности представлен на рис. 5. Видно, что на верхнем участке модели рассчитанный уровень превышает отметки высоких вод на 0.5 м, а на участке между мостами (на основной городской территории) на 0.7–0.8 м. При этом отметка уровня воды на опоре железнодорожного моста на 0.5 м выше наблюденной (рис. 6) и ниже моста также превышает наблюденные уровни на 0.5–0.6 м. Таким образом, очевидно, что расход 6800 м$^3$/с – завышенный.

Расчетами подобрано два постоянных расхода воды – 6050 и 5250 м$^3$/с, которые дали хорошее совпадение с отметками высоких вод на верхнем

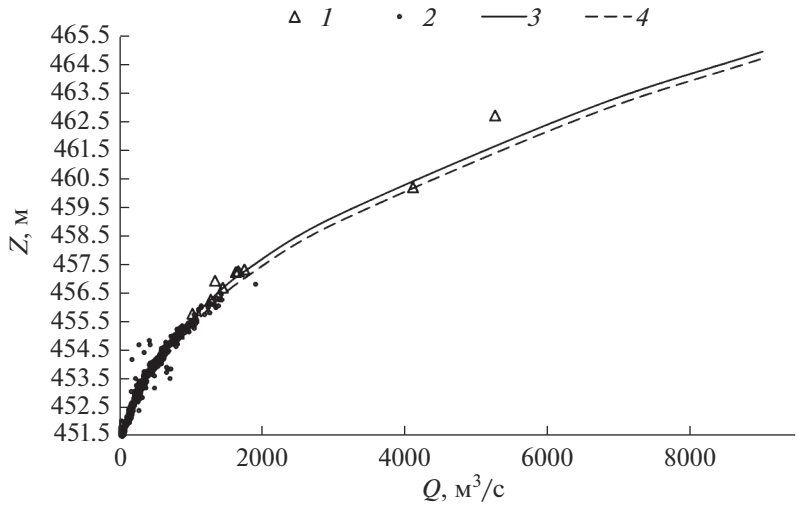


**Рис. 7.** Графики принятого на гидропосту и пересчитанного на выходную границу $Q(Z)$. *1* – максимальные наблюденные уровни воды на гидропосту (1980–1986 гг.), *2* – наблюденные уровни воды на гидропосту (1943–1974 гг.), *3* – принятый $Q(Z)$ на гидропосту, *4* – пересчитанный $Q(Z)$ на выходную границу.

(выше автодорожного моста) и нижнем участках модели соответственно (рис. 5). Эти расчеты показали, что необходимо проводить верификацию модели в динамическом режиме с учетом гидрографа паводка, форму и пиковый расход которого нужно подбирать из условий соответствия данным фактических наблюдений за уровнями воды. Таким образом, пришлось подбором решать обратную задачу, восстанавливая входной гидрограф по максимальным меткам высоких вод и ходу уровней во времени на гидропосту р. Ия – г. Тулун.

## ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ В НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Для нестационарных расчетов, кроме максимальных уровней воды по продольнику, определенных по отметкам высоких вод, для верификации результатов использовались также достоверные данные о ходе уровней воды по времени на гидропосту р. Ия – г. Тулун в паводок 2019 г. Поскольку гидрограф расходов в паводок не был измерен, имеется возможность в определенных пределах трансформировать какой-либо гидрограф для достижения по возможности наилучшего совпадения с перечисленными выше известными данными по уровням воды. Следует отметить, что восстановить гидрограф в створе гидропоста по кривой хода уровней воды во времени и кривой связи расходов и уровней $Q(Z)$ для численного моделирования недостаточно, поскольку гидрограф, как будет показано ниже, перестраивается в расчетной области и на входной границе модели (где он задается) может существенно отличаться от гидрографа на гидропосту. Более того, сама кривая $Q(Z)$ в створе гидропоста в данном случае определяется неоднозначно в области больших расходов, поскольку максимальные расходы на пике паводка не измерены (не говоря уже о том, что на кривой имеется петля гистерезиса).

Для выполнения нестационарных расчетов необходимо построение на выходной границе кривой связи расходов и уровней воды $Q(Z)$. Для этого по фактическим данным наблюдений с 1943 по 1974 г., а также данным по максимальным расходам воды за 1980, 1981, 1984, 2019 гг. (за последний год максимальный расход был принят с учетом стационарных расчетов) построена кривая $Q(Z)$ на гидропосту Тулун (рис. 7), которая соответствует связи расходов и уровней на подъеме паводка.

Далее эта кривая пересчитана с уклоном 0.3 м/км (определен по отметкам высоких вод на концевом участке модели) на расстояние 865 м вниз по реке от гидропоста – место расположения выходной границы (рис. 7).

Принятые в расчетах входные гидрографы (по модели ECOMAG, ГГИ и скорректированные) представлены на рис. 8. Для р. Азей принят гидрограф трапецеидальной формы с максимальным расходом 30 м$^3$/с, который не оказывает заметного влияния на результаты моделирования ввиду малости расхода. По модели ECOMAG выдается расход с суточным шагом по времени, что недостаточно для детализированного динамического расчета. Кроме того, максимальный мгновенный расход может быть выше, чем среднесуточный. Это дает основание выполнить корректировку исходного гидрографа и получить несколько новых гидрографов для улучшения совпадения рассчитанных уровней с измеренными.

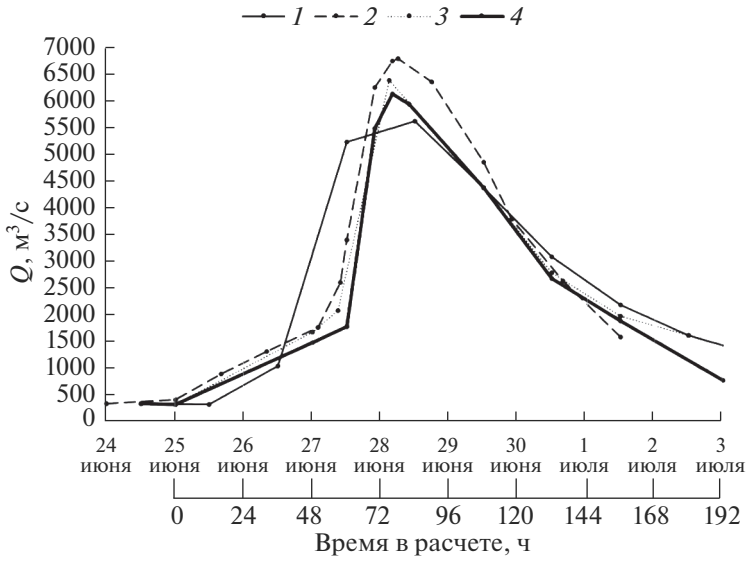


**Рис. 8.** Расчетные гидрографы, задаваемые на входной границе по р. Ия: *1* – ECOMAG с $Q_{max}$ = 5640 м$^3$/с, *2* – ГГИ с $Q_{max}$ = 6800 м$^3$/с, *3* – $Q_{max}$ = 6400 м$^3$/с, *4* – гидрограф с $Q_{max}$ = 6150 м$^3$/с.

Сначала был выполнены расчеты для гидрографа 1, полученного по модели ECOMAG и задаваемого на входной границе гидродинамической модели (рис. 8). На выходной границе задавалась связь уровней и расходов по кривой на рис. 7. На рис. 9б представлен график хода уровней на гидропосту для гидрографа 1. Совпадение по уровням воды на гидропосту хорошее на пике паводка и достаточно удовлетворительное на спаде. Подъем уровней до высоких отметок начинается по расчету значительно раньше, чем по факту, что свидетельствует о завышении расходов на подъеме паводка.

С учетом этого для всех остальных принятых в расчетах гидрографов на входной границе (рис. 8) моменты начала интенсивного увеличения расхода сдвинуты вперед по сравнению с гидрографом 1, а ветви спада сохранены практически такими же, как и у гидрографа 1. При этом суммарный объем стока для гидрографов 3, 4 уменьшился на ~0.14 км$^3$ по сравнению с гидрографом, полученным на модели ECOMAG. Поскольку объем стока за паводок (при расходах >500 м$^3$/с) для гидрографа 1 оценивается по графику на рис. 8 в 1.8 км$^3$, то принятое в расчетах уменьшение паводкового стока для откорректированных гидрографов составило 7.8%, что находится в пределах погрешности гидрологической модели.

На рис. 9а представлены гидрографы рассчитанных расходов воды в четырех контрольных створах. Разница максимальных расходов на входной и выходной границах на пике паводка почти не наблюдается, что объясняется формой рассчитанного по модели ECOMAG гидрографа, в котором на пике паводка за сутки происходит увеличение расхода всего на 390 м$^3$/с, и аккумуляция расхода на пойме в этот промежуток времени слабая. Между тем на моменты времени 48 и 60 ч (в середине и конце участка резкого нарастания расхода по гидрографу 1) разница расходов на входной и выходной границах составляет ~1000 м$^3$/с (рис. 9а). Общий объем аккумулированной воды на ветви подъема для гидрографа 1 равен 0.1 км$^3$.

Провал (понижение) в гидрографе на автодорожном мосту (рис. 9а, учитывается только расход в подмостовом отверстии) на период времени с 52 до 136 ч от начала расчета связан с переливом воды через защитные дамбы (начинается при расходе ~3600 м$^3$/с) и с дальнейшим пропуском основной части расхода напрямую к створу железнодорожного моста по пойме через городскую излучину. При этом в русле в створе автодорожного моста расход падает до 1200 м$^3$/с, а >4000 м$^3$/с – идет по пойме.

На рис. 9в представлен продольный профиль водной поверхности для гидрографа 1. Видно, что на верхнем участке вблизи входной границы максимальные отметки уровня воды на 0.4 м ниже отметок высоких вод, а на участках между мостами и ниже железнодорожного моста – близки к наблюденным. Это свидетельствует о том, что на входной границе максимальный расход должен быть >5640 м$^3$/с, но расход должен быть резко нестационарным на пике паводка.

Следующим был выполнен расчет по гидрографу 2 с максимальным расходом 6800 м$^3$/с. Ход уровней воды на гидропосту для этого случая представлен на рис. 10б. Видно, что максимальный уровень почти на 0.5 м превышает измеренный.

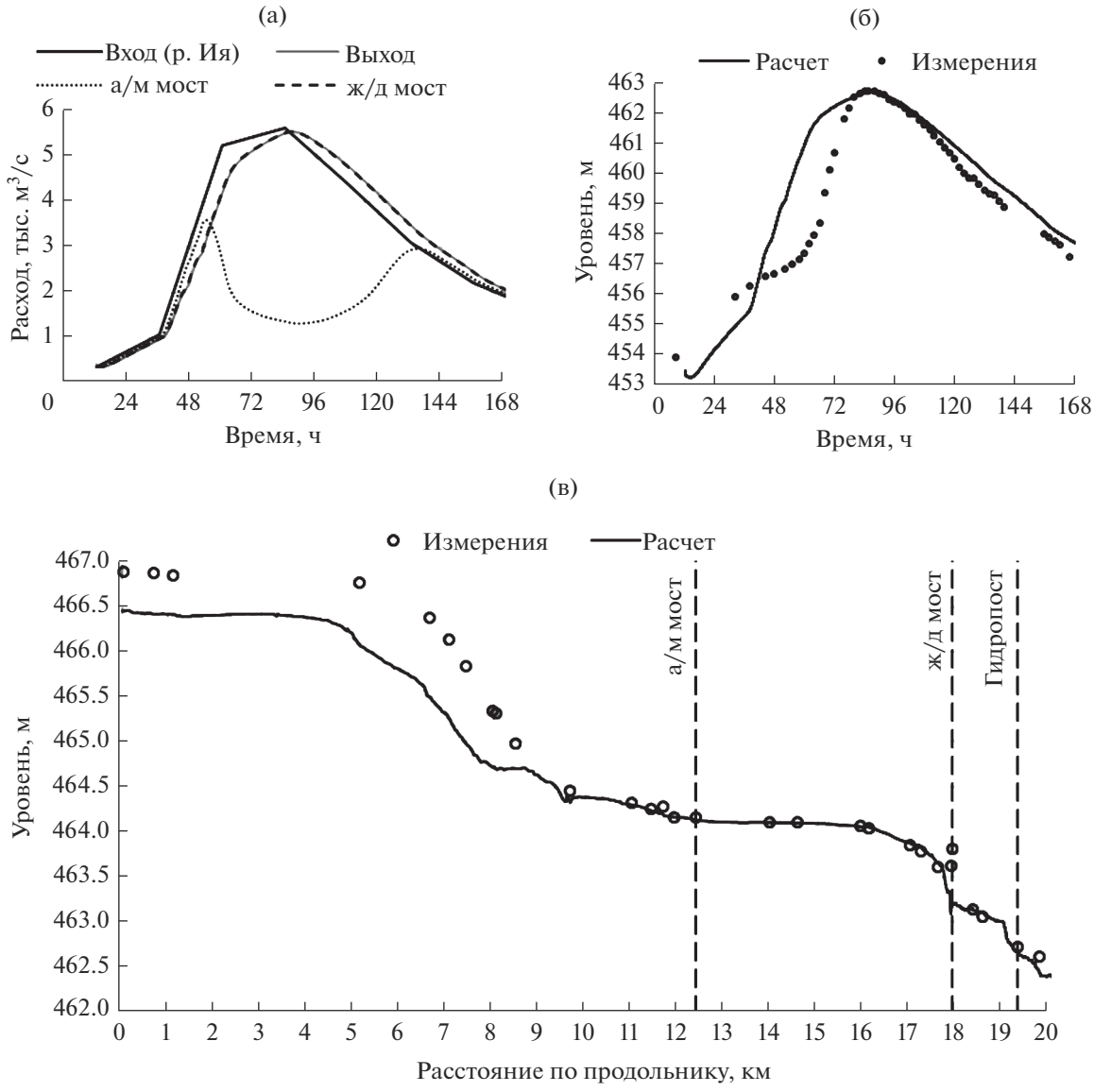


**Рис. 9.** Расходы воды в контрольных створах (а), ход уровней воды на гидропосту (б), максимальные уровни воды по продольнику (в) при расчете по гидрографу № 1.

На рис. 10а представлены расходы воды в контрольных створах при расчетном гидрографе 2. Видно, что в створе гидропоста проходит максимальный расход ≥6450 м$^3$/с, т.е. уменьшается по сравнению с максимальным входным расходом на ~350 м$^3$/с. Максимальный продольный профиль водной поверхности для этого варианта изображен на рис. 10в. Вблизи входной границы рассчитанные уровни превышают отметки высоких вод на 0.3 м, а между мостами (на затопленной городской излучине) – на 0.7 м – это большая погрешность.

Далее был выполнен расчет по гидрографу 3 с максимальным расходом 6400 м$^3$/с на входной границе (рис. 8). Ход уровней воды на гидропосту для этого случая гораздо лучше совпал с измеренными значениями, чем для гидрографов 1, 2.

Затем подобран гидрограф 4 более “естественной” формы (рис. 8), который дает хорошее совпадение по уровням водной поверхности на гидропосту в динамическом режиме (рис. 11б) и хорошее совпадение максимальных уровней по продольному профилю (рис. 11в). На входной границе максимальный расход этого гидрографа равен 6150, в створе гидропоста – 5700 м$^3$/с (близкий к рассчитанному по программе ЭКОМАГ). Таким образом, аккумуляция расхода на пике паводка в этом случае составляет 450 м$^3$/с (рис. 11а). На подходе к городу, согласно этому гидрографу,

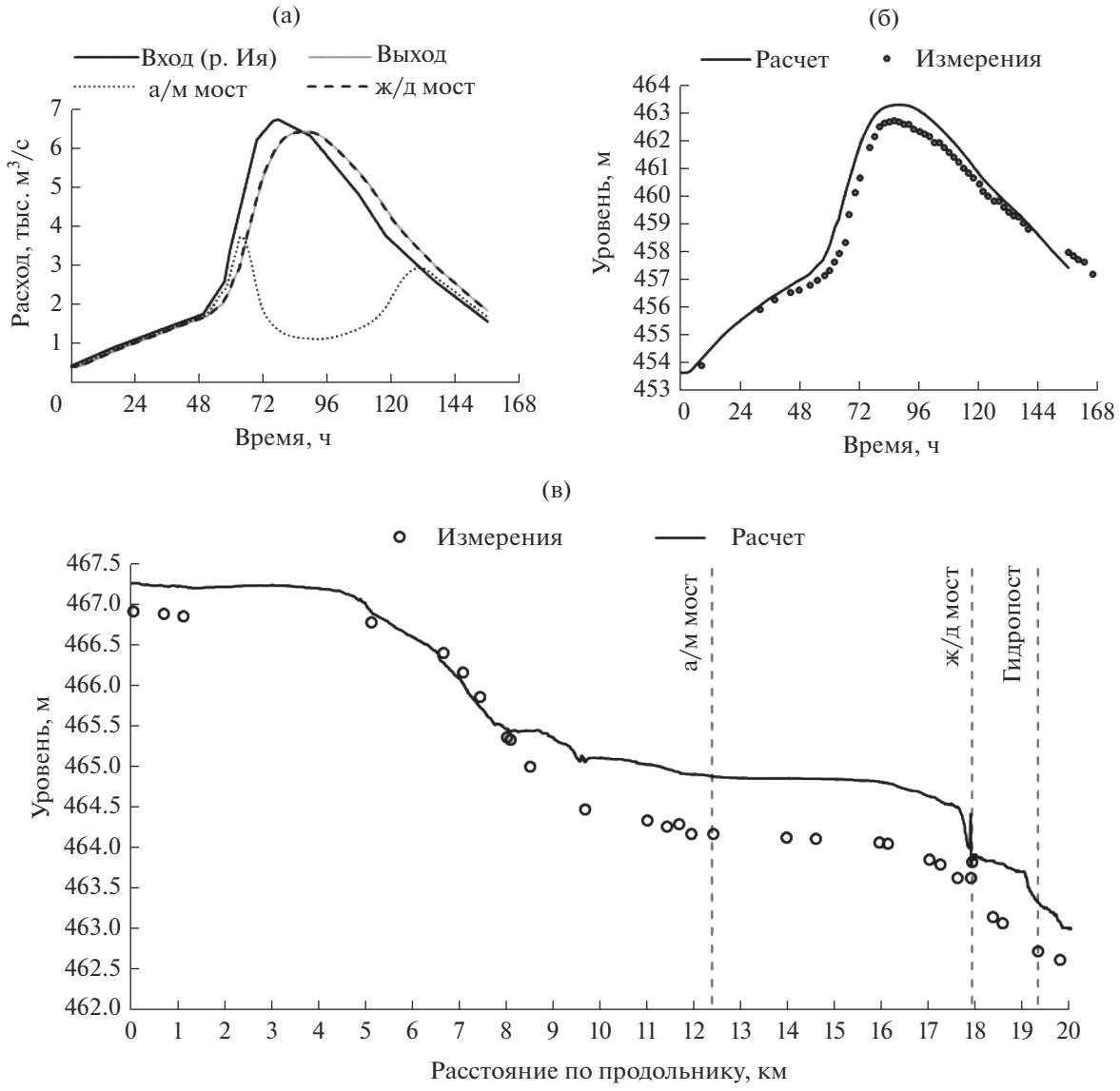


**Рис. 10.** Расходы воды в контрольных створах (а), ход уровней воды на гидропосту (б), максимальные уровни воды по продольнику (в) при расчете по гидрографу № 2.

максимальный расход паводка 2019 г. следует принимать равным 6050 м$^3$/с.

Средняя и среднеквадратическая погрешности, рассчитанные для хода уровней воды на гидропосту за основное время паводка – 8 сут, равны 0.14 и 0.18 м, что по отношению к перепаду уровней 9 м за паводок составляет 1.5 и 2.0%. Соответствующие погрешности, рассчитанные по отклонениям от меток высоких вод на продольном профиле, составили 0.21 и 0.29 м соответственно. Основной вклад в последние погрешности дает значительное расхождение измеренных и рассчитанных уровней воды на участке 6–8 км по продольному профилю (рис. 11в). Первой причиной этого могло быть повышенное сопротивление движению потока, вызванное плывущими домами, мусором и т.п. (особенно на ветви подъема паводка). Второй причиной может быть повышенное волнообразование на этом участке, вызванное большими скоростями течения, достигающими 3–3.5 м/с. При этом отметки высоких вод будут соответствовать гребням волн, а не осредненной отметке свободной поверхности. Третьей причиной может быть переформирование дна реки в период паводка, особенно на участках с большими скоростями (размыв) и ниже их по течению (отложения грунта). Выполнен контрольный расчет с приподнятыми на 1–2 м минимальными отметками дна на этом участке, который показал гораздо лучшее совпадение уровней с отметками высоких вод.

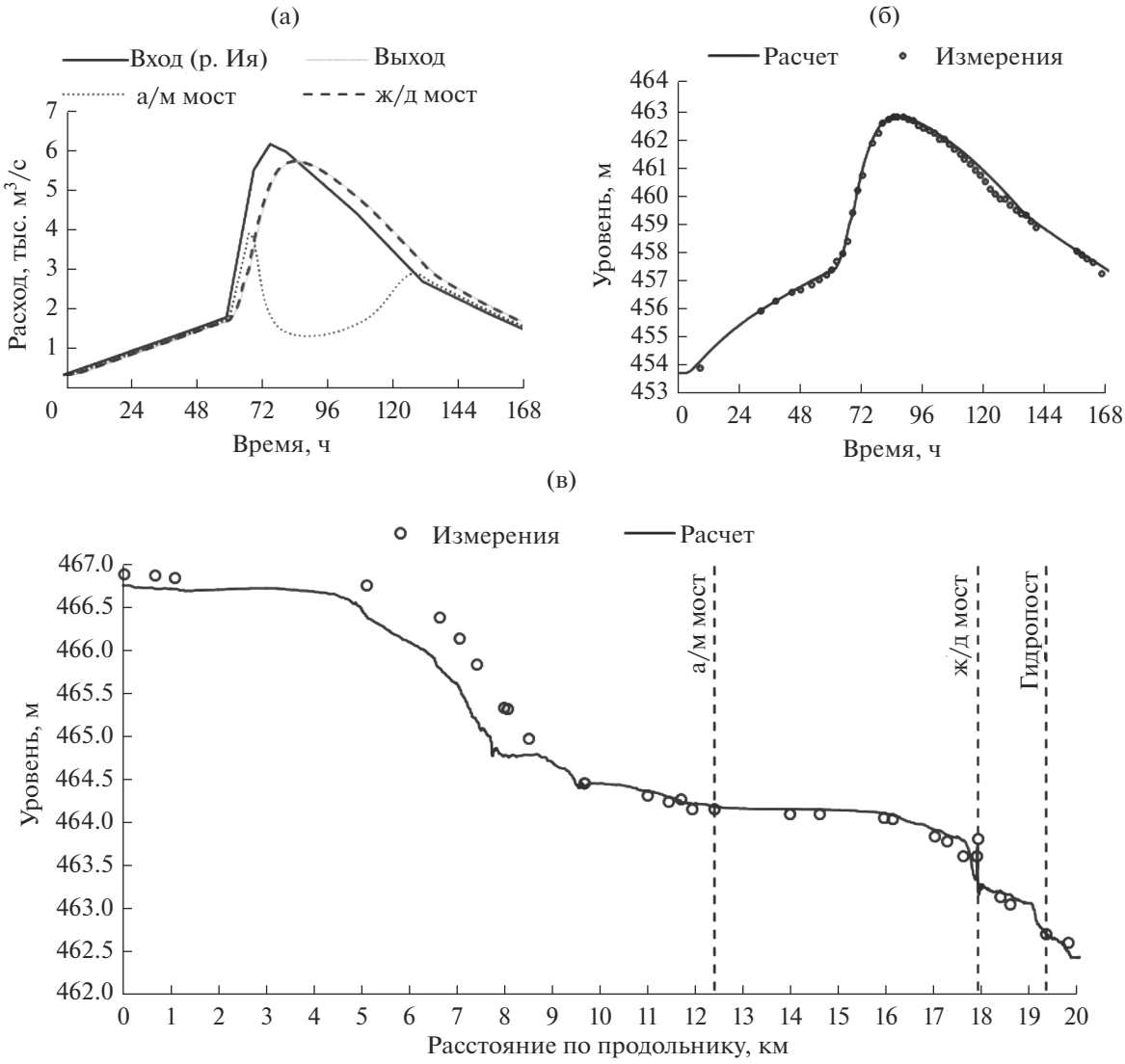


**Рис. 11.** Расходы воды в контрольных створах (а), ход уровней воды на гидропосту (б), максимальные уровни воды по продольнику (в) при расчете по гидрографу № 4.

По результатам моделирования прохождения волны паводка в районе г. Тулуна подготовлен анимационный ролик. Некоторые элементы динамики затопления представлены на рис. 12, 13. Расчетами установлено (подтверждается и натурными наблюдениями), в частности, что прорыв защитных дамб начался в середине излучины, и некоторое время водный поток двигался поперек общего направления долины реки. Это исключает применение одномерных численных моделей для таких сложных случаев. Сопоставление фактической динамики затопления с результатами 2D-моделирования показало хорошее совпадение по времени и характеру затопления отдельных участков поймы.

## ВЫВОДЫ

Моделирование паводкового события в нестационарном режиме (с использованием реалистичного гидрографа стока на подходе к городской территории) на численной двумерной гидродинамической модели позволило детально воспроизвести сложную динамику затопления широкой поймы в четко видном расширении долины, где расположен г. Тулун. Из-за аккумуляции >10% стока паводка на пойме пиковый расход паводка снизился в створе у гидрометрического поста на 300–400 м$^3$/с по сравнению с величиной на подходе к городу. Таким образом, при максимальном мгновенном расходе 5700 м$^3$/с на посту максимальный мгновенный расход на

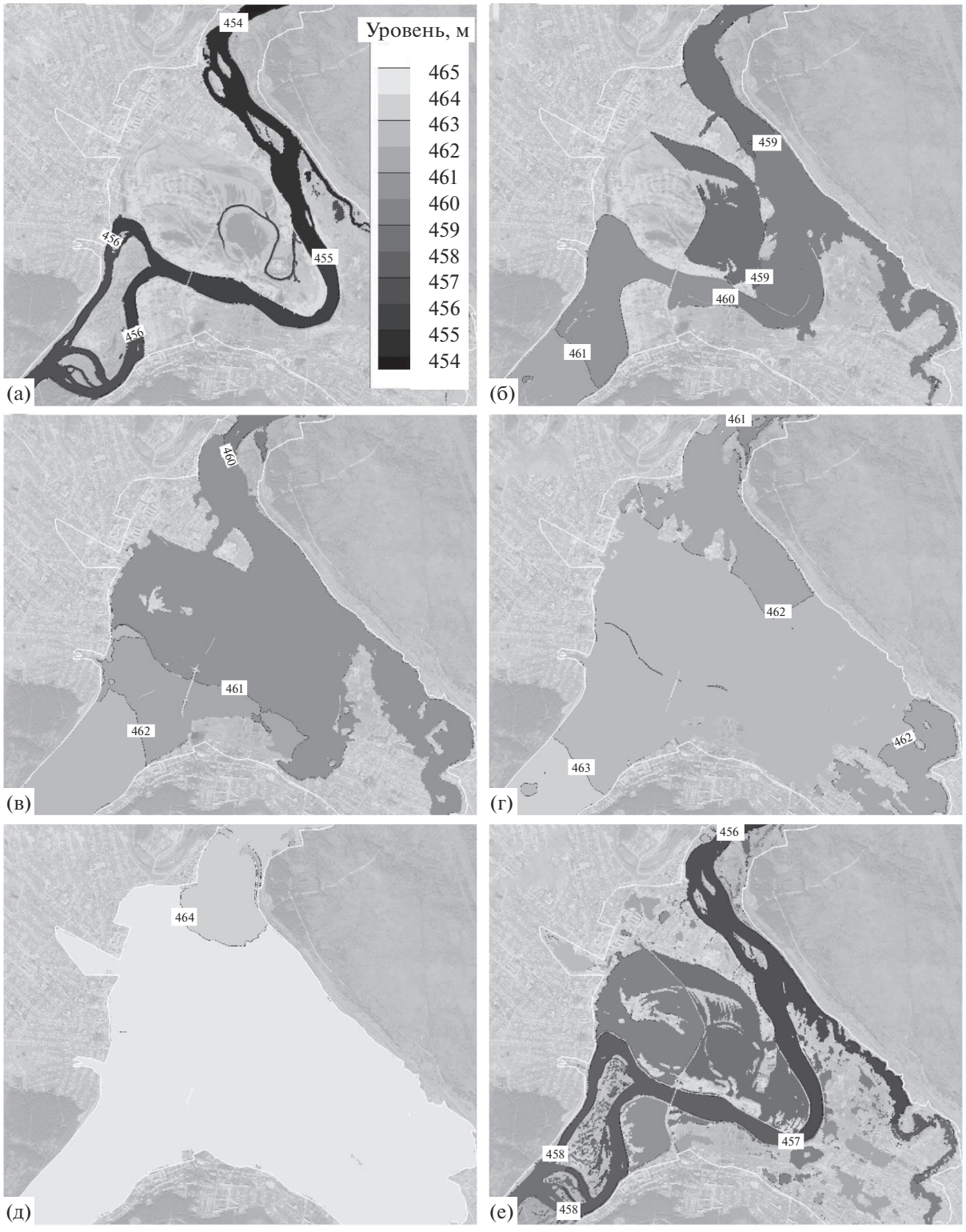


**Рис. 12.** Динамика затопления г. Тулуна (изменение уровней воды) во время паводка 2019 г., полученное в результате расчета: а – 26 июня, 0:00, б – 28 июня, 16:00, в – 28 июня, 20:00, г – 28 июня, 23:00, д – 29 июня, 14:00, е – 3 июля, 24:00.

входе в городскую излучину составлял 6000–6100 м$^3$/с. Именно эти величины сформировали катастрофические затопления территории. Эксперименты ГГИ на физической модели подтвердили величину максимального расхода на входе в город в диапазоне 6000–6100 м$^3$/с.

**Рис. 13.** Динамика затопления г. Тулуна (модули скорости и линии тока) 28 июня 2019 г., полученная в результате расчета: а – 15:00, б – 16:00, в – 17:00, г – 18:00, д – 19:00, е – 20:00.

На взгляд авторов статьи, гидродинамическое моделирование на пространственных численных и физических (гидравлических) моделях в настоящее время позволяет более точно и с меньшим разбросом, чем на гидрологических моделях, восстановить максимальные паводковые расходы в определенных створах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Алексюк А.И., Беликов В.В.* Программный комплекс STREAM 2D CUDA для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках с использованием технологий Compute Unified Device Architecture (на графических процессорах NVIDIA) // Свид. о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2017660266 от 20.09.2017.
2. *Беликов В.В., Борисова Н.М., Алексюк А.И., Румянцев А.Б., Глотко А.В., Шурухин Л.А.* Гидравлическое обоснование проекта Багаевского гидроузла с применением численного гидродинамического моделирования // Гидротех. стр-во. 2018. № 5. С. 19–35.
3. *Калугин А.С.* Исследование природных факторов формирования наводнений на реке Ия методами физико-математического моделирования // Сб. докл. Международ. науч. конф. пам. Ю.Б. Виноградова “Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению”. СПб.: Изд-во ВВМ, 2020. С. 280–285.
4. *Макарьева О.М.* Результаты моделирования паводка на реке Ия – Тулун. [Электронный ресурс]. https://vk.com/@other_hydrology-rezultaty-modelirovaniya-pavodka-na-reke-iya-tulun 37
5. *Шаликовский А.В., Лепихин А.П., Тиунов А.А., Курганович К.А., Морозов М.Г.* Наводнения в Иркутской области 2019 года // Вод. хоз-во России. 2019. № 6. С. 48–65. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2019-6-4
6. *Aleksyuk A.I., Belikov V.V.* Simulation of shallow water flows with shoaling areas and bottom discontinuities // Comput. Math. Math. Phys. 2017. V. 57. № 2. P. 318–339. https://doi.org/10.1134/S0965542517020026
7. *Aleksyuk A.I., Belikov V.V.* The uniqueness of the exact solution of the Riemann prob-lem for the shallow water equations with discontinuous bottom // J. Comput. Phys. 2019. V. 390. P. 232–248. https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.04.001
8. *Motovilov Yu. G., Gottschalk L., Engelandand K., Belokurov A.* ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region // Inst. Rep. Series. Department Geophys. Univ. Oslo, 1999. № 105. 88 p.

*ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, 2021, том 48, № 5, с. 526–536*

## ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

*УДК 532.59;556.556.4*

# СЕЙШЕВЫЕ КОЛЕБАНИЯ В СИСТЕМЕ СЕВАСТОПОЛЬСКИХ БУХТ[1]

**© 2021 г. Ю. В. Манилюк[a], *, Д. И. Лазоренко[a], В. В. Фомин[a]**

[a]*ФИЦ "Морской гидрофизический институт РАН", Севастополь, 299011 Россия*

**e-mail: uvmsev@yandex.ru*

Поступила в редакцию 15.09.2020 г.
После доработки 02.11.2020 г.
Принята к публикации 30.03.2021 г.

В линейном приближении на основе гидродинамической конечноэлементной модели ADCIRC исследованы сейшевые колебания в системе севастопольских бухт, возникающие в результате воздействия волновых возмущений на жидкой границе расчетной области. Расчеты выполнены для возмущений с периодами от 1 до 52 мин продолжительностью воздействия от 4 до 24 ч. Найдены резонансные периоды бухт системы. Установлено, что воздействие возмущений длительностью >15 ч с периодами 1–15 мин приводит к генерации интенсивных высокочастотных мод сейш с периодами 2.0–4.5 мин, которые начинают доминировать над низкочастотными модами (периоды >10 мин) во всех севастопольских бухтах, что создает в них условия возникновения тягуна. Бухты системы взаимодействуют друг с другом путем обмена энергией через их входы, что выражается в проникновении колебаний с периодами собственных мод каждой из бухт в соседние бухты. Мода Гельмгольца Севастопольской бухты (период 48 мин) проявляется во всех бухтах системы.

*Ключевые слова:* сейши в бухтах, севастопольские бухты, модель ADCIRC.

**DOI:** 10.31857/S0321059621050126

## ВВЕДЕНИЕ

В береговой зоне Севастополя расположена система бухт разных конфигурации, размеров и батиметрии (рис. 1), имеющих важное значение для жизнедеятельности города. Большинство из них имеют вытянутую форму (длина превосходит ширину) и глубоко вдаются в побережье. К бухтам такого вида принадлежат бухты Севастопольская, Карантинная, Стрелецкая, Камышовая, Казачья. Другой вид образуют бухты, у которых ширина и длина незначительно различаются: Круглая, Абрамова, Песочная.

К наиболее часто наблюдаемым явлениям в замкнутых и частично замкнутых водоемах относятся сейши – стоячие колебания массы воды во всем водоеме или в обособленной его части [10]. Сейши в частично замкнутых бассейнах (бухтах, заливах, гаванях), связанных одним или несколькими выходами с морем, представляют собой особый вид сейшевых движений ('harbor oscillations"). Они отличаются от сейш в полностью замкнутых водоемах следующим [10, 20]: обычно эти колебания генерируются не непосредственным воздействием внешних факторов (атмосферного давления, ветра, осадков и пр.) на внутреннюю акваторию, а за счет прихода длинных волн из открытого моря через вход; потери волновой энергии в основном не связаны с процессами диссипации, а происходят за счет излучения ее через открытую границу; в частично замкнутых акваториях существует особый вид колебаний – мода Гельмгольца (нулевая или фундаментальная мода), аналогичная основному тону акустического резонатора, отсутствующая в замкнутых водоемах. Данная мода не имеет узловых линий в акватории бухты. Как показывают данные натурных наблюдений, в бухтах и гаванях с узким входом мода Гельмгольца обычно доминирует над всеми остальными видами собственных колебаний и определяет общий характер движений во внутренней акватории [10]. Детальное исследование моды Гельмгольца в реальных бухтах проведено в [3, 11].

Длинные волны, приходящие в бухты из открытого моря, генерируются в основном процессами двух принципиально разных типов [10]: во-первых, анемобарическими (АБ) процессами, включающими в себя воздействия флуктуаций атмосферного давления и ветра на поверхность моря, а также колебания уровня моря, вызванные рассеянием энергии крупномасштабных длинно-

[1] Работа выполнена в Морском гидрофизическом институте РАН в рамках государственного задания (тема 0827-2018-0004, шифр "Прибрежные исследования") при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-05-80035).

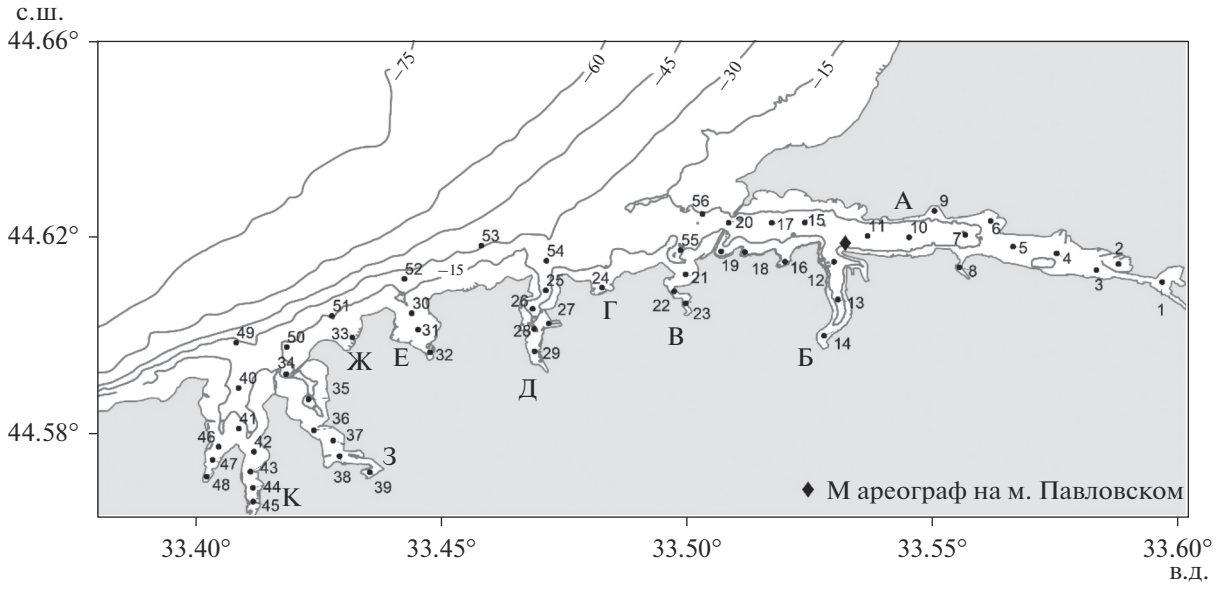


**Рис. 1.** Конфигурация и рельеф дна системы севастопольских бухт: А – Севастопольской; Б – Южной; В – Карантинной; Г – Песочной; Д – Стрелецкой; Е – Круглой; Ж – Абрамова; З – Камышовой; К – Казачьей. Серые линии – изобаты, м. Цифрами отмечены точки, в которых выводились результаты численного моделирования.

волновых образований типа метеоприливов или штормовых нагонов на неоднородностях рельефа и линии берега; во-вторых, нелинейными взаимодействиями ветровых волн или крупной зыби, приводящими к возникновению инфрагравитационных (ИГ) волн. Характерные периоды АБ-волн – в интервале от нескольких десятков секунд до нескольких часов, а ИГ-волн – от 30 до 300 с. Проникая во внутреннюю акваторию, АБ- и ИГ-волны генерируют там резонансные сейшевые колебания. Периоды таких сейш близки к собственным периодам бухт, определяемых их батиметрией и профилем береговой черты.

Важный параметр, характеризующий резонансные свойства бухты, – ее добротность $Q$ ($Q$-фактор). Этот параметр не только служит мерой затухания энергии колебаний [10, 20], но и позволяет оценить, во сколько раз могут усилиться в вершине бухты входящие в нее волны. Чем выше добротность, тем более сильные колебания (при прочих равных условиях) можно ожидать для данной системы [10]. Например, если $Q = 10$, то соответствующая волна усилится (за несколько осцилляций) в вершине бухты в ~10 раз. Предварительные оценки значения $Q$ для моды Гельмгольца можно получить, воспользовавшись формулой для бассейна прямоугольной формы постоянной глубины [20]: $Q = L/l$ ($L$ – длина, $l$ – ширина бухты).

Короткопериодные сейши (с периодами до 5 мин) могут быть причиной такого опасного явления, как тягун [10, 20], – сильные возвратно-поступательные движения воды, приводящие к обрыву швартовых и столкновениям судов, затрудняющие погрузочно-разгрузочные работы. В севастопольских бухтах базируется большое количество судов различного назначения, расположено несколько портов, поэтому актуальна задача определения условий генерации в них короткопериодных сейш, которые могут привести к возникновению тягуна.

Смежные бухты взаимодействуют друг с другом за счет их связи через входы, в которые проникают собственные колебания соседних бухт. Это расширяет модовый состав сейш в каждой бухте и увеличивает риск возникновения опасных для судов и береговой инфраструктуры колебаний уровня воды и течений. Так, например, на о. Менорка в бух. Сьютаделья (“Ciutadella”) достаточно интенсивно проявляется мода Гельмгольца соседней бух. Платха Гран (“Platja Gran”) [11, 14], затрудняющая работу порта. В статье [19] на основе лабораторных экспериментов установлено, что взаимодействие смежных бухт оказывает значительное влияние на параметры сейшевых колебаний. В системе севастопольских бухт находятся 10 крупных бухт, которые в той или иной мере воздействуют друг на друга, что необходимо учитывать при прогнозировании в них опасных явлений.

Важный параметр, определяющий модовый состав и характеристики генерируемых в бухтах резонансных колебаний, – длительность действия возмущения. В [13] на основе математического моделирования исследован отклик яхтенной марины Рима (“yaht harbor of Rome”, Остин,

Италия) длиной 1 км, шириной 200 м, глубиной 4 м) на волновые возмущения с периодами, близкими к собственным периодам бухты, приходящими в бухту из открытого моря по нормали к входу. Показано, что отдельные моды могут усиливаться в десятки и даже сотни раз. При этом продолжительность действия возмущения должна составлять сотни часов. На самом деле реальную опасность для судов могут представлять резонансные колебания, возбуждаемые в бухте за относительно короткое время (до суток), с амплитудами, превышающими в 3–5 раз амплитуды входящих волн.

Настоящая работа посвящена определению резонансных периодов всех основных севастопольских бухт, исследованию взаимодействия отдельных бухт системы друг с другом и влиянию длительности действия начального возмущения на генерацию в них сейш. Также анализируются условия генерации в бухтах высокочастотных мод (с периодами до 5 мин), которые могут служить причиной возникновения тягуна. Для достижения указанных целей используются результаты математического моделирования и имеющихся данных натурных наблюдений.

## ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЕДЫДУЩИХ ИСЛЕДОВАНИЙ

### *Натурные наблюдения*

К настоящему времени данные натурных наблюдений имеются только для бух. Севастопольской. В [2] представлены результаты обработки данных наблюдений за уровнем моря с дискретностью 5 мин за период с апреля 2001 г. по сентябрь 2002 г., выполненных с помощью прибрежного мареографа на гидрометеорологической станции Севастополь, расположенной на м. Павловском (рис. 1). В течение указанного периода измерений максимальная амплитуда сейшевых колебаний составила 10–24 см. На рис. 2 приведен спектр колебаний уровня в бух. Севастопольской, построенный по 90-суточной реализации [2]. На данном спектре выделяются колебания, соответствующие полусуточной и суточной составляющим прилива, а также периоды 0.9, 1.25, 2.5 ч, характерные для сейш. В работе [18], посвященной исследованию приливов в Черном море, указывается, что на побережье Крыма наиболее интенсивны главная лунная полусуточная составляющая $M_2$ = 12.42 ч и гравитационная лунно-солнечная суточная составляющая $K_1$ = 23.93 ч. Интенсивности этих приливных мод близки к другу, что хорошо согласуется с рис. 2.

Сведения о течениях в Севастопольской бухте, имеющих сейшевое происхождение, получены в результате кратковременных измерений параметров течений, выполненных во время экспедиций

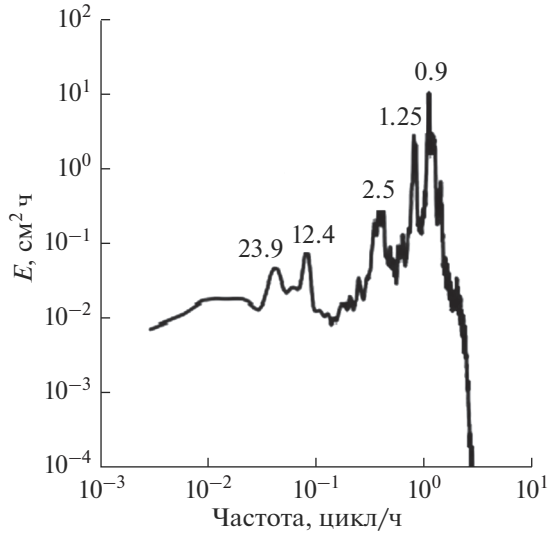


**Рис. 2.** Спектр колебаний уровня моря в бух. Севастопольской для 90-суточной реализации 02.05.2001–30.07.2001 [2]. Показаны периоды (ч) для основных пиков.

Морского гидрофизического института в 2008 и 2014 гг. [8, 9]. При этом было установлено, что у входа в бухту флуктуации скорости течений происходят с периодом ~60 мин.

### *Математическое моделирование*

В работе [6] рассмотрены условия возникновения тягуна в бух. Севастопольской, возможности генерации сейш инфрагравитационными волнами, проведены оценки возможных скоростей сейшевых течений в бух. Севастопольской. В [12] с использованием метода конечных элементов вычислены собственные периоды старших мод бух. Севастопольской: 50.0, 22.0, 14.7, 12.0, 9.5, 7.9, 6.4 мин. В [16, 17] исследованы сейшевые колебания в Севастопольской и Карантинной бухтах, вызываемые разными типами возмущений. В [1] с помощью конечноразностной модели выполнен расчет периодов собственных мод Карантинной бухты. Получены следующие периоды: 9.2, 5.5, 3.3, 1.8 мин.

### *Аналитические оценки резонансных характеристик севастопольских бухт*

В табл. 1 приведены аналитические оценки собственных периодов севастопольских бухт. Как видно, величины собственных периодов севастопольских бухт ≤50 мин. Поэтому пики на энергетическом спектре, соответствующие периодам 1.25 и 2.5 ч (рис. 2), видимо, принадлежат высокочастотным модам собственных колебаний Черного моря.

**Таблица 1.** Периоды собственных колебаний севастопольских бухт, рассчитанные по формулам для бассейна постоянной глубины [4] и для бассейна с параболическим профилем дна [7] (эти значения указаны в скобках) (под названием бухт приведены: длина бухты, км; ширина бухты, км; средняя глубина бухты, м; глубина у входа в бухту, м)

| Мода | | бух. Севастопольская (7.0, 1.0, 11.7, 20.0) | бух. Южная (2.4, 0.32, 12.6, 17.0) | бух. Карантинная (1.57, 0.2, 8.2, 15.0) | бух. Песочная (0.395, 0.347, 3.1) |
|---|---|---|---|---|---|
| $k$ | $m$ | $T_{km}$, мин | $T_{km}$, мин | $T_{km}$, мин | $T_{km}$, мин |
| 0 | 0 | 43.8 | 14.4 | 11.7 | 3.6 |
| 1 | 0 | 14.6 (15.0) | 4.8 (5.6) | 3.9 (3.9) | 1.2 |
| 2 | 0 | 8.8 (9.5) | 2.9 (3.5) | 2.3 (2.5) | 0.7 |
| 3 | 0 | 6.3 (6.9) | 2.1 (2.6) | 1.7 (1.8) | 0.5 |
| 0 | 1 | 2.8 | 1.0 | 0.7 | 2.1 |
| 1 | 1 | 2.8 | 0.9 | 0.7 | 1.5 |
| | | бух. Стрелецкая (2.0, 0.38, 9.9, 20.0) | бух. Круглая (1.1, 0.68, 5.3, 15.0) | бух. Абрамова (0.512, 0.474, 2.6) | бух. Камышовая (2.8, 0.41, 9.1, 20.0) |
| $k$ | $m$ | $T_{km}$, мин | $T_{km}$, мин | $T_{km}$, мин | $T_{km}$, мин |
| 0 | 0 | 13.5 | 10.2 | 6.8 | 19.8 |
| 1 | 0 | 4.5 (4.3) | 3.4 (2.7) | 2.3 | 6.7 (6.0) |
| 2 | 0 | 2.7 (2.7) | 2.0 (1.7) | 1.4 | 4.0 (3.8) |
| 3 | 0 | 1.9 (2.0) | 1.5 (1.3) | 1.0 | 2.8 (2.8) |
| 0 | 1 | 1.3 | 3.0 | 3.1 | 1.5 |
| 1 | 1 | 1.2 | 2.3 | 2.4 | 1.4 |

Расчет $Q$-фактора для севастопольских бухт по формуле для бассейна прямоугольной формы и постоянной глубины [20] с использованием геометрических размеров бухт, приведенных в табл. 1, дал следующие значения для бухт: Севастопольской – 7, Южной – 7.5, Круглой – 1.6, Карантинной – 7.9, Стрелецкой – 5.2, Камышовой – 6.8.

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для определения параметров генерируемых в севастопольских бухтах сейшевых колебаний резонансных периодов и исследования влияния длительности действия начального возмущения проведена серия численных экспериментов на основе конечно-элементной модели ADCIRC (Advanced Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries) [15]. Использован вариант модели, основанный на осредненных по глубине линеаризованных уравнениях движения в длинноволновом приближении без учета силы Кориолиса. Описание модели и выбора ее параметров приведено в [17].

Моделирование сейшевых колебаний в системе Севастопольских бухт проведено на сетке из 107202 треугольных конечных элементов (рис. 3). Расчетная область включала в себя все бухты и часть прибрежной зоны в виде сектора с радиусом 8 км. Сетка сгущалась в бухтах (длины сторон треугольников здесь составляли ~50 м). Шаг интегрирования по времени $\Delta t = 0.025$ с.

Расчеты выполнялись для трех интервалов периодов возмущений, перекрывающих диапазон собственных периодов Севастопольских бухт (табл. 1):

$$\Delta T_1 = 30\text{–}52 \text{ мин}, \quad \Delta T_2 = 8\text{–}30 \text{ мин}, \quad \Delta T_3 = 1\text{–}15 \text{ мин}. \tag{1}$$

Выбранные диапазоны содержат как высокочастотные моды сейш Черного моря (возмущения, вызванные перемещением циклонов над акваторией моря, волнами цунами; диапазоны $\Delta T_1$, $\Delta T_2$), так и инфрагравитационные волны (возмущения свободной поверхности моря, вызванные колебаниями атмосферного давления; диапазон $\Delta T_3$).

Каждый численный эксперимент состоял из двух этапов. На первом этапе использованы нулевые начальные условия, и при $t > 0$ на открытой границе расчетной области задавались возмущения вида [17]:

$$\eta = \frac{a_0}{N}\sum_{n=1}^{N}\sin(\omega_n t), \tag{2}$$

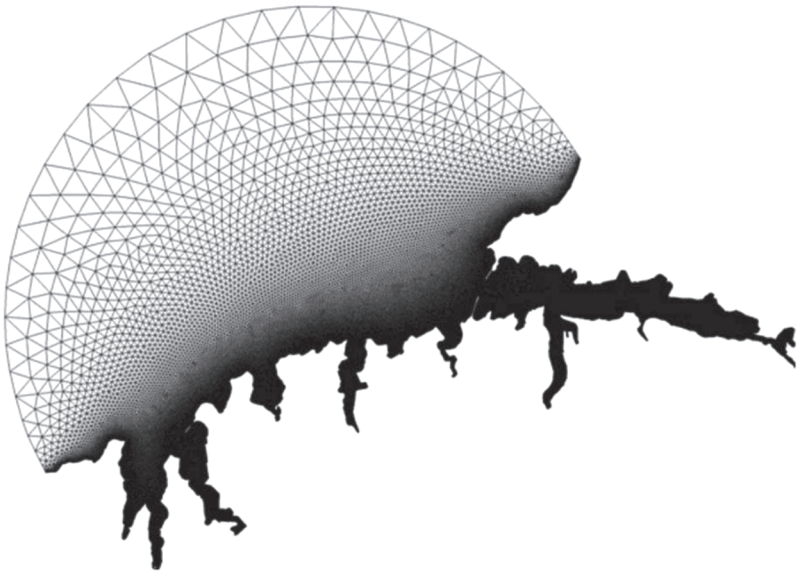

**Рис. 3.** Расчетная конечно-элементная сетка для системы Севастопольских бухт.

где $a_0 = 10$ см – амплитуда колебаний; $N$ – количество гармоник в ряде; $n$ – номер гармоники; $\omega_n = 2\pi/T_n$ – частота колебаний; $T_n$ – период колебаний. Период колебаний каждой гармоники ряда (2) определяется выражением $T_n = T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min})\delta_n$, где $T_{\min}$, $T_{\max}$ – минимальный и максимальный период колебаний, $\delta_n = (n-1)/(N-1)$. Количество гармоник – $N = (T_{\max} - T_{\min})/t_d + 1$ (в расчетах использовался шаг $t_d = 10$ с). На втором этапе граничное условие (2) заменялось условием свободного прохождения и моделировались свободные длинные волны. В качестве начальных условий задавались поля $U$, $V$ и $\eta$ для момента времени $t$, соответствующего окончанию первого этапа расчетов. Длительность второго этапа расчетов составляла 4 ч модельного времени. Длительность первого этапа расчетов, на котором проходила генерация волн, варьировала от 4 до 24 ч. Нижняя временна́я граница первого этапа выбиралась на основе данных наблюдений: в работе [2] установлено, что для интенсификации сейш в бух. Севастопольской необходимо воздействие не кратковременное, а продолжительное – порядка 4–5 ч.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчеты проведены при следующих длительностях воздействия внешнего возмущения: 4, 10, 15, 24 ч. С помощью спектрального анализа полей, полученных на втором этапе численных экспериментов, определены периоды сейшевых колебаний во всех основных бухтах Севастополя (рис. 1). В табл. 2, 3 представлены рассчитанные периоды мод резонансных колебаний для бухт, используемых для базирования, ремонта судов и перевалки грузов, для различной длительности этапа генерации волн. Энергия колебаний указанных мод ≥10% максимальной; периоды упорядочены по убыванию энергии колебаний ($T_1$ – период с максимальной энергией). Расположение контрольных точек показано на рис. 1.

Большинство севастопольских бухт имеет высокий $Q$-фактор, что способствует генерации в них интенсивных мод Гельмгольца. Для всех рассмотренных интервалов периодов и длительностей действия возмущений интенсивные моды Гельмгольца генерируются (табл. 2, 3) в следующих бухтах: Севастопольской (период 48.0 мин, $Q = 7.0$), Карантинной (11.4 мин, 7.9), Стрелецкой (15.0 мин, 5.2), Камышовой (период 21.8 мин, $Q = 6.8$). Мода Гельмгольца (период 8.9 мин, $Q = 1.9$) возбуждается также и в бух. Круглой, имеющей низкий $Q$-фактор, но только на среднечастотных ($\Delta T_2$) и высокочастотных ($\Delta T_3$) интервалах периодов возмущений.

Увеличение продолжительности действия возмущений в интервале периодов $\Delta T_3$ приводит к интенсификации высокочастотных мод с периодами 2.8–4.5 мин. Данные моды начинают преобладать над модами Гельмгольца. Для бух. Карантинной для этого достаточно длительности воздействия 15 ч. Для крупных бухт (Севастопольской, Камышовой, Казачьей и Стрелецкой) необходимо, чтобы длительность воздействия составляла 24 ч (табл. 2, 3). При этом в бух. Стрелецкой мода Гельмгольца (период 15.0 мин) остается достаточно интенсивной и уступает моде с периодом 3.9 мин только в вершине бухты (табл. 3).

**Таблица 2.** Периоды сейшевых колебаний в бух. Севастопольской в зависимости от длительности действия возмущения (ДДВ). $D_1 = 4$ ч, $D_2 = 10$ ч, $D_3 = 15$ ч, $D_4 = 24$ ч (интервал изменения периодов $\Delta T_1$ – 30–52 мин не показан, так как во всех рассмотренных точках бухты доминирует мода Гельмгольца бух. Севастопольской с периодом 48 мин. Энергия остальных мод ≤10% максимума)

| № точки | ДДВ | Интервалы периодов возмущений | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\Delta T_2$ – 8–30 мин | | | | $\Delta T_3$ – 1–15 мин | | | |
| | | периоды сейш | | | | периоды сейш | | | |
| | | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ | $T_4$ | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ | $T_4$ |
| 1 | $D_1$ | 48.0 | 21.8 | 17.1 | 10.9 | 17.1 | 48.0 | 11.4 | 24.0 |
| | $D_2$ | 48.0 | 17.1 | | | 48.0 | 17.1 | 24.0 | |
| | $D_3$ | 48.0 | 24.0 | 16.0 | | 48.0 | 17.1 | 24.0 | |
| | $D_4$ | 48.0 | 24.0 | | | 17.1 | 24.0 | 48.0 | |
| 5 | $D_1$ | 48.0 | 17.1 | | | 17.1 | 48.0 | | |
| | $D_2$ | 48.0 | 17.1 | | | 48.0 | 17.1 | | |
| | $D_3$ | 48.0 | 17.1 | | | 48.0 | 17.1 | 3.9 | |
| | $D_4$ | 48.0 | | | | 3.9 | 17.1 | 48.0 | |
| 6 | $D_1$ | 48.0 | 17.1 | 11.4 | | 17.1 | 48.0 | 11.4 | 3.1 |
| | $D_2$ | 48.0 | 17.1 | 11.4 | | 48.0 | 2.9 | 3.1 | |
| | $D_3$ | 48.0 | 10.0 | 4.3 | 11.4 | 48.0 | 17.1 | 2.9 | 3.8 |
| | $D_4$ | 48.0 | | | | 2.8 | 17.1 | 4.0 | 3.8 |
| 11 | $D_1$ | 48.0 | 21.8 | 17.1 | 11.4 | 48.0 | 11.4 | 16.0 | 6.2 |
| | $D_2$ | 48.0 | 11.4 | | | 48.0 | 3.1 | 11.4 | 2.9 |
| | $D_3$ | 48.0 | 24.0 | 11.4 | | 48.0 | 3.9 | 16.0 | 3.8 |
| | $D_4$ | 48.0 | | | | 3.9 | 17.1 | 2.9 | 48.0 |
| 15 | $D_1$ | 48.0 | 17.1 | 21.8 | 10.9 | 17.1 | 48.0 | 10.9 | 12.6 |
| | $D_2$ | 48.0 | 16.0 | 10.9 | | 48.0 | 2.9 | 17.1 | 10.9 |
| | $D_3$ | 48.0 | 24.0 | 10.0 | 11.4 | 48.0 | 16.0 | 2.9 | 24.0 |
| | $D_4$ | 48.0 | | | | 2.9 | 17.1 | 3.9 | 2.0 |
| 19 | $D_1$ | 48.0 | 17.1 | 12.6 | 21.8 | 16.0 | 12.6 | 48.0 | 10.9 |
| | $D_2$ | 48.0 | 17.1 | 4.4 | 3.9 | 2.9 | 3.1 | 48 | 4.4 |
| | $D_3$ | 48.0 | 10 | 3.9 | 4.3 | 3.9 | 2.9 | 48.0 | 16.0 |
| | $D_4$ | 48.0 | 10.0 | | | 3.9 | 2.9 | | |
| 20 | $D_1$ | 48.0 | 17.1 | 12.6 | 21.8 | 16.0 | 12.6 | 48.0 | 10.9 |
| | $D_2$ | 48.0 | 17.1 | 12.6 | 11.4 | 48.0 | 2.9 | 16.0 | 12.6 |
| | $D_3$ | 48.0 | 10 | 22.0 | 17.1 | 3.9 | 48.0 | 16 | 2.9 |
| | $D_4$ | 48.0 | 9.6 | | | 3.9 | 16.0 | 2.9 | |

На рис. 4 приведены энергетические спектры колебаний уровня моря в вершине бух. Карантинной. Видно, что воздействие возмущения длительностью 4 ч приводит к тому, что в вершине бухты доминируют моды с периодами 11.4–12.6 мин. При длительности действия возмущения 10 ч начинают появляться сейши с периодами 2.5–4.4 мин. При дальнейшем увеличении длительности действия возмущений до 15 ч картина сейшевых колебаний в бухте существенно меняется. Низкочастотные моды ослабевают, и начинает преобладать мода с периодом 4 мин (рис. 4в, табл. 3). Когда длительность действия возмущения равна 24 ч, колебание с периодом 4 мин преобладает во всей акватории бух. Карантинной (рис. 4в, табл. 3).

**Таблица 3.** Периоды сейшевых колебаний в наиболее крупных севастопольских бухтах в зависимости от длительности действия возмущения (ДДВ). $D_1 = 4$ ч, $D_2 = 10$ ч, $D_3 = 15$ ч, $D_4 = 24$ ч

| № точки | ДДВ | Интервалы периодов возмущений | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\Delta T_1$ – 30–52 мин | | | | $\Delta T_2$ – 8–30 мин | | | | $\Delta T_3$ – 1–15 мин | | | |
| | | периоды сейш | | | | периоды сейш | | | | периоды сейш | | | |
| | | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ | $T_4$ | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ | $T_4$ | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ | $T_4$ |
| бух. Карантинная | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | $D_1$ | 48.0 | | | | 11.4 | 16.0 | 12.6 | 48.0 | 12.6 | 11.4 | 16.0 | 6.2 |
| | $D_2$ | 48.0 | | | | 11.4 | 48.0 | 12.6 | 17.1 | 11.4 | 12.6 | 16.0 | 48.0 |
| | $D_3$ | 48.0 | | | | 10.9 | 48.0 | 10.0 | 6.2 | 4.0 | 16.0 | 48.0 | 10.9 |
| | $D_4$ | 48.0 | 12.6 | | | 48.0 | 10.9 | 10.0 | 8.6 | 4.0 | 16.0 | | |
| 22 | $D_1$ | 48.0 | 12.6 | 11.4 | | 11.4 | 12.6 | 16.0 | 48.0 | 11.4 | 12.6 | 16.0 | 6.2 |
| | $D_2$ | 48.0 | | | | 11.4 | 12.6 | 10.0 | 48.0 | 11.4 | 12.6 | 10.0 | 2.5 |
| | $D_3$ | 48.0 | | | | 10.9 | 10.0 | 48.0 | 8.9 | 16.0 | 10.9 | 4.0 | 10.0 |
| | $D_4$ | 48.0 | 12.6 | 10.9 | 10.0 | 48.0 | 10.0 | 10.9 | 8.9 | 4.0 | 16.0 | 2.9 | 4.7 |
| бух. Стрелецкая | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | $D_1$ | 48.0 | 16.0 | 14.1 | 12.6 | 16.0 | 12.6 | 48.0 | 4.4 | 15.0 | 12.6 | 4.4 | 6.9 |
| | $D_2$ | 48.0 | 15.0 | | | 16.0 | 12.6 | 48.0 | 4.4 | 15.0 | 4.4 | 2.9 | 3.6 |
| | $D_3$ | 48.0 | 15.0 | | | 14.1 | 7.5 | 17.1 | 4.4 | 15.0 | 4.4 | 3.6 | 3.3 |
| | $D_4$ | 48.0 | 14.1 | 21.8 | | 7.5 | 48.0 | 14.1 | 9.2 | 15.0 | 4.4 | 2.8 | 3.3 |
| 26 | $D_1$ | 48.0 | 12.6 | 16.0 | 14.1 | 16.0 | 12.6 | 48.0 | | 15.0 | 12.6 | 6.9 | |
| | $D_2$ | 48.0 | 15.0 | | | 16.0 | 12.6 | 48.0 | 4.4 | 15.0 | 12.6 | 4.4 | 2.9 |
| | $D_3$ | 48.0 | 14.1 | 12.6 | | 14.1 | 7.5 | 17.1 | 11.4 | 15.0 | 4.4 | 4.0 | 2.8 |
| | $D_4$ | 48.0 | 15.0 | 20.0 | | 48.0 | 15.0 | 7.1 | 21.8 | 15.0 | 3.9 | 4.4 | 2.8 |
| 29 | $D_1$ | 48.0 | 12.6 | 14.1 | | 16.0 | 12.6 | 11.4 | 4.4 | 12.6 | 15.0 | 4.4 | |
| | $D_2$ | 48.0 | 15.0 | | | 12.6 | 16.0 | 11.4 | 4.4 | 15.0 | 4.4 | 12.6 | 11.4 |
| | $D_3$ | 48.0 | 15.0 | 12.6 | | 14.1 | 11.4 | 4.4 | 7.5 | 15.0 | 4.4 | 4.0 | 3.6 |
| | $D_4$ | 15.0 | 48.0 | 12.6 | 20 | 7.5 | 15.0 | 48.0 | 8.9 | 3.9 | 15.0 | 4.4 | 2.8 |
| бух. Камышовая | | | | | | | | | | | | | |
| 34 | $D_1$ | 48.0 | 21.8 | | | 21.8 | 10.4 | 48.0 | 15.0 | 10.4 | 21.8 | 14.1 | 2.6 |
| | $D_2$ | 48.0 | 21.8 | | | 21.8 | 48.0 | 10.0 | 3.5 | 2.6 | 21.8 | 2.8 | 3.6 |
| | $D_3$ | 48.0 | 21.8 | | | 21.8 | 10.4 | 9.2 | 5.3 | 3.6 | 2.6 | 21.5 | 2.8 |
| | $D_4$ | 48.0 | 21.8 | 10.4 | | 21.8 | 10.4 | 48 | 13.3 | 2.8 | 2.6 | 3.6 | 3.9 |
| 37 | $D_1$ | 48.0 | 21.8 | | | 21.8 | 16.0 | 48.0 | | 21.8 | 16.0 | 3.6 | 7.1 |
| | $D_2$ | 48.0 | 21.8 | | | 21.8 | 48.0 | 16.0 | 3.5 | 21.8 | 3.5 | 2.6 | 1.7 |
| | $D_3$ | 48.0 | 21.8 | | | 21.8 | 3.6 | | | 3.6 | 21.8 | 4.2 | 16 |
| | $D_4$ | 21.8 | 48.0 | | | 21.8 | 48 | 9.2 | 7.5 | 3.6 | 4.2 | 3.9 | 16 |
| 39 | $D_1$ | 48.0 | 21.8 | 16.0 | 10.4 | 21.8 | 10.4 | 16.0 | 7.1 | 21.8 | 10.4 | 16.0 | 6.7 |
| | $D_2$ | 48.0 | 21.8 | | | 21.8 | 10.0 | 16.0 | 48.0 | 21.8 | 3.3 | 2.8 | 2.6 |
| | $D_3$ | 48.0 | 21.8 | 10.4 | | 21.8 | 9.2 | 5.5 | 14.1 | 21.8 | 3.6 | 10.4 | 16 |
| | $D_4$ | 21.8 | 48.0 | 10.4 | 14.1 | 21.8 | 10.4 | 9.2 | 48.0 | 10.4 | 3.6 | 16 | 4.2 |

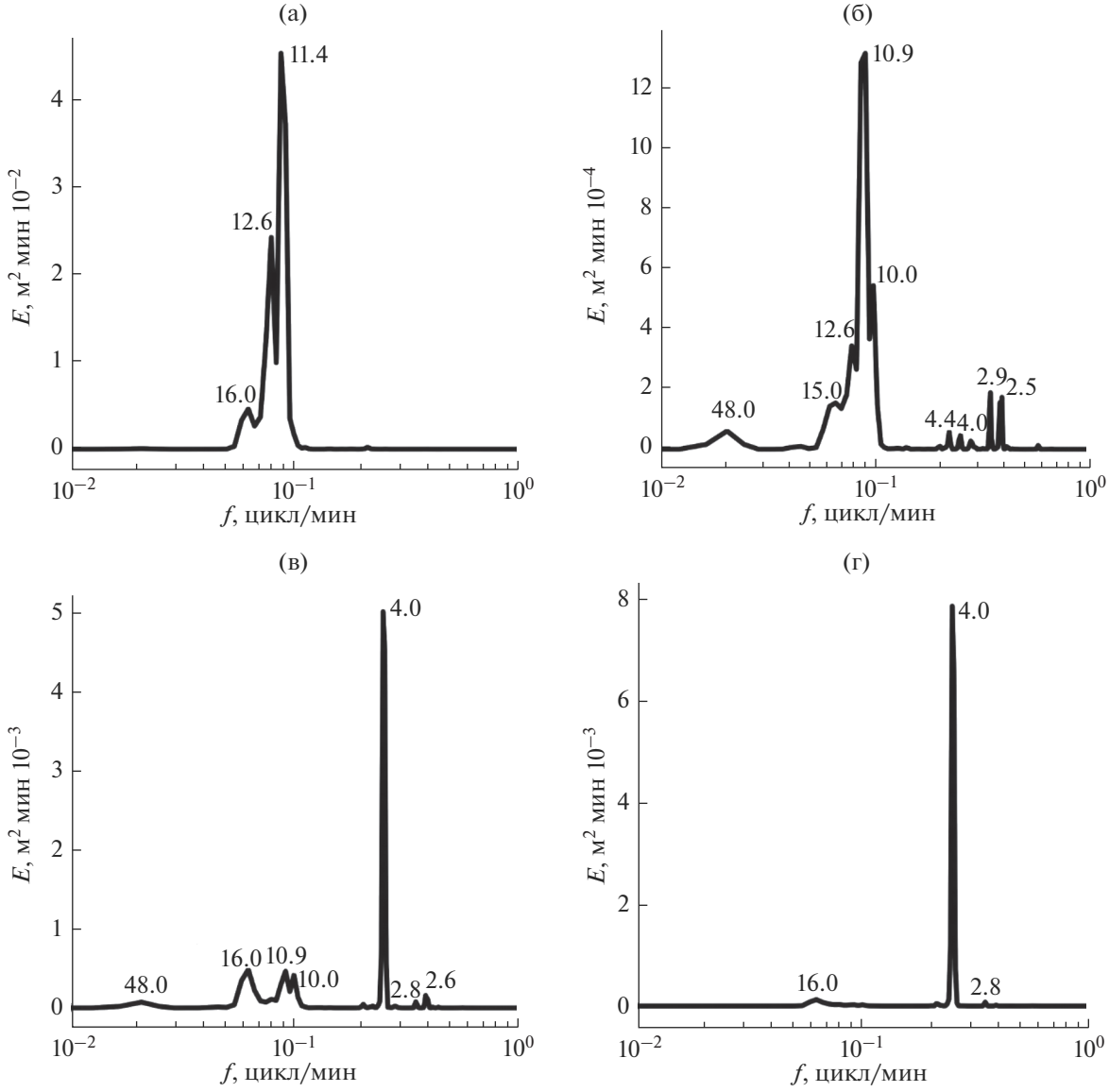


**Рис. 4.** Энергетические спектры сейшевых колебаний уровня, генерируемых в вершине бух. Карантинной (точка 23), в зависимости от длительности действия возмущений τ в интервале $\Delta T_3$: а – τ = 4 ч, б – τ = 10 ч, в – τ = 15 ч, г – τ = 24 ч. Показаны периоды (мин) для основных пиков.

В бух. Севастопольской при увеличении длительности действия возмущений в интервале периодов $\Delta T_3$ начинает генерироваться поперечная сейша с периодом 2.8 мин (табл. 1, 2; рис. 5), которая наиболее интенсивна в пунктах у боковых берегов бухты (6, 9, 18, 19). При длительности действия возмущений 24 ч энергия колебаний этой моды превышает энергию всех других мод в этих точках акватории бухты. Поперечные сейши представляют серьезную опасность для судов и береговой инфраструктуры, так как их узловые линии проходят перпендикулярно входу в бухту. Это затрудняет излучение энергии колебаний в открытое море через вход в бухту и при длительном действии возмущений способствует накоплению энергии колебаний. При продолжительности действия возмущений 24 ч в интервале $\Delta T_3$ по всей акватории проявляется также мода сейш с периодом 3.9 мин, доминирующая в точках 5, 11, 18, 19, 20 (табл. 2; рис. 5).

В бух. Камышовой в зоне грузовых причалов рыбного порта (точка 37) будет доминировать колебание с периодом 3.6 мин, когда длительность возмущения составляет 24 ч, а интервал периодов – $\Delta T_3$ (табл. 3). При этих же условиях для возмущений в вершине бух. Стрелецкой (точка 29) будет доминировать мода с периодом 3.9 мин (табл. 3).

Таким образом, увеличение длительности действия возмущений (до ≥15 ч) в интервале перио-

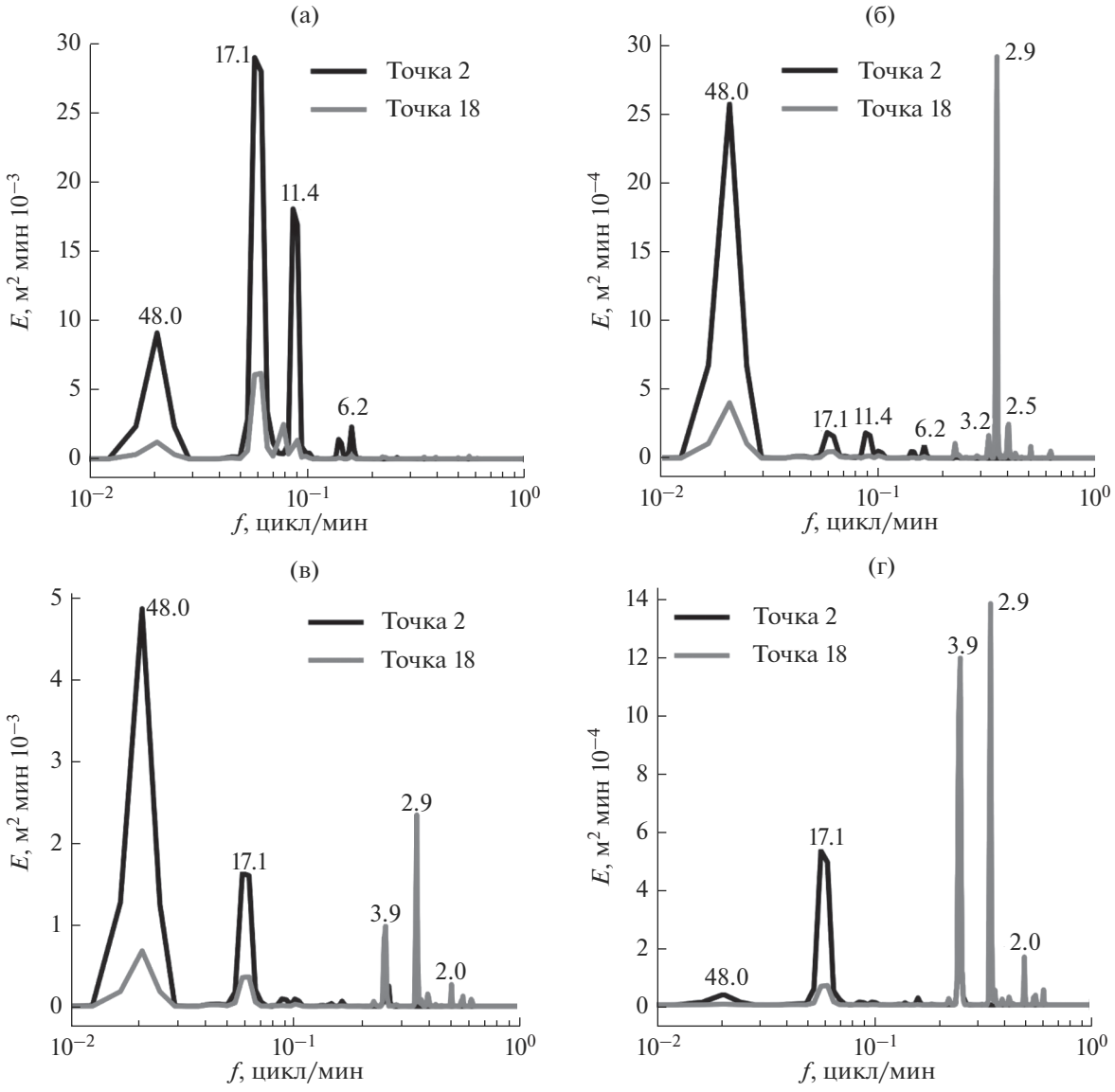


**Рис. 5.** Энергетические спектры сейшевых колебаний уровня, генерируемых в бух. Севастопольской (точки 2, 18), в зависимости от длительности действия возмущений τ в интервале $\Delta T_3$: а – τ = 4 ч, б – τ = 10 ч, в – τ =15 ч, г – τ = 24 ч. Показаны периоды (мин) для основных пиков.

дов $\Delta T_3$ приводит к генерации высокочастотных мод с периодами 2–4.5 мин, которые начинают доминировать над низкочастотными модами (в том числе модами Гельмгольца) во всей системе Севастопольских бухт, что может создать в них условия возникновения тягуна.

В табл. 4 приведены основные резонансные периоды севастопольских бухт, выделенные в результате анализа результатов расчетов. Данные периоды разделены на две группы: “собственные” (определяемые батиметрией и профилем береговой черты конкретной бухты) и “чужие” (проникающие из соседних бухт и прибрежной зоны).

Бухты системы обмениваются энергией колебаний через свои входы за счет проникновения собственных мод одной бухты в другую бухту и наоборот. Например, мода Гельмгольца бух. Севастопольской (период 48 мин) проявляется с высокой интенсивностью во всех бухтах системы, когда периоды возмущений – в интервале $\Delta T_1$–$\Delta T_2$ (табл. 3). При этом данная мода доминирует над всеми остальными модами резонансных колебаний во всех бухтах системы в интервале периодов $\Delta T_1$. Мода Гельмгольца Карантинной бухты (период 11.4 мин) проявляется в Севастопольской, Песочной и даже Казачьей бухтах. Бухты взаимодействуют не только на периодах мод Гельмгольца, но и на периодах более высокоча-

**Таблица 4.** Резонансные периоды севастопольских бухт (в бух. Севастопольской также выделяется собственная мода с периодом 12.6 мин)

| Бухта | Периоды резонансных колебаний | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | собственные периоды, мин | | | | | | “чужие” периоды, мин | | | | |
| | $T_0$ | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ | $T_4$ | $T_5$ | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ | $A_4$ | $A_5$ |
| Севастопольская | 48.0 | 22.0 | 16.0 | 10.0 | 6.2 | 2.9 | 11.4 | 17 | 4.0 | | |
| Карантинная | 11.4 | 4.0 | 2.5 | 1.8 | | | 48.0 | 16.0 | 10.0 | 12.6 | 6.2 |
| Стрелецкая | 15.0 | 4.4 | 2.8 | | | | 48.0 | 12.6 | 11.4 | 7.5 | 4.0 |
| Песочная | 3.6 | 2.1 | | | | | 48.0 | 16.0 | 12.6 | 11.4 | 4.4 |
| Круглая | 8.9 | 3.3 | 2.0 | | | | 48.0 | 16.0 | 12.6 | 11.4 | 4.4 |
| Камышовая | 21.8 | 7.0 | 3.6 | 2.8 | 1.7 | | 48.0 | 16.0 | 10.0 | 9.2 | 4.2 |

стотных мод. Например, собственные моды Севастопольской бухты с периодами 16.0, 12.6, 10.0, 6.2 мин проникают в Карантинную бухту (табл. 3), а собственная мода бух. Карантинной с периодом ~4 мин проникает в бух. Севастопольскую (табл. 2).

Анализ результатов расчетов в точках 49, 52, 54, 55, 56, находящихся за пределами бухт, показал, что в прибрежной зоне возникают шельфовые сейши с периодами 15–17 мин, которые проникают во все бухты системы. Данные колебания выделяются во всех рассмотренных интервалах периодов и длительностей действия возмущений. Аналогичное явление наблюдается на о. Шикотан (Малая Курильская гряда) в бухтах Димитрова и Церковной, где регистрируются проникающие в них шельфовые сейши с периодом ~15 мин [5]. В [10] приведены результаты опубликованных в 1908 г. исследований К. Хонды (K. Honda), Т. Терады (T. Terada) и др., которые провели анализ сейшевых колебаний в 65 бухтах на Японских островах. Ими установлено, что “в близлежащих бухтах и на участках открытого берега часто наблюдаются общие колебания”. Таким образом, наличие сейш с периодами, общими для прибрежной зоны и системы близко расположенных севастопольских бухт, – общая физическая закономерность, которая согласуется с результатами натурных наблюдений в других регионах.

## ВЫВОДЫ

Для всех рассмотренных интервалов периодов и длительностей действия возмущений в бухтах системы, имеющих высокий $Q$-фактор (>6.5): Севастопольской, Камышовой, Карантинной, Казачьей, – генерируются интенсивные моды Гельмгольца.

Волновые возмущения в интервале периодов 1–15 мин, воздействующие >15 ч, приводят к генерации интенсивных высокочастотных мод (периоды 2–4.5 мин) и доминированию их над низкочастотными модами в крупных бухтах системы (Севастопольской, Камышовой, Стрелецкой, Карантинной), в которых базируются корабли и проводится перевалка грузов. Это создает в указанных бухтах условия для возникновения тягуна.

Бухты системы взаимодействуют друг с другом путем обмена энергией через их входы. Это выражается в проникновении собственных мод отдельных бухт в соседние бухты. Наиболее заметное воздействие на бухты системы оказывает мода Гельмгольца бух. Севастопольской (период 48 мин), которая проявляется во всех севастопольских бухтах, когда периоды возмущений составляют 15–52 мин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Балинец Н.А., Хмара Т.В.* Явление тягуна в бухтах Севастополя // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное исследование ресурсов шельфа. 2006. № 14. С. 204–208.
2. *Горячкин Ю.Н., Иванов В.А., Репетин Л.Н., Хмара Т.Н.* Сейши в Севастопольской бухте // Тр. Украинского гидрометеорол. ин-та. 2002. Вып. 250. С. 342–353.
3. *Джумагалиев В.А., Рабинович А.Б., Файн И.В.* Теоретическая и экспериментальная оценка передаточных особенностей побережья Малокурильской бухты, о. Шикотан // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1994. Т. 30. № 5. С. 711–717.
4. *Иванов В.А., Манилюк Ю.В., Санников В.Ф.* Сейши в бассейне с открытым входом // Прикладная механика и техническая физика. 2018. Т. 59. № 4. С. 23–30. https://doi.org/10.15372/PMTF20180404
5. *Ковалев П.Д., Ковалев Д.П., Шишкин А.А.* Особенности режима волнения в бухтах и на побережье острова Шикотан Малой Курильской гряды // Геосистемы переходных зон. 2020. Т. 4. № 2. С. 250–258. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.250-258
6. *Манилюк Ю.В.* Сейши и тягун в Севастопольской бухте // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. Вып. 3. С. 4–12. https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-3-4-12

7. *Манилюк Ю.В., Санников В.Ф.* Исследование сейшевых колебаний в бухте переменной глубины // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. Вып. 2. С. 4–12. https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-2-4-12
8. *Морозов А.Н., Лемешко Е.М., Шутов С.А., Зима В.В.* Течения в Севастопольской бухте по данным ADCP-наблюдений (июнь 2008) // Морской гидрофиз. журн. 2012. № 3. С. 31–43.
9. *Морозов А.Н., Лемешко Е.М., Шутов С.А., Зима В.В., Чепыженко А.А.* Течения в Севастопольской бухте по данным ADCP наблюдений, ноябрь 2014 г. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное исследование ресурсов шельфа. 2014. Вып. 28. С. 25–30.
10. *Рабинович А.Б.* Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. 325 с.
11. *Рабинович А.Б., Монсеррат С., Файн И.В.* Численное моделирование экстремальных сейшевых колебаний в районе Балеарских островов // Океанология. 1999. Т. 39. № 1. С. 16–24.
12. *Чехов В.Н., Лушников В.Ф.* К оценкам сейш в бухтах Крыма методом конечных элементов // Динам. системы. 2015. Т. 5 (33). № 1–2. С. 93–102.
13. *Bellotti G.* Transient response of harbours to long waves under resonance conditions // Coastal Engenieering. 2007. V. 54. Iss. 9. P. 680–693. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2007.02.002
14. *Liu P. L.-F., Monserrat M., Macros M., Rabinovich A.B.* Coupling between two inlets Observation and modeling // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № C3. 3069. P. 14-1–14-10. https://doi.org/10.1029/2002JC001478
15. *Luettich R.A., Westerink J.J.* Formulation and Numerical Implementation of the 2D/3D ADCIRC. 2004. http://adcirc.org/adcirc_theory_2004_12_08.pdf
16. *Manilyuk Yu.V., Lazorenko D.I., Fomin V.V.* Investigation of Seiche Oscillations in the Adjacent Bays by the Example of the Sevastopol and the Quarantine Bays // Phys. oceanogr. 2020. V. 27. Iss. 3. P. 242–256. https://doi.org/10.22449/1573-160X-2020-3-242-256
17. *Manilyuk Yu.V., Lazorenko D.I., Fomin V.V.* Resonance Oscillations on the System of Adjacent Bays // Phys. Oceanogr. 2019. V. 26. Iss. 5. P. 374–386. https://doi.org/10.22449/1573-160X-2019-5-374-386
18. *Medvedev I.P.* Tides in the Black sea: observations and numerical modelling // Pure Appl. Geophys. 2018. V. 175. Iss. 6. P. 1951–1969. https://doi.org/10.1007/s00024-018-1878-x
19. *Nakano M., Fujimoto N.* Seiches in bays forming coupled system // J. Oceanogr. Society of Japan. 1987. V. 43. P. 124–134.
20. *Rabinovich A.B.* Seiches and Harbor Oscillations (Chapter 9) // Handbook of Coastal and Ocean Engineering / Ed. *Y.C. Kim*. Singapoure: World Sci. Publ., 2009. P. 193–236.

*ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, 2021, том 48, № 5, с. 537–546*

## ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

*УДК 532.546*

# ГЕОФИЛЬТРАЦИЯ В ОКРЕСТНОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СКВАЖИНЫ, ОБЛАДАЮЩЕЙ СКИН-ЭФФЕКТОМ

**© 2021 г. П. Е. Морозов***

*Институт механики и машиностроения ФИЦ "Казанский научный центр РАН", Казань, 420111 Россия*

**e-mail: morozov@imm.knc.ru*

Поступила в редакцию 22.01.2020 г.
После доработки 08.02.2021 г.
Принята к публикации 30.03.2021 г.

Рассмотрена фильтрация воды в окрестности вертикальной циркуляционной скважины. Представлены решения задач установившегося и неустановившегося притока к вертикальной циркуляционной скважине в анизотропном пласте с учетом влияния скин-эффекта и объемов нагнетательного и откачивающего интервалов. На основе схемы Мятиева–Гиринского получено аналитическое решение задачи установившегося течения воды в окрестности вертикальной циркуляционной скважины в пласте, состоящем из двух проницаемых горизонтальных пропластков, разделенных слабопроницаемым слоем.

*Ключевые слова:* вертикальная циркуляционная скважина, дипольное опробование, анизотропный пласт, скин-эффект, двухслойный пласт, схема Мятиева–Гиринского.

**DOI:** 10.31857/S032105962105014X

## ВВЕДЕНИЕ

Метод дипольного (дуплетного) опробования скважин – один из эффективных для определения вертикальной проницаемости анизотропных водоносных горизонтов [3, 20]. При дипольном опробовании опытная скважина оборудуется двумя фильтрами, изолированными друг от друга, например с помощью надувных пакеров. Через один фильтр (откачивающий интервал) проводится откачка воды с постоянным расходом, а через другой фильтр (нагнетательный интервал) – закачка с таким же расходом. В результате в окрестности скважины возникает вертикальное циркуляционное течение. По величине изменения напора (давления) в нагнетательном и откачивающем интервалах скважины определяется горизонтальная и вертикальная проницаемость пласта. В других методах интервальных испытаний пласта, используемых для определения анизотропии проницаемости, например при многоуровневых экспресс-откачках и вертикальном гидропрослушивании [2, 12, 14, 21, 24], замеры напора (давления) проводятся в активном и наблюдательном интервалах скважины.

В основе метода дипольного опробования скважин, предложенного в [20], – аналитическое решение задачи неустановившегося притока воды к вертикальной циркуляционной скважине в бесконечном по простиранию анизотропном пласте. Решение задачи получено методом суперпозиции решения Хантуша для откачивающей и нагнетательной несовершенных скважин в анизотропном пласте с перетеканием [8, 20, 23]. Аналогичное решение представлено в работе [34], полученное с использованием преобразования Лапласа и конечного косинус-преобразования Фурье. Аналитическая модель дипольного течения в бесконечном и полубесконечном анизотропных пластах предложена в [39]. В [15] предложен ассиметричный метод дипольного опробования на основе аналитического решения задачи притока к циркуляционной скважине с откачивающим и нагнетательным интервалами разной длины. В [33] предложена приближенная аналитическая модель, описывающая нелинейное течение в напорном анизотропном пласте с вертикальной циркуляционной скважиной.

Метод дипольного опробования в сочетании с индикаторными исследованиями профильно-анизотропных пластов рассмотрен в [3, 7, 31]. В экспериментальной схеме "вертикальный дуплет", предложенной в работе [3], используются либо две несовершенные скважины с фильтрами, расположенными один над другим, либо одна скважина, в которой создаются два изолированных друг от друга интервала с независимо задаваемы-

ми режимами откачки-нагнетания. Для интерпретации индикаторных экспериментов используется расчетное время перемещения индикаторного фронта вдоль главной (кратчайшей) линии тока, связывающей нагнетательный интервал скважины с откачивающим [3, 7].

Если откачивающий и нагнетательный интервалы скважины имеют равную длину и располагаются симметрично относительно центра напорного анизотропного пласта, то достаточно рассмотреть фильтрацию в верхней или нижней частях пласта с постоянным (нулевым) напором в центральной горизонтальной плоскости. В этом случае получаем эквивалентную задачу откачки из несовершенной скважины с постоянным дебитом в анизотропном пласте с плановыми границами I и II рода, решению которой посвящено большое число работ [4, 6, 8, 11, 13, 38]. Наиболее общее решение данной задачи с учетом равномерного распределения напора по длине фильтра, емкости скважины и скин-эффекта конечной толщины получено в работе [25].

В работах [19, 40] на практических примерах продемонстрировано, что оценки фильтрационных параметров неоднородных пластов, полученные методом дипольного опробования скважин и другими методами, в частности многоуровневыми экспресс-откачками, коррелируются между собой. С целью получения более достоверных оценок фильтрационных параметров в [19] использовано численное моделирование течения в многослойном пласте и нелинейный регрессионный анализ на основе замеров напоров как в циркуляционной скважине, так и в близлежащих пьезометрах.

В [36] на основе численного 2D-моделирования установившегося циркуляционного течения в окрестности вертикальной скважины в слоистом пласте исследовано влияние положения и проводимости слоев на оценку эквивалентной анизотропии пласта. Показано, что один из факторов, существенно искажающий оценку эквивалентной анизотропии, – скин-эффект. Более того, при наличии высокопроницаемой зоны вокруг скважины могут возникнуть утечки и часть потока будет перемещается из одного интервала в другой лишь в этой зоне [20, 26].

Вертикальные циркуляционные скважины нашли применение в методах внутрипластовой очистки загрязненных грунтовых вод [17, 27]. В этих методах вода с помощью насоса откачивается через один фильтр скважины и после очистки закачивается обратно в пласт через другой фильтр. Созданная таким образом вертикальная циркуляция в водоносном горизонте продолжается до тех пор, пока не будут достигнуты цели санации. Кроме этого, вертикальные циркуляционные скважины используются в геотермальных системах отопления и кондиционирования, где теплоносителем служит грунтовая вода [23, 28, 29, 33, 34].

В работе [17] на основе численного 3D-моделирования проведено исследование установившегося течения в окрестности одиночных циркуляционных скважин и рядных систем циркуляционных скважин в условиях взаимодействия с естественным потоком подземных вод. В [18] предложена аналитическая модель стационарного течения воды в системе двух циркуляционных скважин и исследовано влияние дебита и анизотропии проницаемости пласта на зону охвата и величину перетока воды между скважинами. Проблеме 3D-визуализации установившегося течения в окрестности вертикальной циркуляционной скважины при наличии естественного потока подземных вод посвящена работа [35].

В работе автора [22] получено аналитическое решение задачи неустановившегося и установившегося притока жидкости к горизонтальной циркуляционной скважине в анизотропном пласте постоянной мощности. В случае симметричного расположения откачивающего и нагнетательного интервалов относительно центра скважины предложена относительно простая формула для определения продуктивности горизонтальной циркуляционной скважины.

При аналитическом решении задач притока жидкости к несовершенным скважинам возникают определенные трудности, связанные с заданием нелокальных граничных условий или смешанных граничных условий на стенке скважины для учета равномерного распределения напора (давления) в интервале вскрытия [5, 9, 10, 37]. В работах [4, 5, 10, 25] решение таких задач сводится к системе интегральных уравнений для распределения притока в интервале вскрытия, которая затем решается численно.

В настоящей работе получено полуаналитическое решение задачи установившегося и неустановившегося притока воды к вертикальной циркуляционной скважине в анизотропном пласте с учетом скин-эффекта и влияния объемов нагнетательного и откачивающего интервалов. При предположении равномерности притока воды по длине интервалов дано приближенное аналитическое решение задачи. На основе схемы Мятиева–Гиринского получено аналитическое решение задачи установившегося течения воды в окрестности вертикальной циркуляционной скважины в двухслойном пласте со слабопроницаемым прослоем.

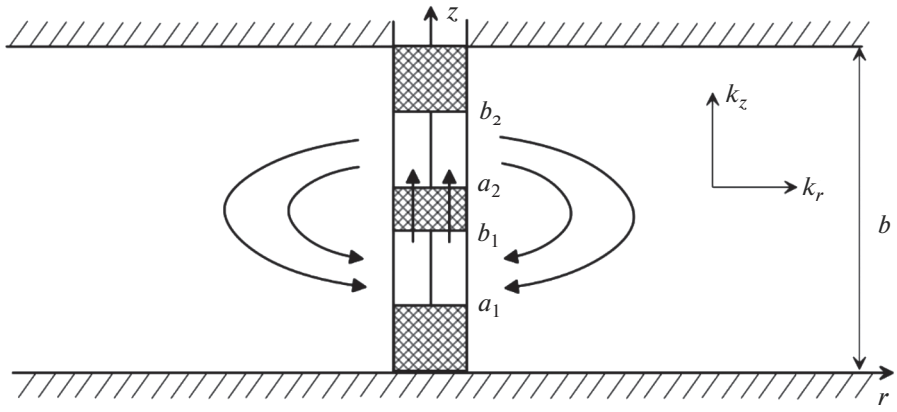


**Рис. 1.** Схема вертикальной циркуляционной скважины.

## ЦИРКУЛЯЦИОННАЯ СКВАЖИНА В АНИЗОТРОПНОМ ПЛАСТЕ

Рассматривается задача притока воды к вертикальной циркуляционной скважине в неограниченном по простиранию анизотропном пласте с непроницаемой кровлей и подошвой (рис. 1). Через нижний откачивающий интервал проводится отбор воды с постоянным дебитом $Q$, а через верхний нагнетательный интервал – нагнетание воды с постоянным расходом $-Q$. Полагается, что напор по длине интервалов распределен равномерно. Задача состоит в определении функции изменения напора $h(r,z,t)$ в области течения $r > r_w$, $0 \le z \le b$ и функций изменения уровня $s_i(t)$ в откачивающем и нагнетательном интервалах скважины при $t > 0$. В безразмерном виде изменение напора в окрестности вертикальной циркуляционной скважины описывается уравнением пьезопроводности:

$$\frac{1}{r_d}\frac{\partial}{\partial r_d}\left(r_d\frac{\partial h_d}{\partial r_d}\right)+\frac{1}{b_d^2}\frac{\partial^2 h_d}{\partial z_d^2}=\frac{\partial h_d}{\partial t_d} \tag{1}$$

с начальным

$$h_d(r_d,z_d,0)=0 \tag{2}$$

и граничными условиями

$$h_d(\infty,z_d,t_d)=0, \tag{3}$$

$$\left.\frac{\partial h_d}{\partial z_d}\right|_{z_d=0}=0,\quad \left.\frac{\partial h_d}{\partial z_d}\right|_{z_d=1}=0, \tag{4}$$

$$\left.\frac{\partial h_d}{\partial r_d}\right|_{r_d=1}=0,\quad 0\le z_d<\alpha_1,\quad \beta_1<z_d<\alpha_2,\quad \beta_2<z_d\le 1, \tag{5}$$

$$\int_{\alpha_i}^{\beta_i} q_d(\xi,t_d)\,d\xi=(-1)^{i+1}-C_{id}\frac{\partial h_{id}(t_d)}{\partial t_d},\quad i=1,2, \tag{6}$$

$$s_{id}(t_d)=h_d(1,z_d,t_d)+S_i q_d(z_d,t_d),\quad \alpha_i\le z_d\le\beta_i,\quad i=1,2, \tag{7}$$

где $h_d=\dfrac{2\pi k_r b h}{Q}$, $s_{id}=\dfrac{2\pi k_r b s_i}{Q}$, $t_d=\dfrac{k_r t}{\eta^* r_w^2}$, $r_d=\dfrac{r}{r_w}$, $z_d=\dfrac{z}{h}$, $b_d=\dfrac{b}{r_w}\sqrt{\dfrac{k_r}{k_z}}$, $C_{id}=\dfrac{C_i}{2\pi b\eta^* r_w^2}$, $\alpha_i=\dfrac{a_i}{h}$, $\beta_i=\dfrac{b_i}{h}$, $q(z_d,t_d)=-\left(r_d\dfrac{\partial h_d}{\partial r_d}\right)\Big|_{r_d=1}$,

$h$ – напор; $k_r$, $k_z$ – коэффициенты фильтрации в горизонтальном и вертикальном направлениях; $\eta^*$ – коэффициент упругоемкости породы; $b$ – мощность пласта; $r_w$ – радиус скважины; $C_i$ – коэффициент влияния объема $i$-го интервала; $S_i$ – скин-эффект $i$-го интервала (индекс $i = 1$ соответствует откачивающему интервалу, $i = 2$ – нагнетательному интервалу). Коэффициент влияния объема $i$-го интервала равен $C_i = V_i C_w \rho_w g$ ($V_i$ – объем интервала, $C_w$ – эффективная сжимаемость интервала (включает сжимаемость воды, сжимаемость испытательного оборудования), $\rho_w$ – плотность воды, g – ускорение свободного падения) [5, 12]. Скин-эффект $S_i$ характеризует дополнительное фильтрационное сопротивление в ближайшей к $i$-му интервалу зоне пласта [4, 5, 10]. При наличии вокруг $i$-го интервала кольцевой зоны с отличными фильтрационными свойствами скин-эффект – $S_i=\left[\left(k_r/k_{si}\right)-1\right]\ln\left(r_{si}/r_w\right)$, где $r_{si}$, $k_{si}$ – радиус и коэффициент фильтрации скин-зоны [12, 37].

Применяя к (1)–(7) преобразование Лапласа по времени и конечное косинус-преобразование Фурье по координате $z_d$ [4, 5, 10, 25, 37], для безразмерного напора в пласте получим выражение:

$$\overline{h}_d(r_d,z_d,u)=\sum_{j=1}^{2}\left[F(r_d,u)\int_{\alpha_j}^{\beta_j}\overline{q}_d(\xi,u)\,d\xi+\right.$$
$$\left.+\,2\sum_{m=1}^{\infty}F(r_d,\lambda_m)\cos(\pi m z_d)\int_{\alpha_j}^{\beta_j}\overline{q}_d(\xi,u)\cos(\pi m\xi)\,d\xi\right], \quad (8)$$

где $u$ – переменная преобразования Лапласа; $\lambda_m=u+\left(\frac{\pi m}{b_d}\right)^2$; $F(x,y)=\frac{K_0\left(x\sqrt{y}\right)}{\sqrt{y}K_1\left(\sqrt{y}\right)}$; $K_0(x)$ и $K_1(x)$ – модифицированные функции Бесселя второго рода нулевого и первого порядка соответственно.

Приток воды и напор в откачивающем и нагнетательном интервалах скважины определяются из решения системы интегральных уравнений:

$$\overline{s}_{id}=\sum_{j=1}^{2}\left[F(1,u)\int_{\alpha_j}^{\beta_j}\overline{q}_d(\xi,u)\,d\xi+\right.$$
$$\left.+\,2\sum_{m=1}^{\infty}F(1,\lambda_m)\cos(\pi m z_d)\int_{\alpha_j}^{\beta_j}\overline{q}_d(\xi,u)\cos(\pi m\xi)\,d\xi\right]+ \quad (9)$$
$$+\,S_i\overline{q}_d(z_d,u),\quad \alpha_i\le z_d\le\beta_i,\quad i=1,2,$$

$$\int_{\alpha_i}^{\beta_i}\overline{q}_d(\xi)\,d\xi=\frac{(-1)^{i+1}}{u}-C_{id}u\overline{s}_{id},\quad i=1,2. \quad (10)$$

Система интегральных уравнений (9)–(10) решается численно [4, 5]. Для этого нагнетательный и откачивающий интервалы скважины разбиваются на сегменты и полагается, что приток воды к каждому сегменту равномерный. В результате для определения изображений по Лапласу функций притока и изменения напора в интервалах скважины получаем систему линейных алгебраических уравнений с плотной матрицей. Для ее решения используется стабилизированный метод бисопряженных градиентов BiCGStab с предобусловливанием. Обратное преобразование Лапласа выполняется численно на основе алгоритма Стефеста [30].

Полагая в (9) и (10) $u\to 0$, что соответствует $t_d\to\infty$, после обратного преобразования Лапласа получим систему интегральных уравнений для определения функций притока и напора в интервалах при установившемся режиме течения:

$$s_{id}=2\sum_{j=1}^{2}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{K_0(\gamma_m)}{\gamma_m K_1(\gamma_m)}\cos(\pi m z_d)\times$$
$$\times\int_{\alpha_j}^{\beta_j}q_d(\xi)\cos(\pi m\xi)\,d\xi+S_i q_d(z_d),\quad \alpha_i\le z_d\le\beta_i, \quad (11)$$

$$\int_{\alpha_i}^{\beta_i}q_d(\xi)\,d\xi=(-1)^{i+1},\quad i=1,2, \quad (12)$$

где $\gamma_m=\frac{\pi m}{b_d}$. Аналогично из (8) с учетом (12) получим выражения для установившегося поля напора в пласте и компонент скорости фильтрации:

$$h_d(r_d,z_d)=2\sum_{j=1}^{2}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{K_0(r_d\gamma_m)}{\gamma_m K_1(\gamma_m)}\cos(\pi m z_d)\times$$
$$\times\int_{\alpha_j}^{\beta_j}q_d(\xi)\cos(\pi m\xi)\,d\xi, \quad (13)$$

$$w_r(r_d,z_d)=-\frac{Q}{\pi r_w b}\sum_{j=1}^{2}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{K_1(r_d\gamma_m)}{K_1(\gamma_m)}\cos(\pi m z_d)\times$$
$$\times\int_{\alpha_j}^{\beta_j}q_d(\xi)\cos(\pi m\xi)\,d\xi, \quad (14)$$

$$w_z(r_d,z_d)=-\frac{Qk_z}{b^2k_r}\sum_{j=1}^{2}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{mK_0(r_d\gamma_m)}{\gamma_m K_1(\gamma_m)}\sin(\pi m z_d)\times$$
$$\times\int_{\alpha_j}^{\beta_j}q_d(\xi)\cos(\pi m\xi)\,d\xi. \quad (15)$$

Допустим теперь, что распределение притоков по длине откачивающего и нагнетательного интервалов равномерное. Интегрируя (9) по $z_d$ с учетом (10), для средневзвешенных напоров в интервалах скважины получим выражения:

$$\overline{s}_{1d}=\frac{U_1I_2-U_2Y_1}{I_1I_2-Y_2Y_1},\quad \overline{s}_{2d}=\frac{U_2I_1-U_1Y_2}{I_1I_2-Y_2Y_1}, \quad (16)$$

где $I_i=1+C_{id}u^2\left(\overline{h}_{i,i}+\frac{S_i}{ul_i}\right)$; $Y_i=C_{id}u^2\overline{h}_{1,2}$; $U_i=(-1)^{i+1}\times$ $\times\left(\overline{h}_{i,i}-\overline{h}_{1,2}+\frac{S_i}{ul_i}\right)$; $l_i=\beta_i-\alpha_i$; $\overline{h}_{i,j}=\frac{F(1,u)}{u}+\frac{2}{u}\times$ $\times\sum_{m=1}^{\infty}\frac{F(1,\lambda_m)}{\pi^2m^2}\Psi_{i,m}\Psi_{j,m}$; $\Psi_{i,m}=\frac{\sin(\pi m\beta_i)-\sin(\pi m\alpha_i)}{l_i}$; $i,j=1,2$. Входящие в (16) выражения $\overline{h}_{i,i}$ определяют средневзвешенные напоры в интервалах без учета влияния их объема и скин-эффекта [4, 5], а $\overline{h}_{1,2}=\overline{h}_{2,1}$ – взаимовлияние откачивающего и нагнетательного интервалов скважины.

Сжимаемость воды, заключенной в откачивающем и нагнетательном интервалах скважины, оказывает влияние на изменение напора в интервалах лишь в малые периоды времени после пуска скважины в работу. Поэтому, полагая в (16) $C_1=C_2=0$, получим

$$\overline{s}_{id} = (-1)^{i+1}\left(\overline{h}_{i,i} - \overline{h}_{1,2} + \frac{S_i}{ul_i}\right), \quad i = 1,2. \qquad (17)$$

При установившемся режиме течения средневзвешенные напоры в откачивающем и нагнетательном интервалах скважины определяются выражениями

$$s_{id} = (-1)^{i+1}\left(S_{ip} - h_{1,2}\right), \quad i = 1,2, \qquad (18)$$

где $S_{ip} = h_{i,i} + \dfrac{S_i}{l_i}$, $h_{i,j} = 2\sum_{m=1}^{\infty} \dfrac{F(1,\gamma_m)}{\pi^2 m^2}\Psi_{i,m}\Psi_{j,m}$.

Величины $S_{ip}$ имеют простой физический смысл суммарного скин-эффекта для вертикальной скважины с двойным видом несовершенства – как по характеру, так и по степени вскрытия. Следует отметить, что если откачивающая и нагнетательная секции скважины имеют равную длину и симметрично расположены относительно центра пласта, то при отсутствии скин-эффекта ($S_1 = S_2 = 0$) получаем $s_{1d} = -s_{2d} = s_p$. Величина $s_p$ обратно пропорциональна фактору формы несовершенной скважины в безнапорном пласте, имеющим толщину $0.5b$ [4, 38].

При условии равномерного распределения притока воды по длине откачивающего и нагнетательного интервалов скважины выражения (13)–(15) принимают следующий вид:

$$h_d(r_d, z_d) = \frac{2}{\pi}\sum_{m=1}^{\infty} \frac{K_0(r_d\gamma_m)}{\gamma_m m K_1(\gamma_m)}\cos(\pi m z_d)\left(\Psi_{1,m} - \Psi_{2,m}\right), \qquad (19)$$

$$w_r(r_d, z_d) = -\frac{Q}{\pi^2 r_w b}\sum_{m=1}^{\infty} \frac{K_1(r_d\gamma_m)}{m K_1(\gamma_m)}\cos(\pi m z_d)\left(\Psi_{1,m} - \Psi_{2,m}\right), \qquad (20)$$

$$w_z(r_d, z_d) = -\frac{Qk_z}{\pi b^2 k_r}\sum_{m=1}^{\infty} \frac{K_0(r_d\gamma_m)}{\gamma_m K_1(\gamma_m)}\sin(\pi m z_d)\left(\Psi_{1,m} - \Psi_{2,m}\right). \qquad (21)$$

При равенстве длины интервалов скважины ($l_1 = l_2$) и отсутствии скин-эффекта ($S_1 = S_2 = 0$) выражения (17)–(21) совпадают с решением из работы [31]. Если дополнительно предположить, что скважина имеет бесконечно малый радиус, тогда $F(1,\gamma_m) \sim K_0(\gamma_m)$ и выражения (17), (18) сводятся к известному решению задачи для напорного пласта [20, 32].

На рис. 2 приведены графики изменения напора в откачивающем интервале скважины, полученные на основе полуаналитического решения (9)–(10) (сплошные линии) и приближенного аналитического решения (16) (пунктирные линии) при следующих исходных данных: $b = 10$ м,

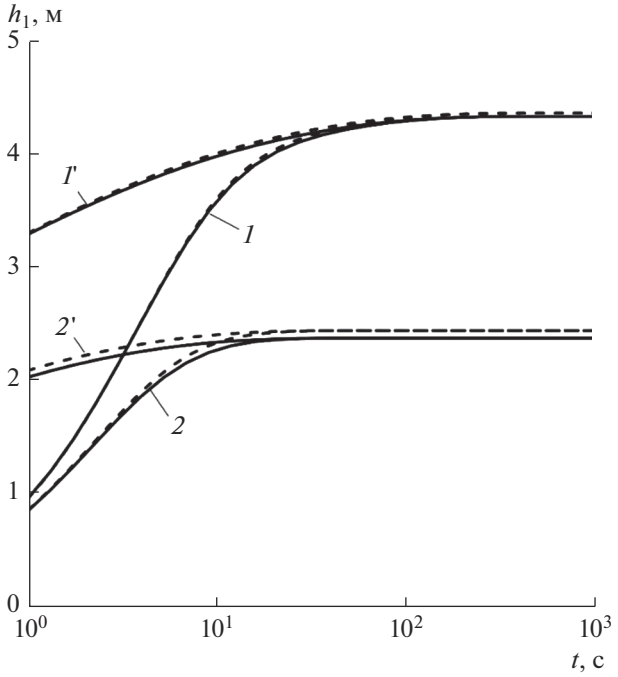


**Рис. 2.** Кривые изменения напора в откачивающем интервале скважины. Пласты: *1* – анизотропный ($k_z = 1 \times 10^{-6}$ м/с, $S_1 = S_2 = 1$); *2* – изотропный ($k_z = 1 \times 10^{-5}$ м/с, $S_1 = S_2 = 0$); *1'* – анизотропный ($C_1 = C_2 = 0$ м$^2$); *2'* – изотропный ($C_1 = C_2 = 0$ м$^2$).

$r_w = 0.1$ м, $a_1 = 2$ м, $b_1 = 4$ м, $a_2 = 8$ м, $b_2 = 10$ м, $Q = 10$ м$^3$/сут, $k_r = 1 \times 10^{-5}$ м/с, $\eta^* = 1 \times 10^{-4}$ 1/м, $C_1 = C_2 = 1 \times 10^{-4}$ м$^2$. Кривые *1'*, *2'* на рис. 2 получены без учета влияния объемов откачивающего и нагнетательного интервалов скважины, т.е. при $C_1 = C_2 = 0$ (пунктирная линия *2'* при $S_1 = S_2 = 0$ соответствует решению из работы [31]). Из рис. 2 видно, что анизотропия проницаемости пласта влияет на время выхода на стационарный режим.

Сплошными линиями на рис. 3 обозначено установившееся распределение притока воды по длине откачивающего и нагнетательного интервалов скважины, полученное на основе решения системы интегральных уравнений (11)–(12), а пунктирными линиями – равномерное распределение притока. Расчеты показали, что с увеличением скин-эффекта происходит выполаживание профиля притока.

На рис. 4 приведено сопоставление стационарных полей напоров в изотропном и анизотропном пластах, полученных на основе решения интегральных уравнений (11)–(13) (сплошные линии) и выражения (19) (пунктирные линии). Видно, что модели с равномерным распределением напора и равномерным распределением притока по длине интервалов приводят к практиче-

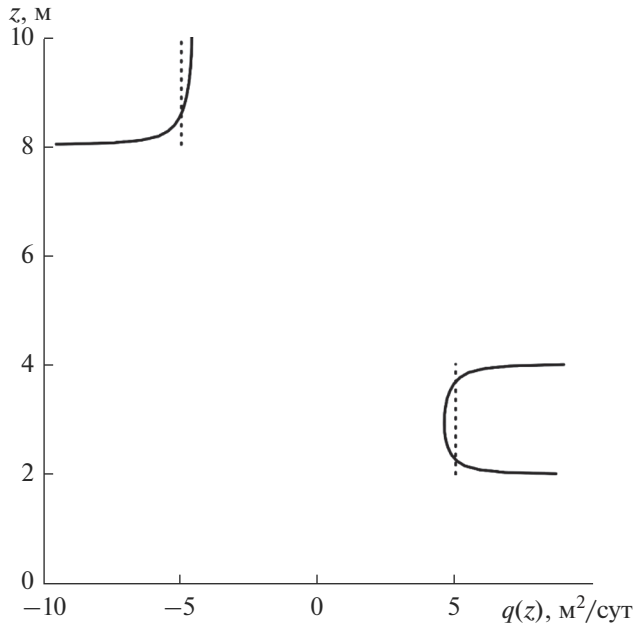


**Рис. 3.** Распределение притока воды по длине откачивающего и нагнетательного интервалов скважины.

ски идентичным картинам течения, за исключением ближайших к интервалам скважины зон пласта. Выражения (8), (13) и (19) могут быть использованы для определения понижения (повышения) напора в пьезометре или наблюдательной скважине, расположенной в окрестности вертикальной циркуляционной скважины.

## ВЕРТИКАЛЬНАЯ ЦИРКУЛЯЦИОННАЯ СКВАЖИНА В СЛОИСТОМ ПЛАСТЕ

Предположим, что откачивающий и нагнетательный интервалы скважины расположены в разных пропластках, разделенных слабо проницаемым прослоем (рис. 5). Примем схему Мятиева–Гиринского, согласно которой в хорошо проницаемых пропластках пренебрегается вертикальной составляющей скорости фильтрации и течение полагается горизонтальным, а в слабо проницаемом прослое пренебрегается горизонтальной составляющей скорости фильтрации и течение полагается перпендикулярным к направлению напластования [6]. Ограничимся рассмотрением установившегося притока воды к вертикальной циркуляционной скважине в слоистом пласте. Отметим лишь, что решение задачи неустановившегося притока к вертикальной циркуляционной скважине в слоистом пласте легко получается из решения задачи одновременной откачки из двух пластов, разделенных слабопроницаемым прослоем [1, 8, 16]. Для учета скин-эффекта и влияния объемов откачивающего и нагнетательного интервалов скважины можно воспользоваться методом суперпозиции и аналитическим решением задачи раздельной откачки из пропластка двухслойного пласта [14].

В безразмерном виде установившееся циркуляционное течение воды в слоистом пласте со слабопроницаемым прослоем описывается системой уравнений

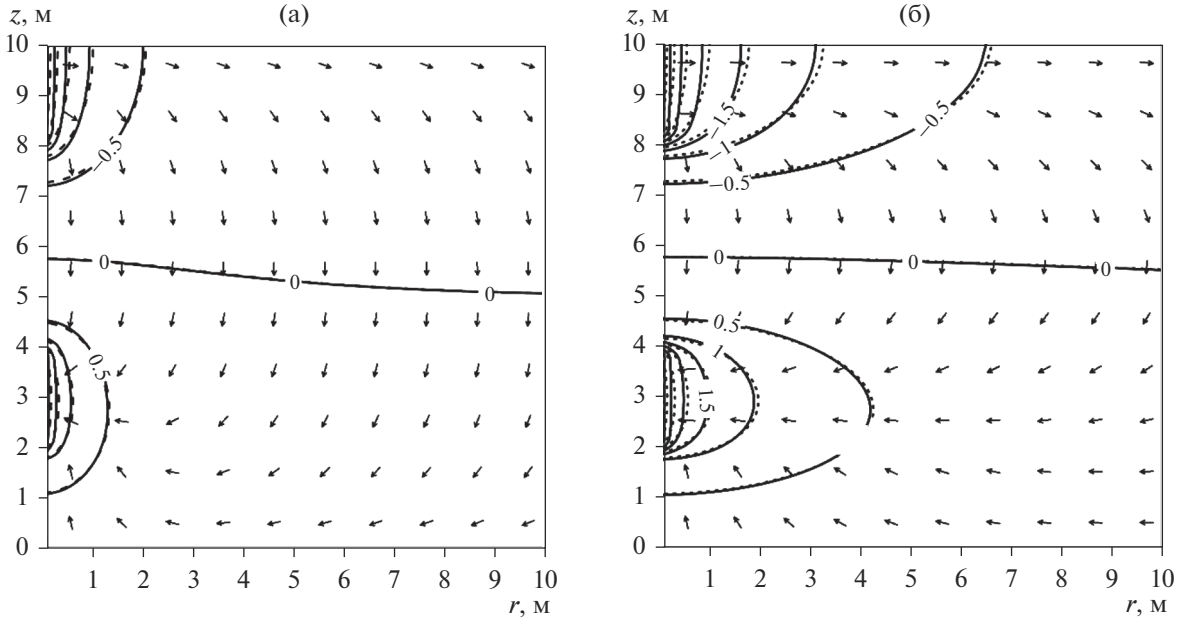


**Рис. 4.** Стационарное поле напоров в изотропном (а) и анизотропном (б) пластах ($k_r/k_z = 10$).

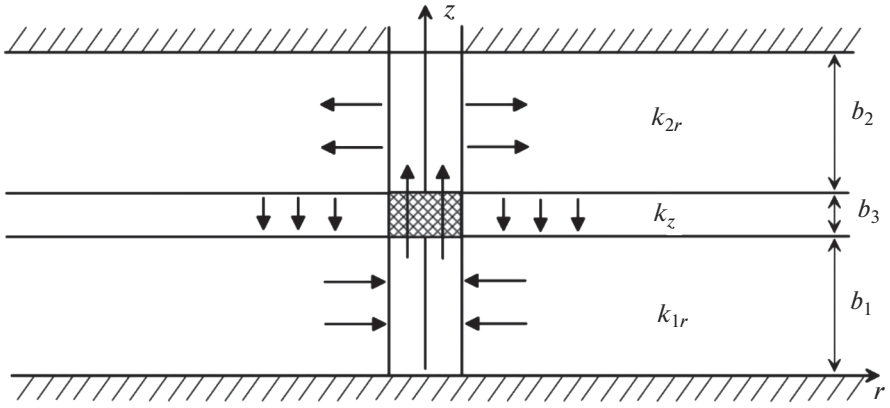


**Рис. 5.** Схема циркуляционного течения в слоистом пласте.

$$\frac{\chi}{r_d}\frac{d}{dr_d}\left(r_d\frac{dh_{1d}}{dr_d}\right)-\lambda\left(h_{1d}-h_{2d}\right)=0, \qquad (22)$$

$$\frac{(1-\chi)}{r_d}\frac{d}{dr_d}\left(r_d\frac{dh_{2d}}{dr_d}\right)-\lambda\left(h_{2d}-h_{1d}\right)=0 \qquad (23)$$

с граничными условиями

$$h_{1d}(\infty)=h_{2d}(\infty)=0, \qquad (24)$$

$$\chi\left.\frac{dh_{1d}}{dr_d}\right|_{r_d=1}=-1,\quad (1-\chi)\left.\frac{dh_{2d}}{dr_d}\right|_{r_d=1}=1, \qquad (25)$$

$$s_{id}=\left[h_{id}-S_i\frac{dh_{id}}{dr_d}\right]_{r_d=1},\quad i=1,2, \qquad (26)$$

где $h_{id}=\dfrac{2\pi\left(k_{1r}b_1+k_{2r}b_2\right)h_i}{Q}$, $s_{id}=\dfrac{2\pi\left(k_{1r}b_1+k_{2r}b_2\right)s_i}{Q}$,

$\lambda=\dfrac{r_w^2\omega}{k_{1r}b_1+k_{2r}b_2}$, $\chi=\dfrac{k_{1r}b_1}{k_{1r}b_1+k_{2r}b_2}$, $r_d=\dfrac{r}{r_w}$, $\omega=\dfrac{k_z}{b_3}$;
$h_i$ – напор в $i$-м пропластке; $s_i$ – напор в откачивающем ($i=1$) и нагнетательном ($i=2$) интервалах скважины; $S_i$ – скин-эффект $i$-го интервала.

Распределения напоров в пропластках определяются выражениями

$$h_{1d}(r_d)=\frac{K_0(\sqrt{\sigma}r_d)}{\chi\sqrt{\sigma}K_1(\sqrt{\sigma})},$$
$$h_{2d}(r_d)=\frac{K_0(\sqrt{\sigma}r_d)}{(\chi-1)\sqrt{\sigma}K_1(\sqrt{\sigma})}, \qquad (27)$$

где $\sigma=\dfrac{\lambda}{\chi(1-\chi)}$.

Напоры в соответственно откачивающем и нагнетательном интервалах скважины выражены так:

$$s_{1d}=\frac{1}{\chi}\left(\frac{K_0(\sqrt{\sigma})}{\sqrt{\sigma}K_1(\sqrt{\sigma})}+S_1\right),$$
$$s_{2d}=\frac{1}{\chi-1}\left(\frac{K_0(\sqrt{\sigma})}{\sqrt{\sigma}K_1(\sqrt{\sigma})}+S_2\right). \qquad (28)$$

Следует отметить, что в частном случае при $b_1=b_2$, $k_{1r}=k_{2r}$ и $S_1=S_2=0$ выражения (28) совпадают с решением задачи из работы [29].

При условии малости $\sigma$ выражения (28) упрощаются:

$$s_{1d}=\frac{1}{\chi}\left(\ln\frac{2}{\sqrt{\sigma}}-\gamma+S_1\right),$$
$$s_{2d}=\frac{1}{\chi-1}\left(\ln\frac{2}{\sqrt{\sigma}}-\gamma+S_2\right), \qquad (29)$$

где $\gamma\sim0.5772$ – постоянная Эйлера.

Далее проводится исследование влияния проницаемости прослоя на распределение напора в пропластках двухслойного пласта со следующими параметрами: $b_1=b_2=2$ м, $b_3=4$ м, $r_w=0.1$ м, $Q=10$ м$^3$/сут, $k_{1r}=k_{2r}=1\times10^{-5}$ м/с, $S_1=S_2=0$. Из рис. 6 видно, что при уменьшении проницаемости прослоя увеличивается область циркуляционного течения. Аналогичным образом на область циркуляционного течения в однородном пласте влияет вертикальная проницаемость (рис. 4).

Предположим, что нагнетательный и откачивающий интервалы скважины примыкают к кровле и подошве анизотропного пласта и имеют равную длину. Тогда, полагая в (29) $b_1=b_2=l$ и $k_{1r}=k_{2r}=k_r$, получим следующие приближенные формулы для определения напора в откачивающем и нагнетательном интервалах скважины:

$$s_i=(-1)^{i+1}\frac{Q}{2\pi k_r l}\ln\left(\frac{a\sqrt{2l(L-l)}}{e^{\gamma-S_i}r_w}\right),\quad i=1,2, \qquad (30)$$

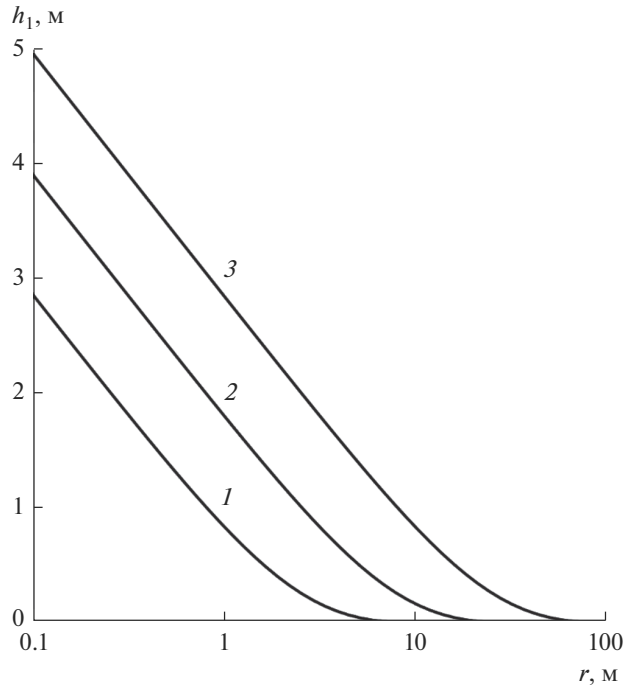


**Рис. 6.** Влияние вертикальной проницаемости на распределение напора в первом пропластке (*1* – $k_z = 10^{-5}$ м/с, *2* – $10^{-6}$ м/с, *3* – $10^{-7}$ м/с).

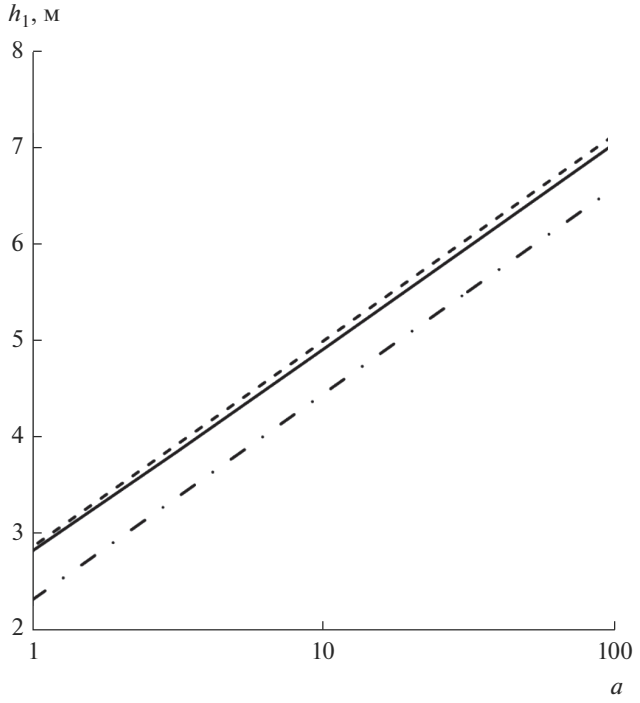


**Рис. 7.** Влияние параметра анизотропии $a = \sqrt{k_r/k_z}$ на напор в откачивающем интервале скважины.

где $l$ – длина интервалов; $L$ – расстояние между центрами интервалов; $a^2 = \dfrac{k_r}{k_z}$ – параметр анизотропии. Из формул (18) и (30) следует, что для симметрично расположенных нагнетательного и откачивающего интервалов циркуляционной скважины $s_1 + s_2 = \dfrac{Q}{2\pi k_r l}(S_1 - S_2)$.

На рис. 7 показана зависимость напора в откачивающем интервале скважины от параметра анизотропии, рассчитанная по выражению (18), – сплошной линией, а по формуле (30) – пунктирной линией. Для сравнения на рис. 7 штрихпунктирной линией показана аналогичная зависимость, полученная на основе приближенной формулы для дипольного течения в бесконечном анизотропном пласте [8, 39]:

$$s_i = (-1)^{i+1}\frac{Q}{2\pi k_r l}\ln\left(\frac{2al\Phi(\mu)}{e^{1-S_i}r_w}\right), \quad i = 1,2, \qquad (31)$$

где $\Phi(\mu) = \left(\dfrac{\mu^2}{\mu^2-1}\right)^{\frac{\mu}{2}}\left(\dfrac{\mu-1}{\mu+1}\right)^{\frac{1}{2}}$, $\mu = \dfrac{L}{l}$. Отметим, что для учета скин-эффекта радиус скважины в (31) был заменен на эффективный радиус $r_{ef} = r_w e^{-S_i}$.

Из формул (30) и (31) следует, что при установившемся течении напоры в интервалах циркуляционной скважины линейно зависят от скин-эффекта и логарифма параметра анизотропии. Таким образом, обработка данных дипольного опробования скважин на стационарных режимах без априорной информации о скин-эффекте может привести к неверным оценкам анизотропии проницаемости [36]. Время выхода циркуляционной скважины на стационарный режим работы в большей степени зависит от анизотропии проницаемости, упругой емкости пласта и его толщины [20], чем от скин-эффекта. Поэтому для более достоверной оценки анизотропии проницаемости пласта следует использовать кривые изменения напора в интервалах циркуляционной скважины, включая переходные режимы в начальные моменты времени при пуске или остановке скважины [20].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены полуаналитическое и приближенное аналитическое решения задачи неустановившегося притока воды к вертикальной циркуляционной скважине в анизотропном пласте с учетом скин-эффекта и влияния объемов откачивающего и нагнетательного интервалов скважины. Исследованы установившееся поле напоров в окрестности вертикальной циркуляционной скважины и распределение притока воды по длине откачивающего и нагнетательного интервалов. На основе схемы Мятиева–Гиринского получено решение

задачи установившегося течения воды в окрестности вертикальной циркуляционной скважины в двухслойном пласте, разделенном слабо проницаемым прослоем. Показано, что для частных случаев полученные результаты совпадают с известными решениями. Установлена линейная зависимость напоров в откачивающем и нагнетательном интервалах скважины от скин-эффекта и логарифма параметра анизотропии при установившемся режиме течения.

Предложенные в работе аналитические решения могут быть использованы для моделирования течения воды в окрестности вертикальной циркуляционной скважины и для определения фильтрационных параметров водоносного горизонта методом дипольного опробования скважин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Бабушкин В.Д., Плотников И.И., Чуйко В.М.* Методы изучения фильтрационных свойств неоднородных пород. М.: Недра, 1974. 208 с.
2. *Зейбек М.* Применение интервальных испытаний пласта и вертикального гидропрослушивания для построения и уточнения моделей различных типов коллекторов // Российская нефтегазовая техническая конференция SPE. М., 2019. С. 1–14. (SPE-196838-RU)
3. *Мироненко В.А., Румынин В.Г.* Опытно-миграционные работы в водоносных пластах. М.: Недра, 1986. 240 с.
4. *Морозов П.Е.* Оценка анизотропии проницаемости и скин-эффекта по данным экспресс-откачек из несовершенных скважин // Вод. ресурсы. 2020. Т. 47. № 3. С. 272–280.
5. *Морозов П.Е.* Полуаналитическое решение задачи нестационарного притока жидкости к несовершенной скважине // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2017. Т. 159. Кн. 3. С. 340–353.
6. *Полубаринова-Кочина П.Я.* Теория движения грунтовых вод. М.: Гос. изд-во технико-теоретич. лит., 1952. 676 с.
7. *Румынин В.Г., Атрощенко Ф.Г.* Экспериментальные и расчетные модели для оценки параметра скорости вертикальной миграции растворов в профильно-анизотропных пластах // Методы и практика математического моделирования. Белгород, 1982. С. 48–53.
8. *Синдаловский Л.Н.* Справочник аналитических решений для интерпретации опытно-фильтрационных опробований. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2006. 769 с.
9. *Чарный И.А.* Подземная гидрогазодинамика. М.: Гостоптехиздат, 1963. 396 с.
10. *Chang C.C., Chen C.S.* An integral transform approach for a mixed boundary problem involving a flowing partially penetrating well with infinitesimal well skin // Water Resour. Res. 2002. V. 38. № 6. P. 1071–1077.
11. *Boulton N.S., Streltsova T.D.* The drawdown near an abstraction well of large diameter under non-steady conditions in an unconfined aquifer // J. Hydrol. 1976. V. 30. № 1/2. P. 29–46.
12. *Butler J.J.Jr.* The design, performance, and analysis of slug tests. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2019. 281 p.
13. *Dejam M., Hassanzadeh H., Chen Z.* Semi-analytical solutions for a partially penetrated well with wellbore storage and skin effects in a double-porosity system with a gas cap // Transp. Porous. Med. 2013. V. 100. P. 159–192.
14. *Ehlig-Economides C., Ayoub J.A.* Vertical interference testing across a low-permeability zone // SPE Form. Eval. 1986. V. 1. № 5. P. 497–510.
15. *Halihan T., Zlotnik V.* Asymmetric dipole-flow test in a fractured carbonate aquifer // Ground Water. 2002. V. 40. № 5. P. 491–499.
16. *Hantush M.*S. Flow to wells in aquifers separated by a semipervious layer // J. Geoph. Res. 1967. V. 72. № 6. P. 1709–1720.
17. *Herrling B., Stamm J.* Numerical results of calculated 3D vertical circulation flows around wells with two screen sections for in situ aquifer remediation // Computational methods in water resources IX. V. 1 / Ed. *T.F. Russell*. London, 1992. P. 483–492.
18. *Huang J., Goltz M.M.* A three-dimensional analytical model to simulate groundwater flow during operation of recirculating wells // J. Hydrol. 2005. V. 314. № 1–4. P. 67–77.
19. *Hvilshøj S., Jensen K.H., Madsen B.* Single-well dipole flow tests: parameter estimation and field testing // Ground Water. 2000. V. 38. № 1. P. 53–62.
20. *Kabala Z.J.* The dipole flow test: a new single-borehole test for aquifer characterization // Water Resour. Res. 1993. V. 29. № 1. P. 99–107.
21. *Kuchuk F., Hollaender F., Onur M.* Pressure transient formation and well testing: convolution, deconvolution and nonlinear estimation. V. 57. Developments in petroleum science. Amsterdam: Elsevier, 2010. 389 p.
22. *Morozov P.E.* Simulation of the circulating flow in the vicinity of a horizontal well // Physical and mathematical modeling of earth and environment processes (2018). Springer proceedings in earth and environmental sciences. Cham: Springer, 2019. P. 368–373.
23. *Ni L., Li H., Jiang Y., Yao Y., Ma Z.* A model of groundwater seepage and heat transfer for single-well ground source heat pump systems // Appl. Thermal Eng. 2011. V. 31. № 14–15. P. 2622–2630.
24. *Paradis D., Lefebvre R.* Single-well interference slug tests to assess the vertical hydraulic conductivity of unconsolidated aquifers // J. Hydrol. 2013. V. 478. P. 102–118.
25. *Perina T.* General well function for soil vapor extraction // Adv. Water Resour. 2014. V. 66. P. 1–7.
26. *Peursem D.V., Zlotnik V., Ledder G.* Groundwater flow near vertical recirculatory wells: effect of skin on flow geometry and travel times with implications for aquifer remediation // J. Hydrol. 1999. V. 222. № 1–4. P. 109–122.
27. *Philip R.D., Walter G.R.* Prediction of flow and hydraulic head for vertical circulation wells // Ground Water. 1992. V. 30. № 5. P. 765–773.
28. *Rode A., Liesch T., Goldscheider N.* Open-loop geothermal heating by combined extraction–injection one-well systems: A feasibility study // Geothermics. 2015. V. 56. P. 110–118.

29. *Sørensen S., Reffstrup J.* Prediction of long-term operational conditions for single-well groundwater heat pump plants // Proc. 27th Intersociety Energy Conversion Engineering Conf. San Diego, CA, USA, 1992. P. 1–6.

30. *Stehfest H.* Numerical inversion of Laplace transform // Commun. ACM. 1970. V. 13. P. 47–49.

31. *Sutton D.J., Kabala Z.J., Schaad D.E., Ruud N.C.* The dipole-flow test with a tracer: a new single-borehole tracer test for aquifer characterization // J. Contam. Hydrol. 2000. V. 44. № 1. P. 71–101.

32. *Tu K., Wu Q., Simunek J., Chen C., Zhu Ke., Zeng Y., Xu S., Wang Y.* An analytical solution of groundwater flow in a confined aquifer with a single-well circulation system // Water Resour. Res. 2020. V. 56. № 7. P. 1–14.

33. *Tu K., Wu Q., Simunek J., Zhu Ke., Chen C., Zheng W., Zeng Y., Xu S.* An approximate analytical solution for non-Darcian flow in a confined aquifer with a single well circulation groundwater heat pump system // Adv. Water Resour. 2020. V. 145. P. 1–10. (103740)

34. *Tu K., Wu Q., Sun H.* A mathematical model and thermal performance analysis of single-well circulation (SWC) coupled ground source heat pump (GSHP) systems // Appl. Thermal Eng. 2019. V. 147. P. 473–481.

35. *Xia Q., Zhang Q., Xu M., Tang Y., Teng H.* Visualizing hydraulic zones of a vertical circulation well in presence of ambient flow // Desal. Water Treatm. 2019. V. 159. P. 151–160.

36. *Xiang J., Kabala Z.J.* Performance of the steady-state dipole flow test in layered aquifers // Hydrol. Processes. 1997. V. 11. № 12. P. 1595–1605.

37. *Yeh H.-D., Chang Y.-Ch.* Recent advances in modeling of well hydraulics // Adv. Water Resour. 2013. V. 51. P. 27–651.

38. *Zlotnik V., Goss D., Duffield M.* General steady-state shape factor for a partially penetrating well // Ground Water. 2010. V. 48. № 1. P. 111–116.

39. *Zlotnik V., Ledder G.* Theory of dipole flow in uniform anisotropic aquifers // Water Resour. Res. 1996. V. 32. № 4. P. 1119–1128.

40. *Zlotnik V.A., Zurbuchen B.R.* Field study of hydraulic conductivity in a heterogeneous aquifer: comparison of single-borehole measurements using different instruments // Water Resour. Res. 2003. V. 39. № 4. P. 1101–1112.

*ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, 2021, том 48, № 5, с. 547–555*

## ГИДРОХИМИЯ, ГИДРОБИОЛОГИЯ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

*УДК 504.064.36:574*

# ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОД КРУПНОЙ РЕЧНОЙ СИСТЕМЫ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА РОССИИ ПО МАКРОЗООБЕНТОСУ[1]

**© 2021 г. И. А. Барышев***

*Институт биологии КарНЦ РАН ФИЦ КарНЦ РАН, Петрозаводск, 185910 Россия*

**e-mail: i_baryshev@mail.ru*

Поступила в редакцию 07.12.2020 г.
После доработки 07.12.2020 г.
Принята к публикации 30.03.2021 г.

Представлены результаты оценки экологического качества вод по макрозообентосу р. Шуи – одного из крупнейших притоков Онежского озера, определяющего состав воды в водозаборе г. Петрозаводска – столицы Республики Карелии. Использованы широко распространенные в мировой практике индексы качеств вод: FBI, EBI, BMWP, ASPT, BBI, IBGN, GW, EPT a IM, а также интегральный индекс ИБС. При средней оценке “хорошо” значения индексов существенно зависели от характеристик станции. Сборы с плесовых участков с мягкими грунтами показали заниженные значения индексов качества вод. “Посредственное” и “хорошее” отмечено для малых притоков и “отличное” – для порогов в нижнем течении крупных рек. Рекомендовано оценивать качество вод раздельно для плесовых участков, малых притоков и порогов в главном русле; по полученным значениям индексов сравнивать только аналогичные биотопы. Установлено, что в целом экосистема реки находится в стабильном состоянии, сопоставимом с отмеченным в 1980-х гг., несмотря на увеличение антропогенной нагрузки.

*Ключевые слова:* биоиндикация, донные беспозвоночные, загрязнение, FBI, EBI, BMWP, ASPT, BBI, IBGN, EPT.

**DOI:** 10.31857/S0321059621050059

## ВВЕДЕНИЕ

Под термином “экологическое качество воды” понимают структуру и функционирование сообществ гидробионтов, которые выражают состояние водных объектов [23]. Загрязнение поверхностных вод становится все более актуальной угрозой для окружающей среды во всем мире. Сейчас 14% европейских водоемов и водотоков испытывают серьезные экологические проблемы [42]. Оценка состояния рек и озер на основе свойств и изменений резидентной биоты – неотъемлемая часть мониторинга поверхностных вод и оценки их качества, поскольку структура сообществ водных организмов выражает условия своего формирования – совокупное воздействие факторов среды [20, 23, 45, 49]. Макрозообентос широко используется в биоиндикации текучих вод, так как он один из основных компонентов речной биоты и наиболее стабилен в течение года [9, 43, 44, 48]. К настоящему времени разработано и используется большое количество метрик и индексов, позволяющих оценить экологическое качество воды по донным беспозвоночным [9, 23, 41].

Качество вод рек и озер Российской Федерации в целом относительно стабильно, однако состояние целого ряда водных объектов крайне неблагополучно. Кроме того, наблюдающиеся изменения климата усугубляются отрицательным влиянием хозяйственной деятельности человека на водные экосистемы [15]. Республика Карелия, находящаяся в юго-восточной части Фенноскандии, выделяется на фоне других регионов европейской России большим числом рек и озер, прохладным влажным климатом и низкой плотностью населения. В целом водные объекты этой территории слабо вовлечены в хозяйственную деятельность и отличаются экологическим благополучием [15]. Однако стремительно развивается товарное рыбоводство, в большинстве малых населенных пунктов очистка хозяйственно-бытовых стоков не проводится [11]. Наибольшее опасения вызывает состояние рек в южной части республики, где плотность населения выше и сосредоточены основные сельскохозяйственные производства. Так, на районы на территории водосбора р. Шуи приходится 13% продукции сель-

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке из средств федерального бюджета в рамках государственного задания КарНЦ РАН (0218-2019-0081).

ского хозяйства Республики Карелии [31]. В о. Сямозеро, крупнейшем водоеме на водосборе, выращивается товарная форель, что оказывает значительное влияние не только на экосистему озера, но и на р. Сяпсю – один из основных притоков Шуи [17, 25]. Нижнее течение р. Шуи принимает стоки поселков и дачных кооперативов, расположенных по берегам. В воде периодически отмечается повышенное содержание (до 0.57 мг/л) общего фосфора $P_{общ}$ [13]. Всего водами Шуи выносится 100 т $P_{общ}$ в год, что составляет 23% всего фосфора, поступающего в Онежское озеро с речным стоком [46]. Антропогенная составляющая стока $P_{общ}$ р. Шуи оценивается в 38% [19]. Поскольку р. Шуя, один из крупнейших водотоков Республики Карелии, во многом определяет качество воды в зоне водозабора г. Петрозаводска в Онежском озере, контроль ее состояния особенно важен.

Исследования донных сообществ р. Шуи ранее проводили неоднократно. Изучены видовой состав и количественные характеристики макрозообентоса, оценено влияние мелиоративных работ на экосистему реки [6, 24, 28, 30]. В 1980-х гг. была проведена оценка качества вод р. Шуи по биотическим показателям, что позволяет проследить долговременную динамику экологического состояния реки [18]. Цель настоящей работы – оценка современными методами экологического качества вод речной системы (р. Шуи) на европейском Севере, относительно слабо затронутой хозяйственной деятельностью человека; выявление изменения качества вод в долговременной перспективе; определение специфики применения распространенных в мировой практике методов биоиндикации в условиях рек Европейского Севера России.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Бассейн р. Шуи расположен в южной части Республики Карелии (юго-восточная часть Фенноскандии). Климат морской, переходный к континентальному, зимы сравнительно мягкие, среднегодовая температура 1.8–2.5°С, безморозный период 100–120 дней [2]. Территория республики отличается малой плотностью населения, в среднем 3.4 чел/км$^2$, причем 80% – городские жители, а на большей территории плотность менее 1 чел/км$^2$ [14, 21].

Русло р. Шуи имеет длину 272 км, из которых 72 км приходятся на проточные озера. Полное падение составляет 162 м, удельное падение речной части 0.81 м/км. Площадь водосбора 10267 км$^2$, расход воды 89.6 м$^3$/с, озерность [8, 22]. Для водосбора свойственны высокие озерность (10.3%) и заболоченность (18%), последнее обусловливает высокие концентрации гуминовых веществ и цветность воды, составляющую в устье 50–97 град. [8, 46]. Средняя плотность населения на территории бассейна р. Шуи в верхнем течении <1 и в нижнем 1–2 чел/км$^2$ [2]. Для оценки экологического качества вод р. Шуи были выбраны 25 станций в основном русле и притоках (рис. 1).

На порогах и перекатах пробы отбирали количественной рамкой площадью 0.04 м$^2$, на плесах – дночерпателем ДАК250 площадью 0.025 м$^2$ (по 2 подъема на пробу). Для расчета индексов экологического качества вод результаты нескольких проб, отобранных с одной станции в одно время, были усреднены. Характеристики станций и число проб приведены в табл. 1.

Для оценки экологического качества вод выбраны индексы, широко применяемые в мировой практике, преимущественно требующие определения выявленных организмов до уровня семейства: Family Biotic Index (FBI), Extended Biotic Index (EBI), Biological Monitoring Working Party Index (BMWP), Average Score Per Taxon (ASPT), Belgian Biotic Index (BBI), Indice Biologique Global Normalize (IBGN), Индекс Гутнайта–Уитлея (GW), EPT Richness index (EPT) и Индекс Майера (IM). Краткая характеристика индексов и ссылки на источники приведены в табл. 2. Для итоговой суммарной оценки использован интегральный индекс биологического состояния (ИБС), среднее арифметическое от рассчитанных индексов, приведенных к единой шкале [9]. В отличие от указанного литературного источника, где использована четырехбалльная шкала, в данной работе выбрана пятибалльная градация, поскольку именно такая используется во многих распространенных индексах. ИБС позволил получить интегральную оценку качества вод, баллы: 1 – очень плохое, 2 – плохое, 3 – посредственное, 4 – хорошее, 5 – отличное.

Для выделения групп станций, близких по качеству вод, применен кластерный анализ с методом средней связи (UPGMA) для объединения станций в кластеры и Евклидовым расстоянием (Euclidean linkage) – для оценки сходства объектов. В качестве признаков выбраны рассчитанные значения индексов экологического качества вод (табл. 2). Расчеты проведены в программе PAST3.18 [37].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Видовой состав донных сообществ р. Шуи и обилие макрозообентоса на отдельных станциях опубликованы ранее в [6]. Средние значения показателей обилия и разнообразия донных беспозвоночных р. Шуи и ее притоков приведены в табл. 3.

Рассчитанные значения индексов оценки экологического качества вод и интегральный показа-

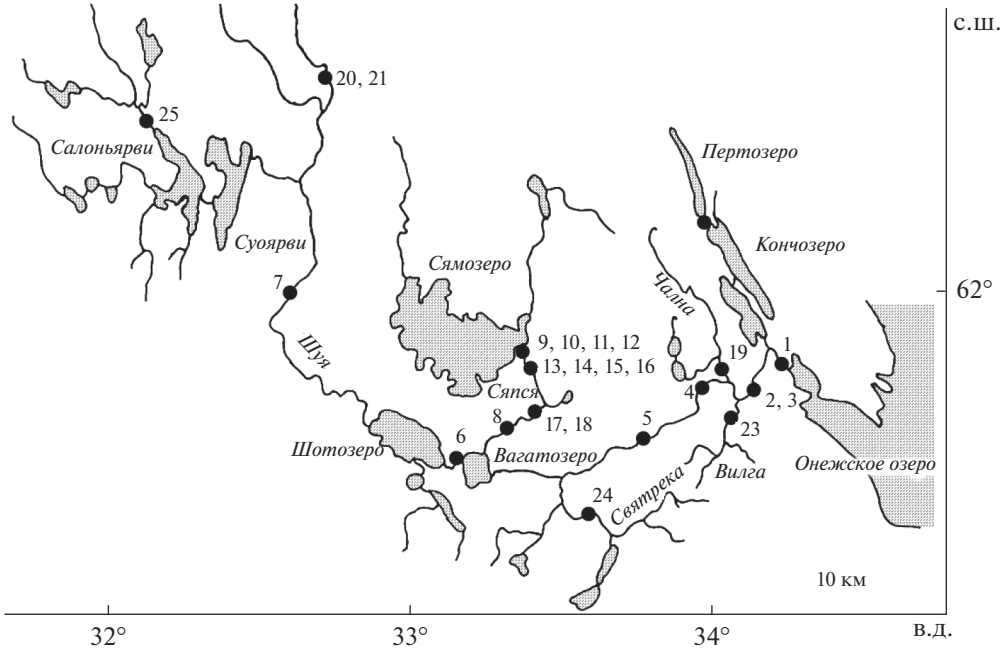


**Рис. 1.** Картосхема территории расположения станций отбора проб (1–25) на р. Шуе и ее притоках. Обозначения станций в соответствии с табл. 1.

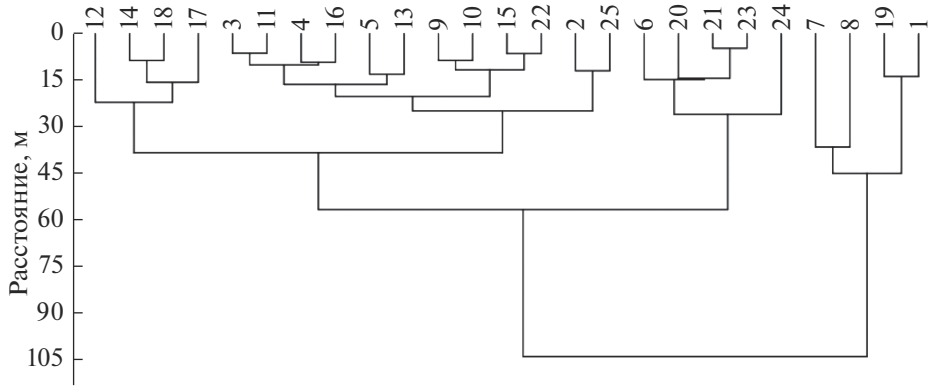


**Рис. 2.** Дендрограмма сходства станций р. Шуи и ее притоков по значениям индексов оценки качества вод (нумерация станций в соответствии с табл. 1).

тель ИБС (в среднем – 4.2) позволяют сделать заключение о соответствии вод р. Шуи в целом классу качества “хорошее” (табл. 4). Вместе с тем выявлены две станции с низким качеством вод, соответствующим градации 2 – “плохое”.

Для оценки связи показателей обилия и разнообразия макрозообентоса с классом качества вод проведен корреляционный и дисперсионный анализ (табл. 5). Кроме того, выявлена статистически значимая связь ИБС с цветностью воды (корреляционный анализ по Спирмену: $r_s = -0.45$, $p = 0.02$; дисперсионный анализ: $F = 744$, $\omega^2 = 0.937$, $p < 0.01$).

Для выделения групп станций с близкими значениями индексов экологического качества вод применен кластерный анализ (рис. 2). В результате выделена группа станций (1, 4, 8, 19) – на плесовых участках с мягкими грунтами, где формируются пелофильные и псаммофильные сообщества.

Отдельную группу (станции 5, 20, 21, 23, 24) составили станции в малых притоках (кроме ст. 6, которая расположена в крупном водотоке). В наибольшую группу, объединившую остальные станции, вошли пороги крупных водотоков с развитым реофильным комплексом видов. В этой

**Таблица 1.** Характеристика станций и объем материала (расход воды на станциях приведен по [8]; грунт: П – песчаный, К – каменистый, И – илистый; номера станций в соответствии с рис. 1)

| № станции | Река | Станция | Координаты | Расход воды, м/с$^3$ | Дата | Скорость течения, м/с | Грунт | Число проб |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Шуя | пос. Шуя | 61.90° с.ш., 34.23° в.д. | 90 | 03.08.18 | 0.05 | П | 2 |
| 2 | | пос. Бесовец | 61.87° с.ш.; 34.16° в.д. | 90 | 11.10.07 | 0.30 | К | 3 |
| 3 | | | | | 03.08.18 | 0.63 | К | 3 |
| 4 | | пос. Виданы | 61.85° с.ш.; 33.96° в.д. | 89 | 11.10.07 | 0.43 | К | 3 |
| 5 | | пос. Матросы | 61.78° с.ш.; 33.79° в.д. | 84 | 03.08.18 | 0.40 | К | 3 |
| 6 | | Выше Вагатозера | 61.75° с.ш.; 33.16° в.д. | 54 | 30.07.19 | 0.50 | К | 3 |
| 7 | | ст. Хаутаваара | 62.01° с.ш.; 32.59° в.д. | 50 | 30.07.19 | 0.10 | П | 2 |
| 8 | Сяпся | Порог Сорикоски | 61.80° с.ш.; 33.32° в.д. | 15 | 02.08.18 | 0.10 | И | 2 |
| 9 | | пос. Сяпся | 61.92° с.ш.; 33.37° в.д. | 12 | 27.07.05 | 0.20 | К | 3 |
| 10 | | | | | | 0.20 | П | 3 |
| 11 | | | | | 10.10.05 | 0.20 | К | 3 |
| 12 | | | | | | 0.23 | П | 3 |
| 13 | | Порог Тюкка | 61.88° с.ш.; 33.40° в.д. | 12 | 27.07.05 | 0.53 | К | 3 |
| 14 | | | | | 10.10.05 | 0.37 | К | 3 |
| 15 | | | | | 10.10.07 | 0.40 | П | 3 |
| 16 | | | | | 10.10.07 | 0.40 | К | 3 |
| 17 | | Порог Горбункоски | 61.83° с.ш.; 33.43° в.д. | 12 | 11.10.07 | 0.33 | К | 3 |
| 18 | | | | | 11.10.07 | 0.40 | П | 3 |
| 19 | Чална | пос. Чална | 61.89° с.ш.; 34.05° в.д. | 1.9 | 08.08.17 | 0.10 | И | 2 |
| 20 | Халкойоки | Выше оз. Вихтимъярви | 62.42° с.ш.; 32.62° в.д. | 0.1 | 27.07.09 | 0.10 | П | 3 |
| 21 | | | | | | 0.10 | К | 3 |
| 22 | Викша | Исток из оз. Пертозеро | 62.12° с.ш.; 34.01° в.д. | 2.0 | 10.08.15 | 0.60 | К | 3 |
| 23 | Вилга | пос. Матросы | 61.82° с.ш.; 34.08° в.д. | 0.7 | 03.08.18 | 0.30 | К | 3 |
| 24 | Святрека | пос. Пряжа | 61.66° с.ш.; 33.61° в.д. | 3.6 | 02.08.18 | 0.30 | К | 3 |
| 25 | Айттойоки | пос. Вегарус | 62.30° с.ш.; 32.10° в.д. | 5.0 | 30.07.19 | 0.40 | К | 3 |

группе, однако, оказалась и небольшая р. Викша на участке истока из оз. Пертозеро (ст. 22), что может быть объяснено влиянием крупного водоема. Выделение трех групп биотопов при помощи кластерного анализа позволило проанализировать качество вод раздельно для плесовых участков (мягкие грунты, значительные глубины и низкая скорость течения), малых притоков и порожистых участков крупных рек (табл. 6).

Посредственное качество вод (наименьшие значения индекса ИБС) отмечено для плесов, хорошее – для малых притоков и отличное – для порогов в нижнем течении крупных рек.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для исследованных станций на р. Шуе и ее притоках характерно довольно высокое обилие

**Таблица 2.** Выбранные индексы оценки экологического качества вод

| Индекс | Качество вод, балл | | Число градаций | Литературный источник |
|---|---|---|---|---|
| | наихудшее | наилучшее | | |
| FBI | 10 | 0 | 7 | [38] |
| EBI | 0 | 14 | 5 | [36] |
| BMWP | <25 | >150 | 5 | [34] |
| ASPT | <2 | >5 | 7 | [34] |
| BBI | 1 | 10 | 5 | [35] |
| IBGN | 0 | 17 | 5 | [33] |
| GW | <30 | >80 | 5 | [9] |
| EPT | <15 | >80 | 5 | [40] |
| IM | <4 | >22 | 5 | [9] |

**Таблица 3.** Обилие и разнообразие донных сообществ водотоков бассейна р. Шуи ($Q1$, $Q3$ – квартили)

| Характеристика | Среднее | Стандартная ошибка | Медиана | $Q1$ | $Q3$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Численность, тыс. экз. | 7.6 | 1.88 | 3.1 | 1.7 | 8.9 |
| Биомасса, г/м | 29.7 | 7.20 | 15.2 | 3.3 | 47.8 |
| Число видов на станции | 24.5 | 1.71 | 26.0 | 19.0 | 29.5 |
| Индекс Шеннона | 2.10 | 0.09 | 2.17 | 1.89 | 2.39 |
| Индекс Симпсона | 0.21 | 0.03 | 0.17 | 0.13 | 0.23 |

макрозообентоса в сравнении с другими водотоками на территории Республики Карелии, что отмечалось и ранее в [5, 39]. Это может быть следствием начального этапа эвтрофирования, когда его негативное влияние еще не выражено. Аналогичная тенденция наблюдалась и в других речных экосистемах на севере России [7, 32].

Использованные при биоиндикации индексы в целом позволили получить схожие результаты по станциям и не противоречат друг другу. Так, модуль коэффициента корреляции по Спирмену ($r_s$) между значениями индексов на станциях варьирует от 0.20 (между IM и GW) до 0.97 (между IBGN и BMWP). Наиболее близкие ИБС значения показал BBI ($r_s = 0.93$, $p < 0.01$), что позволяет рекомендовать его при необходимости ограничиться малым числом индексов. Обилие и число видов на станции положительно коррелируют со значением ИБС. Дисперсионный анализ также позволил выявить статистически значимое влияние обилия и разнообразия макрозообентоса на значение ИБС (табл. 5). Очевидно, это связано со спецификой методики расчета выбранных индексов качества вод, где баллы начисляются преимущественно за количество индикаторных таксонов, а не за среднее значение их валентности. Вместе с тем в [10] показана высокая эффективность TBI (Trent Biotic Index) и BMWP. Индекс TBI отличается низкой чувствительностью в верхней части шкалы, поэтому автором статьи использована его расширенная модификация EBI [23]. Высокая чувствительность индексов EPT, BMWP и IBGN отмечена при исследовании малых рек Красноярского края [1]. В [48] рекомендуется использовать одновременно несколько различных индексов для объективной оценки качества вод.

Средняя оценка, полученная для р. Шуи и ее притоков, – хорошее качество воды, однако разница по станциям оказалась весьма существенной. Применение кластерного анализа позволило установить, что значения индексов экологического качества вод существенно различаются для плесов, малых водотоков и порогов в центральном русле. Отличное качество воды выявлено в крупных водотоках, что указывает на чистоту воды в реке в целом и отражает способность большой озерно-речной системы ассимилировать поступающие в настоящее время биогенные элементы. Хорошее, но не отличное экологическое качество вод выявлено в малых водотоках. Поскольку плотность населения на территории водосбора р. Шуи низка, можно предположить, что такая оценка обусловлена естественными причинами – возможно, высокой цветностью воды вследствие большого количества гуминовых веществ (установлена отрицательная зависимость ИБС от цветности). В условиях низкоминерали-

**Таблица 4.** Значения индексов биологического качества воды в р. Шуе и ее притоках (номера (№) станций приведены в соответствии с табл. 1 и рис. 1)

| № | FBI | EBI | BMWP | ASPT | BBI | IBGN | GW | EPT | IM | ИБС |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 6.7 | 4 | 22 | 3.1 | 5 | 4 | 14.6 | 8 | 13 | 3 |
| 2 | 4.8 | 14 | 115 | 6.1 | 9 | 14 | 10.5 | 38 | 18 | 5 |
| 3 | 4.0 | 12 | 109 | 6.8 | 9 | 14 | 0.9 | 58 | 16 | 5 |
| 4 | 4.0 | 13 | 116 | 6.8 | 9 | 14 | 3.8 | 61 | 16 | 5 |
| 5 | 4.9 | 12 | 106 | 6.6 | 8 | 13 | 9.2 | 46 | 16 | 4 |
| 6 | 4.9 | 8 | 55 | 6.1 | 6 | 11 | 0.0 | 53 | 11 | 4 |
| 7 | 7.0 | 5 | 6 | 2.0 | 3 | 3 | 47.1 | 0 | 5 | 2 |
| 8 | 7.0 | 7 | 29 | 4.1 | 5 | 6 | 57.7 | 25 | 11 | 3 |
| 9 | 1.5 | 11 | 92 | 6.6 | 7 | 12 | 1.1 | 52 | 12 | 4 |
| 10 | 1.6 | 11 | 92 | 6.6 | 7 | 12 | 1.1 | 60 | 15 | 4 |
| 11 | 5.1 | 11 | 107 | 6.7 | 9 | 14 | 5.0 | 58 | 12 | 5 |
| 12 | 4.6 | 12 | 124 | 6.9 | 9 | 14 | 4.9 | 69 | 15 | 5 |
| 13 | 4.6 | 12 | 108 | 6.8 | 8 | 14 | 19.2 | 54 | 16 | 5 |
| 14 | 4.2 | 12 | 138 | 6.9 | 9 | 15 | 0.9 | 69 | 15 | 5 |
| 15 | 4.0 | 12 | 99 | 6.6 | 8 | 13 | 0.3 | 48 | 15 | 4 |
| 16 | 4.3 | 12 | 116 | 6.8 | 9 | 14 | 4.3 | 52 | 15 | 5 |
| 17 | 2.7 | 14 | 152 | 6.9 | 9 | 15 | 2.8 | 56 | 18 | 5 |
| 18 | 4.5 | 14 | 143 | 7.2 | 9 | 15 | 2.9 | 63 | 17 | 5 |
| 19 | 7.5 | 4 | 13 | 2.6 | 3 | 3 | 10.0 | 0 | 9 | 2 |
| 20 | 5.6 | 9 | 49 | 5.4 | 6 | 10 | 9.0 | 43 | 13 | 4 |
| 21 | 5.0 | 11 | 63 | 5.7 | 8 | 12 | 4.8 | 42 | 16 | 4 |
| 22 | 4.9 | 10 | 95 | 5.6 | 7 | 13 | 1.6 | 48 | 19 | 4 |
| 23 | 4.6 | 11 | 60 | 5.5 | 7 | 10 | 2.3 | 42 | 15 | 4 |
| 24 | 4.7 | 12 | 78 | 6.0 | 8 | 13 | 16.6 | 43 | 15 | 4 |
| 25 | 4.7 | 13 | 123 | 6.5 | 8 | 14 | 2.0 | 38 | 16 | 4 |

**Таблица 5.** Оценка связи индекса биологического состояния (ИБС) с характеристиками обилия и разнообразия макрозообентоса ($r_s$ – значение коэффициента корреляции по Спирмену; $p$ – статистическая значимость; $F$ – критерий Фишера; $\omega^2$ – омега квадрат, оценка силы влияния фактора)

| Характеристики | Корреляционный анализ | | Дисперсионный анализ | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $r_s$ | $p$ | $F$ | $p$ | $\omega^2$ |
| Численность, тыс. экз. | 0.66 | <0.01 | 15.7 | <0.01 | 0.23 |
| Биомасса, г/м | 0.54 | <0.01 | 16.3 | <0.01 | 0.23 |
| Число видов на станции | 0.72 | <0.01 | 139.4 | <0.01 | 0.73 |
| Индекс Шеннона | 0.34 | 0.09 | 106.0 | <0.01 | 0.68 |
| Индекс Симпсона | –0.19 | 0.53 | 470.0 | <0.01 | 0.90 |

**Таблица 6.** Оценка качества вод р. Шуи и ее притоков по показателям макрозообентоса в зависимости от биотопа

| Биотоп | Станции | Балл ИБС, среднее | Качество воды |
|---|---|---|---|
| Плесовые участки | 1, 7, 8, 19 | 2.5 | Посредственное |
| Малые притоки | 20–24 | 4.0 | Хорошее |
| Пороги крупных водотоков | 2–6, 9–18, 25 | 4.6 | Отличное |

зированных вод Фенноскандии это приводит к их закислению [26]. Притоки (реки Чална и Вилга), протекающие по территории населенных пунктов, могут быть загрязнены поверхностным стоком. Роль притоков в снижении качества вод ранее выявлена в р. Оби, где с их водосборов поступали органические вещества антропогенного происхождения и ионы тяжелых металлов [27]. Значения индексов, указывающие на низкое качество вод, выявлены для мягких грунтов, которые формируются на плесовых участках. Есть сведения, что плесовые участки рек – места накопления загрязняющих агентов в донных отложениях [47]. Вместе с тем макрозообентос мягких грунтов в реках часто отличается низким разнообразием от сообществ каменистых порогов и перекатов [4, 29]. Поэтому причина низких показателей качества вод также может скрываться в малом разнообразии биоты этого биотопа. Снижение баллов качества вод для мягких грунтов плесовых участков указывает на то, что локальные (в том числе и природные) факторы могут вносить большой вклад в значения индексов. Таким образом, при экспертизе качества вод по макрозообентосу необходимо учитывать особенности биотопа. Оценка, рассчитанная на основе данных только по плесовым участкам, может существенно занизить качество вод. Сообщества речных порогов и перекатов с каменистыми грунтами отличаются большим видовым богатством [12, 16]. По этой причине результаты оценки качества вод на основе макрозообентоса порожистых участков можно считать более полными и объективными, что обусловливает роль этого биотопа в биоиндикации и мониторинге.

По данным Государственной службы наблюдений (ГСН) Росгидромета, воды р. Шуи по химическим показателям соответствуют градации “слабо загрязненные” (2-й класс качества) [15], что не противоречит полученным в ходе настоящей работы выводам. Исследования качества вод в р. Шуе и ее притоках, проведенные в XX в., позволяют оценить долговременную динамику показателей загрязнения. Результаты обследования порожистых участков в верхнем, среднем и нижнем течении реки, выполненные в 1982 г. с использованием индексов Макартура, Вудивиса и Гутнайта–Уитлея [18], совпали с результатами настоящего исследования как по балльной оценке, так и по более высокому качеству вод в основном русле по сравнению с малыми водотоками.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование показало, что экосистемы р. Шуи, испытывающие умеренное влияние хозяйственной деятельности человека, находятся в стабильном состоянии. Оценка экологического качества вод указывает на хорошее и отличное состояние экосистем. Только плесовые участки отличаются низкими значениями индексов качества вод, что, впрочем, может быть следствием заниженных оценок вследствие особенностей биоты илистых грунтов. За последние 40 лет показатели экологического качества вод практически не изменились, что, по-видимому, связано с относительно низкой освоенностью территории водосбора и большой проточностью системы. Полученные данные убедительно свидетельствуют о том, что оценку экологического качества вод по биотическим показателям следует вести раздельно для плесовых участков, малых притоков и порогов в главном русле, а полученные значения индексов сравнивать только между аналогичными биотопами. Проведенное исследование показывает важность пороговых участков в биологическом мониторинге речных экосистем; их донные сообщества, отличаясь большим видовым разнообразием, позволяют объективно оценить экологическое качество вод.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Андриянова А.В.* Биотические индексы и метрики в оценке качества воды малых рек на территории природного парка “Ергаки” (юг Красноярского края) // Сиб. экол. журн. 2015. № 3. С. 439–451.
2. Атлас Карельской АССР. М.: Главное управление геодезии и картографии при Совмине СССР, 1989. 40 с.
3. Атлас “Республика Карелия”. СПб.: 444 ВКФ, 2003. 136 с.
4. *Барышев И.А.* Зообентос плесовых участков порожистых водотоков: состав, обилие и трофическая структура (на примере Восточной Фенноскандии) // Биология внутрен. вод. 2020. № 1. С. 57–66.
5. *Барышев И.А.* Макрозообентос рек Восточной Фенноскандии. Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2019. 46 с.
6. *Барышев И.А.* Современное состояние и долговременные изменения зообентоса пороговых участков реки Шуя и ее притока – реки Сяпся (Карелия, бассейн Онежского озера) // Тр. Гос. природ. заповедника “Кивач”. Вып. 6. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2013. С. 114–119.
7. *Барышев И.А.* Факторы формирования сообществ макрозообентоса каменистых порогов и перекатов водотоков Восточной Фенноскандии // Журн. общ. биологии. 2014. Т. 75. № 2. С. 124–131.
8. *Берсонов С.А.* Водно-энергетический кадастр Карельской АССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 407 с.
9. Введение в биомониторинг пресных вод / Под ред. *Т.С. Вшивковой, Н.В. Иваненко, Л.В. Якименко, К.А. Дроздова.* Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2019. 214 с.
10. *Головатюк Л.В., Зинченко Т.Д.* Биотические идентификаторы в оценке качества воды эталонной реки: сравнительный анализ биоиндикационных индексов реки Байтуган (Высокое Заволжье) //

Уч. зап. Казанского ун-та. Сер. естественные науки. 2020. Т. 162. Кн. 1. С. 134–150.

11. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2019 г. / Под ред. *А.Н. Громцева, О.Л. Кузнецова, Г.Т. Шкиперовой*. Петрозаводск: М-во природ. ресурсов и экологии Республики Карелии, 2020. 248 с.
12. *Жадин В.И.* Фауна рек и водохранилищ // Тр. Зоол. ин-та. 1940. Т. 5. Вып. 3–4. 992 с.
13. *Игнатьева Н.В., Петрова Т.Н., Гусева М.А.* Оценка загрязненности поверхностных вод на территории водосборного бассейна Ладожского озера по гидрохимическим показателям // Изв. Самарского НЦ РАН. 2015. Т. 17. № 6. С. 91–96.
14. *Карелия*. Энциклопедия. Т. 1. Петрозаводск: Петропресс, 2007. С. 68.
15. Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник 2018 / Под ред. *М.М. Трофимчук*. Ростов-на-Дону: ГХИ Росгидромета, 2019. 561 с.
16. *Комулайнен С.Ф.* Экология фитоперифитона малых рек Восточной Фенноскандии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. 182 с.
17. *Комулайнен С.Ф., Круглова А.Н., Барышев И.А.* Формирование гидробиоценозов реки Сяпся (Бассейн Онежского озера) в условиях воздействия стоков форелевой фермы // Рыбоводство и рыб. хоз-во. 2007. Т. 2. С. 21–23.
18. *Кухарев В.И.* Зообентос, как индикатор антропогенной нагрузки на водотоки бассейна реки Шуи // Элементы экосистемы Онежского озера и его бассейна. Петрозаводск: КарНЦ АН СССР, 1984. С. 34–37.
19. *Лозовик П.А.* Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию. Автореф. дис. ... докт. хим. наук. М: Геоэкология, 2006. 59 с.
20. *Опекунова М.Г.* Биоиндикация загрязнений. Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2016. 300 с.
21. Оценка численности постоянного населения на 1 января 2020 года и в среднем за 2019 г. М.: Росстат, 2019. [Электронный ресурс]. URL: https://showdata.gks.ru/report/278932/ (дата обращения: 13.04.2020)
22. Ресурсы поверхностных вод СССР. Карелия и Северо-запад. 1972. Т. 2. 525 с.
23. *Семенченко В.П., Разлуцкий В.И.* Экологическое качество поверхностных вод. Минск: Белорус. наука, 2010. 329 с.
24. *Смирнов Ю.А., Круглова А.Н., Комулайнен С.Ф., Хренников В.В., Широков В.А., Шустов Ю.А., Шуров И.Л.* Влияние лесной и сельскохозяйственной мелиорации на элементы биологического режима рек Сяпси и Шуи // Биол. ресурсы внутр. водоемов и их использ.: Межвуз. сб. науч. тр. Петрозаводск: Петрозав. гос. ун-т, 1990. С. 89–96.
25. *Стерлигова О.П., Ильмаст Н.В., Кучко Я.А., Комулайнен С.Ф., Савосин Е.С. Барышев И.А.* Состояние пресноводных водоемов Карелии с товарным выращиванием радужной форели в садках. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. 127 с.
26. *Теканова Е.В., Калинкина Н.М., Кравченко И.Ю.* Геохимические особенности функционирования биоты в водоемах Карелии // Изв. РАН. Сер. геогр. 2018. № 1. С. 90–100.
27. *Темерев С.В.* Эколого-химическая оценка состояния водных систем бассейна Оби. Автореф. дис. ... докт. хим. наук. М.: РУДН, 2008. 50 с.
28. *Чернов В.К.* Результаты гидробиологического обследования рек Суны, Шуи, Лососинки и Косалмского протока // Тр. Бородинской биол. ст. 1927. Т. 5. С. 190–202.
29. *Чертопруд М.В.* Разнообразие и классификация реофильных сообществ макробентоса средней полосы Европейской России // Журн. общ. биологии. 2011. Т. 72. № 1. С. 51–73.
30. *Широков В.А., Хренников В.В., Круглова А.Н.* Влияние лесной и сельскохозяйственной мелиорации на биологический режим р. Шуи // Биол. и рыбохоз. исслед. Водоемов Прибалтики. Тез. докл. XXI науч. конф. по изучению и освоению водоемов Прибалтики и Белоруссии. Псков: Промрыбвод, 1983. Т. 1. С. 126–127.
31. Электронный атлас Республика Карелия. [Электронный ресурс]. URL: http://nwpi.krc.karelia.ru/atlas/ (дата обращения: 6.11.2020)
32. *Яковлев В.А.* Пресноводный зообентос северной Фенноскандии (разнообразие, структура и антропогенная динамика). Апатиты: Кольский НЦ РАН, 2005. Ч. 1. 161 с. Ч. 2. 145 с.
33. AFNOR (Association Francaise de Normalisation) Essais des eaux. Determination de la biologique global normalise (IBGN) // AFNOR. NF T90-350. Paris, 1992.
34. *Armitage P.D., Moss D., Wright J.F., Furse M.T.* The performance of anew biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of unpolluted running-water sites // Water Res. 1983. V. 17. №. 3. P. 333–347.
35. *De Pauw N., Vanhooren G.* Method for biological quality assessment of watercourses in Belgium // Hydrobiologia. 1983. V. 100. P. 153–168.
36. *Ghetti P.F.* I macroinvertebrati nell'analisi dei corsi d'acqua. Indice Biotico: E.B.I. modificato. Manuale di applicazione. Trento: APAT, 1986. 111 p.
37. *Hammer Ø., Harper D., Ryan P.* PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. V. 4. Iss. 1. P. 1–9.
38. *Hilsenhoff W.L.* An improved biotic index of organic stream pollution // Great Lakes Entomol. 1987. V. 20. № 1. P. 31–39.
39. *Khrennikov V.V., Baryshev I.A., Shustov U.A., Pavlov V.N., Ilmast N.V.* Zoobenthos of salmon rivers in the Kola Peninsula and Karelia (north east Fennoscandia) // Ecohydrol. Hydrobiol. 2007. V. 7. № 1. P. 71–77.
40. *Lenat D.R.* Water quality assessment using a qualitative collection method for benthic macroinvertebrates // J. North. Am. Benthological Soc. 1988. V. 7. P. 222–233.
41. *Li L., Zheng B., Liu L.* Biomonitoring and Bioindicators Used for River Ecosystems: Definitions, Ap-

proaches and Trends // Procedia Environ. Sci. 2010. V. 2. P. 1510–1524.

42. *Malaj E., Peter C., Grote M., Kühne R., Mondy C.P., Usseglio-Polatera P., Brack W., Schäfer R.B.* Organic chemicals jeopardize the health of freshwater ecosystems on the continental scale // Proc. National Acad. Sci. 2014. V. 111 (26). P. 9549–9554.
43. *Metcalfe J.L.* Biological Water Quality Assessment of Running Waters Based on Macroinvertebrate Communities: History and Present Status in Europe // Environ. Pollution. 1989. V. 60. P. 101–139.
44. *Oertel N., Salánki J.* Biomonitoring and Bioindicators in Aquatic Ecosystems // Modern trends in applied aquatic ecology / Eds *R.S. Ambasht, N.K. Ambasht.* N. Y.: Kluwer Acad/Plenum Publ., 2003. P. 219–246.
45. *Rosenberg D.M., Resh V.H.* Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates. N. Y.: Chapman and Hall, 1993. 488 p.
46. *Sabylina A.V., Lozovik P.A., Zobkov M.B.* Water chemistry in Onega lake and its tributaries // Water Resour. 2010. Т. 37. № 6. С. 842–853.
47. *Slukovskii Z.I., Polyakova T.N.* Analysis of accumulation of heavy metals from river bottom sediments of the urban environment in the bodies of Oligochaetes // Inland Water Biol. 2017. Т. 10. № 3. С. 315–322.
48. *Soininen J., Könönen K.* Comparative study of monitoring South-Finnish rivers and streams using macroinvertebrates and benthic diatom community structure // Aquatic Ecol. 2004. V. 38. P. 63–75.
49. *Worf D.L.* Biological monitoring for environmental effects. Toronto: Lexington Books, 1980. 227 p.

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, 2021, том 48, № 5, с. 556–567

## ГИДРОХИМИЯ, ГИДРОБИОЛОГИЯ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

УДК 504.454:574.52:574.58:579.68

# ЛЕТУЧИЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ В УСТЬЕВЫХ ОБЛАСТЯХ МАЛЫХ РЕК ТАТАРСКОГО ПРОЛИВА В ПЕРИОД ЛЕДОСТАВА

**© 2021 г. Л. А. Гаретова[a], *, Н. К. Фишер[a], **, А. М. Кошельков[b]**

[a] *Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровск, 680000 Россия*

[b] *Институт горного дела ДВО РАН, Хабаровск, 680000 Россия*

**e-mail: micro@ivep.as.khb.ru*

***e-mail: fisher@ivep.as.khb.ru*

Поступила в редакцию 19.05.2020 г.
После доработки 27.10.2020 г.
Принята к публикации 21.01.2021 г.

Проведено исследование распределения летучих органических соединений в воде и донных отложениях эстуариев малых приливных рек. В период ледостава вода характеризовалась высоким содержанием органических веществ: в пресных водах – от 4.2 до 29.2, в осолоненных водах – от 12.2 до 80.4, в морской воде – 404 мг/л. В донных отложениях содержание органического углерода менялось от <0.10 до 15.4%, количество углеводородов варьировало от 0.01 до 1.43 мг/г. В подледной речной воде содержание летучих органических соединений в основном было ниже нормативов, установленных для водоемов рыбохозяйственного значения. В воде и донных отложениях солоноводных участков преобладали продукты спиртового, ацетонобутилового и метанового брожения. Концентрация метанола в осолоненной озерной воде достигала 13.76 мг/дм$^3$. Для подледного периода характерно выравнивание концентраций летучих органических соединений между донными отложениями и водной средой за счет отсутствия поверхностного стока, процессов испарения и приливо-отливного переноса.

*Ключевые слова:* летучие органические соединения, углеводороды, малые реки, донные отложения, ледостав.

**DOI:** 10.31857/S0321059621040052

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования устьевых областей рек обусловлена их биогеохимической барьерной функцией на границе смешения морских и речных вод [12, 26, 30]. В последние годы усилился интерес к малым эстуарным системам [36, 39, 40, 45], поскольку именно малые реки составляют основную массу водотоков во всех климатических зонах, а их функционирование пока слабо изучено. Последнее особенно касается устьевых областей малых рек дальневосточного побережья, антропогенный пресс на которые постоянно усиливается за счет расширения и строительства морских угольных и нефтяных терминалов, железнодорожных и автомобильных подъездных путей, других коммуникаций, затрагивающих водосборные площади малых рек [16].

В юго-западный район Татарского пролива впадает множество средних и малых рек, стекающих с восточного склона Сихотэ-Алиня. Практически все водотоки бассейна Татарского пролива имеют высшую рыбохозяйственную категорию, поскольку являются местами нереста тихоокеанских лососей. Современный облик устьевых областей многих из них начал формироваться в 1940-е гг. в период строительства железной дороги Комсомольск-на-Амуре–Совгавань. Железнодорожная магистраль, опоясывая побережье, затронула устья многих малых рек (Мучке, Ая, Токи, Большая Дюанка и Малая Дюанка и др.). Прокладка мостов через устья рек сопровождалась сужением внешних участков эстуариев, что привело к образованию полузамкнутых лагун или приустьевых озер. Следствие таких морфологических изменений – наблюдаемое в настоящее время обмеление эстуариев малых рек, которое влечет за собой утрату нерестовых угодий для дальневосточных лососей и других объектов ихтиофауны и гидробионтов.

В зонах смешения морских и континентальных вод происходит аккумуляция разнородного минерального и биогенного материала (остатков растительных и животных организмов терригенного и морского происхождения), а также антропогенных загрязняющих веществ [8, 36, 46], что делает их донные отложения (ДО) источником

вторичного загрязнения морской среды [30, 43, 45], в том числе за счет образования летучих органических соединений (ЛОС) [25, 37]. Кроме поступления ЛОС в природные воды от антропогенных источников (сточные воды промышленных предприятий, разливы нефти и нефтепродуктов, сток с городских территорий) [35, 38], в прибрежных зонах они могут в значительном количестве продуцироваться морской растительностью и фитопланктоном [27, 28, 48], а также образовываться в результате их микробиологической деструкции [31, 44]. Такие соединения, как ацетон, ацетальдегид и формальдегид, могут образовываться в результате фотохимических реакций хромофорных ОВ, в частности гуминовых веществ [29].

Исследование ЛОС необходимо для определения источников, свойств, пространственного распространения и масштабов проникновения поллютантов в водную экосистему. При этом необходимо учитывать, что распространение антропогенных углеводородов и их производных происходит на существующем в природе устойчивом биогеохимическом фоне [8, 17].

Поскольку в настоящее время ПДК загрязняющих веществ в ДО не установлены, ориентировочно оценить уровень загрязнения ДО в водоемах, подвергающихся влиянию хозяйственной деятельности, можно путем сопоставления концентраций загрязняющих веществ в ДО с их фоновым содержанием в данном районе. Очевидно, что наиболее объективными критериями оценки были бы концентрации ЛОС, установленные до начала активной хозяйственной деятельности на рассматриваемом водном объекте. Однако такие данные, как правило, отсутствуют и уже не могут быть получены, поскольку водосборные площади малых рек бассейна Татарского пролива в течение многих лет активно и многопланово используются, что, безусловно, сказывается на химическом составе ДО. Один из подходов к разделению (дифференциации) внутриводоемных процессов образования и трансформации ОВ, формирующих природные (фоновые) уровни ЛОС и антропогенного воздействия на устьевые области рек, на взгляд авторов статьи, – исследование состояния водного объекта в период ледостава. В период открытой воды устьевые области малых рек подвержены морским приливам. Градиентные величины солености и дальность проникновения морских вод в русла рек зависят от морфолого-гидрологических особенностей водотоков, приливо-отливных и сгонно-нагонных явлений. В период ледостава морское влияние на устья рек практически исключается за счет образования наледей и промерзания мелководных малых рек. Также в этот период отсутствует влияние поверхностного стока загрязняющих веществ, атмосферного переноса и осадков, действие которых возобновляется при таянии льда. Решающую роль в формировании состава ЛОС в период ледостава приобретают внутриводоемные процессы трансформации ОВ, которые могут сильно отличаться от процессов, происходящих в летний период [32, 34, 47].

Цель работы – исследование качественного состава и содержания ЛОС в воде и ДО устьевых областей малых рек бассейна Татарского пролива в период ледостава. Обсуждается разнообразие (качественный состав) и количество ЛОС (содержание суммарных и индивидуальных компонентов).

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Малые реки Мучке, Токи, Ая и Малая Дюанка впадают в Татарский пролив в районе пгт Ванино Хабаровского края, образуя в устьевых областях развитые лиманные участки (рис. 1).

Река Малая Дюанка протяженностью 21 км имеет ширину русла 6 м, среднюю глубину 0.5 м. Малая река (ручей) Ая имеет протяженность 6 км, ширину в среднем 1.0 м, глубину 0.3–0.5 м [22].

Протяженность р. Токи составляет 16.6 км, ширина русла колеблется от 0.8 до 1.2 м, в приустьевой части достигает 3.0–3.5 м, глубина 1.5 м. В одноименную бухту река впадает через солоноватоводное оз. Токи, которое представляет собой полузамкнутую лагуну, сообщающуюся с морем короткой (~30 м) протокой шириной 12 м. Озеро Токи имеет площадь водного зеркала ~0.25 км$^2$ и выпуклый рельеф дна, глубина в период открытой воды 0.3–1.5 м, зимой бóльшая (75%) часть озера промерзает до дна.

Протяженность р. Мучке составляет 35 км, ширина 5–7 м, максимальная глубина до 1.5 м. Озеро Мучке расположено в 1.1 км выше устья р. Мучке, которая протекает через озеро, впадая в водоем с З. С восточной стороны озеро соединяется через протоку с бух. Мучке. Озеро расположено в распадке, со склонов которого в весенний период происходит сброс в водоем талых вод. Средняя глубина озера составляет 3 м, площадь зеркала водоема 0.59 км$^2$.

Становление льда на реках, озерах и в бухтах происходит в начале ноября, вскрытие ото льда наблюдается в конце апреля – начале мая.

Территория водосборов рек подвержена антропогенному преобразованию. На водосборе р. Токи находится полигон твердых коммунальных отходов пгт Ванино. На южном берегу оз. Мучке находится нефтехранилище, на юго-западном побережье бух. Мучке расположен транспортно-перегрузочный комплекс АО “Дальтрансуголь”. Кроме этого, на северо-западном побережье бух. Мучке идет строительство еще одного терминала по транспортировке угля. Водосборы рек Токи и Мучке затронуты строитель-

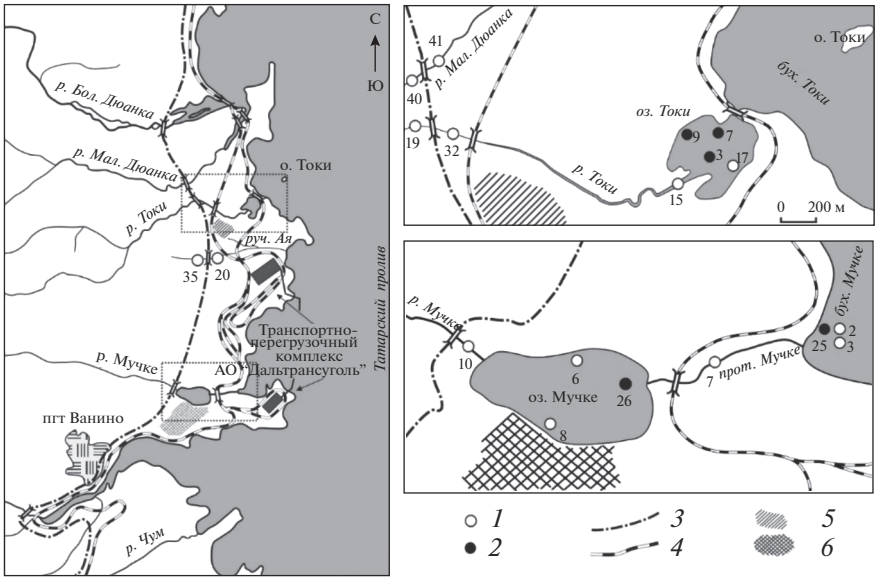


**Рис. 1.** Картосхема района исследования. *1* – станции отбора проб воды, *2* – станции отбора проб ДО, *3* – автомобильная дорога, *4* – железная дорога, *5* – полигон твердых коммунальных отходов, *6* – нефтехранилище.

ством подъездных железнодорожных и автомобильных путей.

Работы проводили в феврале–марте 2019 г. В период исследования толщина льда на реках и озерах составляла 1.0–1.1 м, в бух. Мучке ~60 см. Пробы воды для анализов отбирали из лунок после бурения толщи льда, глубина отбора 0–0.1 м. Бóльшая часть оз. Токи промерзает до дна, поэтому была отобрана только одна проба воды в стоковом желобе озера (ст. 17). Из-за значительной толщины льда ДО отбирали только на мелководных участках. Для отбора проб ДО (толщина слоя 0–10 см) использовали пробоотборник "Burkle". Физико-химические параметры воды и водной вытяжки из ДО (соленость, удельная электропроводность (УЭП), pH) определяли при помощи комбинированного измерителя "Seven Multi S-47k", "Mettler-Toledo" (Швейцария). Водную вытяжку готовили в соотношении 1 : 5 (10 г воздушно-сухой навески ДО и 50 мл дистиллированной воды) [2].

Содержание $C_{орг}$ в воде определяли на анализаторе общего органического углерода "Total Organic Carbon" ("Shimadzu", Япония). В ДО $C_{орг}$ определяли фотометрическим методом после окисления осадка ОВ сульфохромной смесью [4].

Определение содержания углеводородов (УВ) в ДО выполняли по методике из [18]. Фракцию УВ выделяли экстракцией четыреххлористым углеродом, очищали от сопутствующих полярных соединений на колонке с оксидом алюминия 2-й степени активности по Брокману. Измерения концентрации УВ проводили на концентратомере "КН-2М" ("Сибэкоприбо", Россия).

ЛОС в воде и ДО определяли методом парофазного анализа в сочетании с газовой хроматографией на хроматографе "Кристалл-5000.1", детектор пламенно-ионизационный, капиллярная колонка "HP FAP" 50 м × 0.32 мм × 0.32 мкм в режиме от 50 до 200°С [19, 20]. Анализы выполняли в ЦКП "Межрегиональный центр экологического мониторинга гидроузлов" при ИВЭП ДВО РАН (аналитик Г.М. Филиппова). Для определения содержания ЛОС в ДО навеску нативных образцов в количестве 10 г помещали во флакон объемом 20 $см^3$, закупоривали крышкой с тефлоновой прокладкой, выдерживали 30 мин при 90°С. Затем шприцем брали 1 $см^3$ паровой вазы и вводили в детектор хроматографа. Количественное содержание анализируемых веществ в воде и ДО определяли по градуировочным зависимостям с учетом относительных факторов отклика к близкому по времени удерживания.

Микробиологические посевы воды и ДО проводили согласно общепринятым в водной микробиологии методам [10]. Общую численность гетеротрофных бактерий (ГБ) определяли на рыбопептонном агаре (РПА), разбавленном в 10 раз; численность сапрофитных бактерий (СБ) – на стандартном РПА. Численность нефтеокисляющих бактерий (НОБ) выявляли на среде Раймонда с нефтью. Результаты подсчета выражали в численности колониеобразующих единиц (КОЕ) микроорганизмов в 1 мл воды или 1 $см^3$ грунта.

**Таблица 1.** Физико-химическая характеристика водной среды устьевых областей малых рек Татарского пролива в период ледостава (УЭП – удельная электропроводность, *S* – соленость)

| № станции | Место отбора | Глубина, м | $C_{орг}$, мг/дм$^3$ | УЭП, μS/см | pH | *S*, епс |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 40 | р. Малая Дюанка, выше моста | 0.18 | 4.6 | 69.4 | 7.06 | 0.0 |
| 41 | р. Малая Дюанка, ниже моста | 0.24 | 2.1 | 70 | 7.16 | 0.0 |
| 19 | р. Токи, выше моста | 0.1 | 15.3 | 96.9 | 6.61 | 0.0 |
| 32 | р. Токи, ниже моста | 0.1 | 14.6 | 132 | 7.34 | 0.0 |
| 15 | р. Токи выше озера | 0.1 | 10.4 | $1.9 \times 10^3$ | 6.61 | 0.93 |
| 17 | оз. Токи, правый берег | 0.1 | 6.1 | $12.0 \times 10^3$ | 6.59 | 6.81 |
| 35 | р. Ая, выше моста | 0.1 | 9.9 | 80.6 | 6.29 | 0.0 |
| 20 | р. Ая, ниже моста | 0.1 | 14.5 | 139 | 7.11 | 0.0 |
| 10 | р. Мучке, выше озера | 0.25 | 14.6 | 289 | 7.12 | 0.05 |
| 6 | оз. Мучке, левый берег | 0.5 | 40.2 | $12.7 \times 10^3$ | 8.12 | 7.92 |
| 8 | оз. Мучке, правый берег | 0.3 | 32.2 | $12.8 \times 10^3$ | 8.92 | 7.28 |
| 7 | прот. Мучке | 1.5 | 22.7 | $125.1 \times 10^3$ | 7.25 | 7.30 |
| 2 | бух. Мучке | 3.5 | 202.0 | $50.8 \times 10^3$ | 7.74 | 32.93 |
| 3 | То же | 3.8 | 143.4 | $50.5 \times 10^3$ | 7.67 | 32.95 |

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### *Вода*

В период исследования глубина подледной воды в руслах рек была ≤0.25 м (табл. 1). В оз. Мучке глубины варьировали от 0.3 до 1.5 м. Большая часть акватории оз. Токи промерзает до дна, поэтому отобрана только одна проба воды на ст. 17, заложенной в стоковом желобе озера у правого берега (рис. 1). Температура пресных вод была +4 …+ 5°С, осолоненные воды озер имели температуру ≤+4°С. Минимальная температура воды в период отбора проб в бух. Мучке была −0.1°С.

Подледная вода существенно отличалась по ряду показателей: УЭП менялась в пределах 69.4–125.1 mS/см и зависела от солености ($r^2$ = = 0.998) и содержания $C_{орг}$ ($r^2 = 0.989$). Соленость тесно связана с содержанием $C_{орг}$ ($r^2 = 0.908$), что, вероятнее всего, обусловлено влиянием обогащенных ОВ соленых вод.

В период открытой воды, завися от гидрологического режима моря и реки, соленые воды более чем на 2 км заходят с приливами в устья малых рек на побережье Татарского пролива [7, 24]. В период речного половодья горизонтальный градиент солености в оз. Токи менялся от 0 до 18, в межень – от 0.29 до 31.2 епс [7]. Мелководность озера (глубина 0.3–0.7 м) способствует промерзанию воды и снижению ее циркуляции в обоих направлениях. В стоковом желобе оз. Токи (ст. 17) соленость воды составляла 6.81 епс.

В оз. Мучке соленость воды между правым и левым берегом была распределена относительно равномерно и соответственно составляла 7.28 и 7.92 епс, такая же соленость отмечена в воде протоки. Для летнего периода максимальные величины градиента солености по акватории оз. Мучке составляли 0.26–6.33 епс [7]. Вероятно, при отсутствии влияния приливов соленость вод оз. Мучке в период ледостава обеспечивается за счет питания солеными грунтовыми водами.

Максимальное содержание $C_{орг}$ выявлено в двух пробах воды, отобранных в прибрежной части бух. Мучке, минимальное (2.1 мг/дм$^3$) – в одной из проб воды р. Малая Дюанка. pH водной среды – от 6.29 до 8.92 при максимальных значениях в оз. Мучке.

Содержание $C_{орг}$ по солоноводным станциям (15, 17) устьевой области р. Токи составляло в среднем 8.25 мг/дм$^3$ и по сравнению с пресноводными станциями (19 и 32) снижалось почти в 2 раза (табл. 1). По станциям реки и оз. Мучке концентрация $C_{орг}$ варьировала от 14.6 до 40.2 мг/дм$^3$ при максимальном содержании на ст. 6 и в среднем составляла 18.4 мг/дм$^3$, что более чем в 2 раза выше по сравнению с водой эстуария р. Токи. Такая вариабельность содержания ОВ связана с тем, что участки пересечения русел рек автомобильной дорогой еще сохраняют черты горных рек – преобладание галечных грунтов, слабое развитие водной растительности (эпилитонные водоросли) в зимний период. В нижнем течении рек Мучке и Токи (ст. 10 и 15 соответственно) увеличение содержания ОВ в воде обусловлено преобладанием песчано-илистых грунтов, способных аккумулировать аллохтонное и автохтонное ОВ.

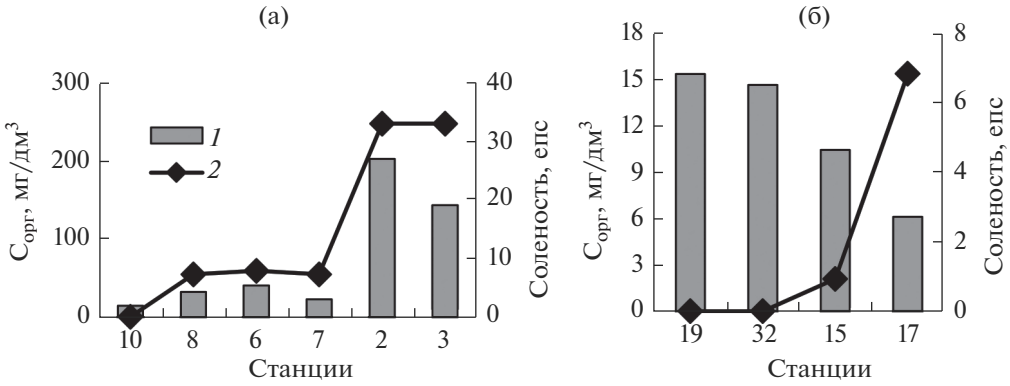


**Рис. 2.** Распределение органического углерода *1* и солености *2* в воде устьевых областей рек Мучке (а) и Токи (б) в период ледостава.

Распределение $C_{орг}$ в устьевых образованиях рек Токи и Мучке имело особенности: по мере увеличения солености от пресноводной части к бух. Мучке отмечалось увеличение содержания $C_{орг}$. В оз. Токи, напротив, при увеличении солености содержание $C_{орг}$ снижалось (рис. 2а, 2б). Вероятно, существенное увеличение содержания $C_{орг}$ в воде в бух. Мучке по сравнению с речными и озерными водами обусловлено воздействием хозяйственно-бытовых стоков с плавсредств, швартующихся на причалах угольного терминала, расположенного в бух. Мучке. В оз. Токи обратная зависимость содержания $C_{орг}$ от солености может быть связана с седиментационными процессами при увеличении солености.

Общепринятый коэффициент пересчета содержания $C_{орг}$ в концентрации органического вещества – 2 [1]. Таким образом, концентрации ОВ в водной среде рек варьируют от 4.2 до 29.2, в воде озер от 12.2 до 80.4 мг/дм$^3$, в бух. Мучке концентрация достигает 404 мг/дм$^3$. Такие высокие концентрации ОВ в период ледостава, вероятнее всего, обусловлены его неполной деградацией в толще воды. Процессы деструкции ОВ в основном осуществляют микробные сообщества, развитие которых в период ледостава ограничивается температурой ≤5°С в исследованных водных объектах, а окисление ОВ до конечных продуктов ($CO_2$ и $H_2O$) лимитировалось недостатком кислорода в подледной воде.

Известно, что устьевые области рек и приустьевые морские воды – зоны геохимических барьеров, где происходит смена форм миграции различных веществ, в том числе органических (по теории А.П. Лисицына, из-за изменения солености) [12]. Ключевая роль в деструкции поступающих неорганических и органических веществ принадлежит микроорганизмам. В таких зонах увеличиваются численность и активность бактерий, меняется структура микробных сообществ [5, 23].

В табл. 2 представлены данные по составу микробных сообществ подледной воды исследованных водных объектов. Численность аэробных гетеротрофных бактерий (ГБ) в воде рек варьировала от 7.4 до 56 тыс. КОЕ/мл и была одного порядка с таковой в холодноводных горных реках Сихотэ-Алиня в период открытой воды [6]. Исключение составляет проба воды из р. Ая, где численность данной группы была почти на порядок выше, чем в других водотоках. Здесь же выявлена максимальная численность СБ, в остальных водотоках показатели численности данной группы были близкими и составляли 6.9–7.3 тыс. КОЕ/мл. Микробные сообщества воды малых рек оказались хорошо адаптированными к утилизации углеводородных субстратов – на среде с нефтью в качестве единственного источника углерода численность бактерий была одного порядка с численностью СБ, утилизирующих легкодоступные ОВ. Доля НОБ – потенциальных деструкторов широкого спектра углеводородных субстратов [23, 37, 41] в сообществе гетеротрофов – варьировала от 3.5 до 17%.

Численность бактерий по станциям эстуария р. Мучке снижалась от речного участка к морскому, достигая минимума в воде бух. Мучке (до десятков КОЕ/мл). Аналогичные результаты получены при исследовании бактериопланктонных сообществ Амурского лимана [9]. При температуре воды 4°С в лимане минимальные показатели численности всех эколого-трофических групп бактерий отмечены в водах с максимальной соленостью. Соотношение численности ГБ/СБ характеризует уровень трофности водного объекта. Самый высокий уровень трофности отмечен для бух. Мучке (ГБ/СБ составляет 1.3–1.6), что согласуется с высоким содержанием ОВ в воде бухты. Численность НОБ в воде была невысокой и не

**Таблица 2.** Численность микроорганизмов в воде малых рек бассейна Татарского пролива в период ледостава (прочерк – нет данных)

| № станции | Место отбора | Численность микроорганизмов, КОЕ/мл | | | ГБ/СБ | НОБ/ГБ, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | СБ | ГБ | НОБ | | |
| 40 | р. Малая Дюанка, выше моста | $7.0 \times 10^3$ | $4.9 \times 10^4$ | $5.4 \times 10^3$ | 7.0 | 10.9 |
| 41 | р. Малая Дюанка, ниже моста | $6.9 \times 10^3$ | $3.6 \times 10^4$ | $4.8 \times 10^3$ | 5.2 | 13.4 |
| 19 | р. Токи, выше моста | $6.9 \times 10^3$ | $4.7 \times 10^4$ | $5.6 \times 10^3$ | 6.9 | 11.9 |
| 32 | р. Токи, ниже моста | $7.3 \times 10^3$ | $5.5 \times 10^4$ | $6.0 \times 10^3$ | 7.6 | 10.8 |
| 35 | р. Ая, выше моста | $2.4 \times 10^4$ | $2.0 \times 10^5$ | $6.7 \times 10^3$ | 8.4 | 3.3 |
| 20 | р. Ая, ниже моста | $7.3 \times 10^3$ | $5.6 \times 10^4$ | $9.5 \times 10^3$ | 7.6 | 17.0 |
| 10 | р. Мучке, выше озера | $4.2 \times 10^2$ | $7.4 \times 10^3$ | $2.7 \times 10^2$ | 17.5 | 3.5 |
| 6 | оз. Мучке, левый берег | $0.8 \times 10^2$ | $3.3 \times 10^3$ | $0.03 \times 10^2$ | 4.2 | 1.0 |
| 8 | оз. Мучке, правый берег | $0.9 \times 10^2$ | – | $0.1 \times 10^2$ | – | – |
| 7 | протока Мучке | $8.7 \times 10^2$ | $2.4 \times 10^3$ | $2.6 \times 10^2$ | 2.8 | 10.5 |
| 2 | бух. Мучке | $0.7 \times 10^2$ | $1.2 \times 10^2$ | $0.1 \times 10^2$ | 1.6 | 8.6 |
| 3 | То же | $0.3 \times 10^2$ | $0.4 \times 10^2$ | – | 1.3 | – |

превышала сотен КОЕ/мл. Их доля в сообществе гетеротрофов составляла от 1 до 10%.

В табл. 3 представлены данные по содержанию ЛОС в воде малых рек Татарского пролива в период ледостава. В исследованных пробах воды обнаружены соединения различных классов: одноатомные спирты алифатического строения – метанол, бутанол, изопропанол; эфиры уксусной кислоты – этилацетат, метилацетат, бутилацетат; альдегиды – ацетальдегид; кетоны – ацетон. Наиболее растворимы в воде ацетальдегид, ацетон, метанол. Слаборастворимые соединения – этилацетат, бутилацетат – обнаруживались в малых количествах. Эти компоненты в природе зачастую являются продуктами микробного синтеза как конечного, так и промежуточного окисления. Бутанол и ацетон – продукты ацетоно-бутилового брожения. Метанол образуется в процессе метанового брожения органических веществ с последующим гидроксилированием метана. Данные процессы трансформации метана могут осуществлять многие представители метанотрофных бактерий [15], в частности бактерии сем. *Methylocystaceae* и *Proteobacteria* [14]. При этом установлено, что процессы метаногенеза и биодеструкции метана более интенсивно протекают в водной толще и ДО барьерных зон река–море по сравнению с морскими акваториями [11, 46].

Среди веществ антропогенного генезиса, сопутствующих нефтяному загрязнению, в речной воде обнаружены гексан, толуол, бензол. Гексан в достаточно высоких концентрациях (0.770 мг/дм$^3$) выявлен только в воде р. Токи. Следовые количества толуола присутствовали во всех водотоках, а бензола – только в воде р. Ая. Из продуктов микробиологического брожения наиболее распространенным был метанол, его содержание в воде рек варьировало существенно – от 0.07 до 0.70 мг/дм$^3$ при максимальном превышении (7 ПДК) в воде р. Ая. Содержание ацетона было ниже ПДК и составляло 0.020–0.060 мг/дм$^3$.

В табл. 4 представлены данные по содержанию ЛОС в воде приустьевой части р. Токи в период ледостава. В подледной воде оз. Токи (ст. 17) концентрация гексана была значительно ниже таковой в речной воде и составляла 0.005 мг/дм$^3$. В озерной воде отмечался значительный (в 42.5 раз) рост концентрации ацетальдегида (0.85 мг/дм$^3$), обнаруживался бутилацетат – продукт масляно-кислого брожения, в 5 раз по сравнению с пресной водой увеличивалась концентрация изопропилбензола, что свидетельствует об активизации процессов трансформации углеводородных субстратов в условиях увеличения солености. Вместе с тем превышения рыбохозяйственных нормативов в воде эстуария р. Токи не выявлено, за исключением ацетальдегида, концентрация которого в воде оз. Токи составляла 3.4 ПДК.

Пространственное распределение ЛОС в эстуарии р. Мучке было неравномерным (табл. 5). Наименьшее разнообразие компонентов и их низкие концентрации наблюдались в воде левобережной части оз. Мучке. Здесь концентрации выявленных ЛОС существенно не отличались от таковых в речной воде (ст. 10), за исключением гексана, который обнаруживался в концентрации 0.062 мг/дм$^3$ только у левого берега озера. Наибольшим разнообразием компонентов отлича-

**Таблица 3.** Содержание ЛОС в воде малых рек в период ледостава (прочерк – не обнаружено)

| Компоненты, мг/дм$^3$ | р. Дюанка, ст. 40 | р. Токи, ст. 19 | р. Ая, ст. 35 | р. Мучке, ст. 10 | ПДК$_{рх}$, мг/дм$^3$ [21] | Класс опасности |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ацетальдегид | – | 0.020 | – | – | 0.250 | 4 |
| Ацетон | 0.030 | 0.020 | 0.060 | 0.022 | 0.050 | 3 |
| Бензол | – | – | 0.001 | – | 0.500 | 4 |
| Бутанол | – | 0.010 | 0.010 | – | 0.003 | 4 |
| Бутилацетат | 0.002 | – | 0.003 | 0.008 | 0.300 | 4 |
| Гексан | – | 0.770 | 0.020 | – | 0.500 | 3 |
| Изопропилбензол | 0.010 | 0.001 | 0.001 | 0.050 | 1.400 | 4 |
| Метанол | 0.070 | 0.160 | 0.700 | 0.144 | 0.100 | 4 |
| *м*-Ксилол | 0.020 | 0.002 | 0.001 | 0.092 | – | 3 |
| *о*-Ксилол | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.050 | 3 |
| *п*-Ксилол | – | 0.004 | – | – | 0.005 | 3 |
| Толуол | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.500 | 3 |
| Этилацетат | – | – | 0.010 | – | 0.200 | 4 |
| Этилбензол | – | 0.002 | 0.002 | – | 0.001 | 3 |
| Сумма ЛОС | 0.134 | 0.991 | 0.81 | 0.318 | | |

лась вода, отобранная в правобережной части оз. Мучке, прилегающей к территории нефтехранилища. Здесь выявлены самые высокие концентрации продуктов спиртового и маслянокислого брожения этилацетата, метанола, изопропанола, бутанола и изобутанола, бутилацетата. Так, превышение рыбохозяйственных нормативов составило по изопропанолу 180 ПДК, по метанолу 137 ПДК, по бутанолу 80 ПДК, по этилацетату 5.4 ПДК. Среди углеводородов в концентрациях ≤ ПДК присутствовали бензол и толуол. Содержание *о*-ксилола было на уровне 12.6 ПДК, *п*-ксилола – 4.2 ПДК, что свидетельствует об антропогенном нефтяном загрязнении водной среды. Загрязнение нефтепродуктами вод озера может происходить за счет грунтовых вод, дренирующих близлежащую территорию нефтехранилища и подпитывающих озеро в зимний период.

В воде протоки, соединяющей озеро с бухтой, содержание указанных компонентов снижается: этилацетата – на порядок, метанола – в 3, бензола – в 5, толуола – в 4.5, а бутилацетата – в 10 раз по сравнению с водой правобережной части оз. Мучке.

В воде бух. Мучке содержание большинства компонентов, присутствующих в правобережной части озера, отсутствовало или было ниже ПДК.

### *Донные отложения*

ДО озер значительно разнообразны (табл. 6). В период ледостава практически вся акватория мелководного оз. Токи, в отличие от оз. Мучке, промерзает до дна, водная фаза между льдом и ДО отсутствует, поэтому исключается миграция веществ из ДО.

Содержание $C_{орг}$ зависело от типа осадков и варьировало от 0.1 до 15.4% при максимальном содержании в илах центральной части оз. Токи и минимальном – в песках бух. Мучке. Относительно высокое (30.8%) содержание ОВ при использовании коэффициента 2 в осадках оз. Токи объясняется неполной деградацией морского

**Таблица 4.** Содержание ЛОС в воде эстуария р. Токи в период ледостава (прочерк – не обнаружено)

| Компоненты, мг/дм$^3$ | Станции отбора проб | | |
|---|---|---|---|
| | 32 | 15 | 17 |
| Ацетальдегид | 0.010 | – | 0.850 |
| Ацетон | 0.040 | 0.050 | 0.010 |
| Бутанол | 0.010 | – | – |
| Бутилацетат | – | – | 0.003 |
| Гексан | 0.030 | 0.001 | 0.005 |
| Изопропилбензол | – | 0.002 | 0.010 |
| Метанол | – | 0.130 | – |
| *м*-Ксилол | 0.001 | 0.006 | 0.020 |
| *о*-Ксилол | 0.001 | 0.006 | 0.001 |
| *п*-Ксилол | – | 0.002 | – |
| Толуол | 0.140 | 0.001 | 0.001 |
| Этилацетат | 0.200 | – | – |
| Этилбензол | – | 0.003 | – |
| ∑ЛОС | 0.432 | 0.201 | 0.900 |

**Таблица 5.** Содержание ЛОС в воде эстуария р. Мучке в период ледостава (прочерк – не обнаружено)

| Компоненты, мг/дм$^3$ | оз. Мучке, левый берег | оз. Мучке, правый берег | прот. Мучке | бух. Мучке |
|---|---|---|---|---|
| | ст. 6 | ст. 8 | ст. 7 | ст. 2 |
| Ацетальдегид | – | – | 0.033 | 0.038 |
| Ацетон | 0.024 | 0.059 | 0.070 | 0.015 |
| Бензол | – | 0.347 | 0.069 | – |
| Бутанол | – | 0.240 | 0.081 | – |
| Бутилацетат | – | 0.349 | 0.033 | – |
| Гексан | 0.062 | – | – | – |
| Изобутанол | – | 0.830 | 0.145 | – |
| Изопропанол | – | 1.804 | – | – |
| Изопропилбензол | 0.001 | 0.083 | 0.023 | 0.212 |
| Метанол | 0.120 | 13.760 | 4.754 | 0.250 |
| Метилацетат | – | 0.115 | – | – |
| *м*-Ксилол | – | 0.059 | 0.037 | – |
| *о*-Ксилол | 0.008 | 0.628 | 0.057 | 0.002 |
| *п*-Ксилол | – | 0.021 | 0.013 | – |
| Толуол | 0.268 | 0.214 | 0.059 | 0.002 |
| Этилацетат | – | 1.066 | 0.155 | 0.012 |
| Этилбензол | – | 0.026 | 0.025 | – |
| Сумма ЛОС | 0.483 | 19.601 | 5.554 | 0.531 |

**Таблица 6.** Физико-химическая характеристика ДО эстуариев рек Токи и Мучке

| № станции | Место отбора | Описание грунта | $C_{орг}$, % | УВ, мг/дм$^3$ | УЭП, μS/см | pH | *S*, епс |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | оз. Токи, центр | Черный ил с включениями растительных остатков | 15.4 | 0.768 | $5.6 \times 10^3$ | 5.33 | 3.0 |
| 9 | оз. Токи, левый берег | Черный песчанистый ил пастообразной консистенции | 6.7 | 1.430 | $6.5 \times 10^3$ | 5.16 | 3.55 |
| 7 | На выходе из оз. Токи | Илистый песок черного цвета | 2.4 | 0.010 | $9.6 \times 10^3$ | 3.68 | 5.33 |
| 26 | На выходе из оз. Мучке | Серый мелкий песок | 0.1 | 0.022 | 328 | 6.21 | 0.08 |
| 25 | бух. Мучке | То же | <0.1 | 0.010 | $3.4 \times 10^3$ | 5.81 | 1.76 |

растительного материала, привнесенного приливными течениями и штормами в период открытой воды и аккумулированного в ДО.

Содержание УВ также значительно варьировало в зависимости от типа ДО: максимальное содержание УВ выявлено в песчанистом иле левобережной части оз. Токи на ст. 9, минимальное – в илистом песке на ст. 7. Величина pH водной вытяжки ДО варьировала от 3.68 до 5.81, т.е. среда кислая, что характерно для восстановительных условий в ДО. Соленость водной вытяжки варьировала от 0.08 епс в осадках оз. Мучке до 5.33 епс в оз. Токи. Минимальная величина УЭП – у вытяжки из ДО оз. Мучке с самыми низкими соленостью и содержанием ОВ.

Численность (КОЭ/см$^3$) культивируемых аэробных ГБ в осадках варьировала от десятков до сотен тысяч (табл. 7). Максимальные ее показатели выявлены в ДО оз. Мучке; в ДО оз. Токи, независимо от типа ДО, численность ГБ была 33.3 тыс. КОЭ/см$^3$. Доля НОБ в сообществе гетеротрофов составляла от 6 до 51%, а их численность была на уровне таковой у группы СБ, что указывает на достаточно высокий потенциал микробного сообщества к деструкции УВ. Известно, что даже в холодноводных морях Арктики и Антарктики отмечается высокое разнообразие

**Таблица 7.** Численность микроорганизмов в ДО эстуариев рек Токи и Мучке (прочерк – не определяли)

| № станции | Место отбора | Численность микроорганизмов, КОЕ/см$^3$ | | | ГБ/СБ | НОБ/ГБ, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | СБ | ГБ | НОБ | | |
| 3 | оз. Токи, центр | $1.7 \times 10^4$ | $3.3 \times 10^4$ | $2.0 \times 10^3$ | 2.0 | 6.0 |
| 9 | оз. Токи, левый берег | $1.3 \times 10^4$ | $3.3 \times 10^4$ | $3.0 \times 10^3$ | 2.5 | 9.0 |
| 7 | На выходе из оз. Токи | $1.7 \times 10^4$ | $3.3 \times 10^4$ | $1.7 \times 10^4$ | 2.0 | 51.0 |
| 26 | На выходе из оз. Мучке | $5.7 \times 10^4$ | $3.2 \times 10^5$ | $2.3 \times 10^4$ | 5.5 | 7.2 |
| 25 | бух. Мучке | $5.0 \times 10^2$ | – | $3.3 \times 10^2$ | – | – |

**Таблица 8.** Содержание ЛОС в ДО эстуариев рек Токи и Мучке (прочерк – не обнаружено)

| Компоненты, мг/дм$^3$ | р. Токи | | | р. Мучке | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 3 | 7 | 9 | 25 | 26 |
| Ацетальдегид | 0.450 | 0.400 | 0.640 | 0.012 | 0.031 |
| Ацетон | 0.080 | 0.120 | 0.260 | 0.035 | – |
| Бензол | – | 0.001 | – | – | 0.017 |
| Бутанол | – | 0.050 | – | 0.133 | – |
| Бутилацетат | – | 0.020 | – | 0.096 | 0.059 |
| Гексан | 0.040 | – | 0.015 | 0.172 | 0.151 |
| Изобутанол | – | – | – | – | 0.224 |
| Изопропилбензол | 0.006 | – | – | 0.005 | 0.203 |
| Метанол | 0.320 | 0.500 | 0.360 | 0.785 | 1.497 |
| *м*-Ксилол | 0.020 | – | 0.002 | 0.010 | 0.012 |
| *о*-Ксилол | 0.002 | 0.001 | 0.004 | 0.002 | 0.011 |
| *п*-Ксилол | – | – | – | – | 0.020 |
| Толуол | 0.002 | 0.002 | 0.001 | 0.004 | 0.054 |
| Этилацетат | – | 0.010 | 0.003 | 0.044 | – |
| Этилбензол | – | – | – | | 0.024 |
| Сумма ЛОС | 0.920 | 1.104 | 1.285 | 1.298 | 2.303 |

микробных популяций, способных к деструкции широкого спектра углеводородных соединений [42, 49].

Суммарное содержание ЛОС и их состав в ДО озер Токи и Мучке различно. Так, в ДО оз. Токи доминировали ЛОС преимущественно природного происхождения (метанол, ацетальдегид). В ДО оз. Мучке (ст. 26) количественно преобладали ЛОС антропогенного происхождения – бензол, толуол, этилбензол, ксилолы, гексан, изобутанол, изопропилбензол (табл. 8). Эти соединения фиксировались и в водной среде у правого берега оз. Мучке, и в протоке (табл. 5), что говорит о вкладе нефтехранилища в загрязнение вод и ДО прилегающей акватории.

Содержание в ДО водорастворимых компонентов существенно не отличалось от такового в воде, а концентрации отдельных веществ были даже ниже, чем в воде (табл. 5, 8). Так, в ДО оз. Мучке содержание метанола было почти на порядок ниже, чем в равном объеме воды. Наиболее растворимые в воде идентифицированные ароматические углеводороды – ксилолы – были обнаружены в ДО в количествах ≤0.004 мг/дм$^3$. Относительно хорошо растворимые в воде бензол и толуол, а также эфиры этилацетат и бутилацетат обнаруживались в отдельных случаях и в умеренных концентрациях (≤0.1 мг/дм $^3$). Это может свидетельствовать об интенсивном выносе всех легкорастворимых компонентов из ДО в водную среду.

Поскольку подавляющее большинство идентифицированных в ДО соединений – вещества нерастворимые или слаборастворимые в воде, можно сделать вывод о том, что в ДО и в воде они присутствуют в составе нефтяных микропленок или эмульсий и, соответственно, мигрировать между грунтовыми водами, ДО и водами озер бу-

дут именно в виде водных эмульсий, а не истинных растворов [3]. Это также подтверждается идентичностью качественного состава летучих соединений воды и ДО.

Рассматривая изменение относительного содержания отдельных групп ЛОС в воде и ДО различных участков устьевых областей малых рек, следует отметить, что связь между содержанием $C_{орг}$, УВ, а также качественным и количественным составом идентифицированных ЛОС не прослеживалась. Можно также предположить, что заметный вклад в накопление ЛОС как промежуточных продуктов биодеструкции на озерных участках могут вносить запасы ОВ, которые в восстановительных условиях способствуют связыванию и консервации УВ в ДО. Трансформация УВ в ДО в подледный период, вероятнее всего, протекает в условиях соокисления с легкодоступным ОВ эстуариев. В первую очередь, микробиологической трансформации подвергаются углеводороды линейного строения – *н*-алканы, в том числе метан. Микроорганизмы, обладающие способностью к их трансформации, достаточно широко распространены в эстуарных экосистемах. Так, у двух из семи штаммов, изолированных из ДО эстуариев Карского моря, были детектированы гены алкангидроксилазы, ответственные за деградацию широкого спектра алканов [13]. Относительно высокое содержание метанола в воде и ДО указывает на активно протекающие процессы окисления метана. Известно, что некоторые микроорганизмы способны окислять метан в экстремальных условиях низкой температуры и при низких значениях pH, характерных для восстановительных условий [33].

## ВЫВОДЫ

Состав и содержание органических веществ в воде и ДО устьевых участков приливных рек в период ледостава определяется внутриводоемными процессами. Преобладающий источник ЛОС – автохтонное и аллохтонное ОВ, аккумулированное в ДО приустьевых озер в период вегетации, на это указывает количественное доминирование в составе ЛОС продуктов микробиологической трансформации растительного материала.

Влияние загрязнения оз. Мучке нефтепродуктами проявляется в расширении спектра идентифицированных ингредиентов и увеличении их концентраций в воде и ДО по сравнению с оз. Токи.

Распределение компонентов между водной средой и ДО в малых эстуариях относительно равномерно за счет отсутствия в период ледостава процессов испарения и выноса приливо-отливными течениями.

Использование данных по содержанию ЛОС в воде и ДО в период ледостава в качестве фоновых может быть альтернативой применяемой в настоящее время оценке состояния водных объектов путем сопоставления имеющихся концентраций с фоновым содержанием загрязняющих веществ в данном районе.

Авторы выражают благодарность Г.М Филипповой (Межрегиональный центр экологического мониторинга гидроузлов при ИВЭП ДВО РАН) и С.И. Левшиной (ИВЭП ДВО РАН) за помощь в выполнении анализов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агатова А.И., Аржанова Н.В., Лапина Н.М., Торгунова Н.И., Красюков Д.В.* Пространственно-временна́я изменчивость органического вещества в прибрежных экосистемах Кавказского шельфа Черного моря // Океанология. 2005. Т. 45. № 4. С. 670–677.
2. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1962. 491 с.
3. *Баженова О.К., Бурмин Ю.К., Соколов Б.А., Хаин В.Е.* Геология и геохимия нефти и газа. М.: МГУ, 2004. С. 144–181.
4. *Бельчикова Н.П.* Определение гумуса почвы по методу И.В. Тюрина // Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. С. 56–62.
5. *Виноградов М.Е., Шушкина Э.А.* Функционирование планктонных сообществ эпинелагиали океана. М.: Наука, 1987. 240 с.
6. *Гаретова Л.А.* Эколого-микробиологическая оценка лососевых рек Хабаровского края // Изв. ТИНРО. 2009. Т. 157. С. 175–181.
7. *Гаретова Л.А., Левшина С.И., Фишер Н.К., Сиротский С.Е., Шестеркин В.П.* Распределение органического вещества, фитопигментов и гетеротрофных бактерий вдоль градиента солености в эстуариях малых рек бассейна Татарского пролива // Изв. ТИНРО. 2016. Т. 184. С. 219–235.
8. *Гаретова Л.А., Фишер Н.К., Климин М.А.* Источники органического вещества в донных отложениях эстуариев малых рек бассейна Татарского пролива // Биология внутренних вод. 2020. № 3. С. 211–221.
9. *Каретникова Е.А. Гаретова Л.А.* Пространственно-временное распределение бактериопланктона и бактериобентоса в Амурском лимане и прилегающих морских акваториях // Океанология. 2015. Т. 55. № 5. С. 776–786.
10. *Кузнецов С.И., Дубинина Г.А.* Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 228 с.
11. *Леин А.Ю., Пименов Н.В., Русанов И.И., Павлова Г.А., Саввичев А.С., Верховская З.И.* Цикл метана в Баренцевом море // Литология и полез. ископаемые. 2008. № 5. С. 455–479.
12. *Лисицын А.П.* Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
13. *Мамаева Е.В., Галачьянц Ю.П., Хабудаев К.В., Петрова Д.П., Погодаева Т.В., Ходжер Т.В., Земская Т.И.* Метагеномный анализ микробных сообществ донных осадков шельфа Карского моря и Енисейско-

го залива // Микробиология. 2016. Т. 85. № 2. С. 187–198.

14. *Мамаева Е.В., Суслова М.Ю., Погодаева Т.В., Парфенова В.В., Земская Т.И.* Микробное некультивируемое сообщество осадков Гыданской губы и Енисейского залива Карского моря // Океанология. 2014.Т. 54. № 3. С. 338–348.
15. *Намсараев Б.Б., Русанов И.И., Мицкевич И.Н., Веслополова Е.Ф., Большаков А.М., Егоров А.В.* Бактериальное окисление метана в эстуарии реки Енисей и Карском море // Океанология. 1995. Т. 35. № 1. С. 88–93.
16. *Никаноров А.М., Брызгало В.А.* Антропогенная нагрузка на устьевые области рек Дальнего Востока в современных условиях // Вода: химия и экология. 2012. № 2. С. 11–17.
17. *Одинцова Т.А.* Разработка технологии идентификации и мониторинга нефтяных загрязнений. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь: Горный ин-т УрО РАН, 2010. 21 с.
18. ПНД Ф 16.1:2.2.22-98. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органогенных, органно-минеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектрометрии. М., 2005. 21 с.
19. ПНДФ 14.1:2:4.201-03. Методика выполнения измерений массовой концентрации ацетона и метанола в пробах питьевых, природных и сточных вод газохроматографическим методом. М., 2003. 17 с.
20. ПНДФ 14.1:2:4.57-96. Методика выполнения измерений массовых концентраций ароматических углеводородов в питьевых, природных и сточных водах газохроматографическим методом. М., 2011. 18 с.
21. Приказ министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 года № 552 “Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения”.
22. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 18. Дальний Восток. Вып. 3. Приморье. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 627 с.
23. *Суслова М.Ю., Липко И.А., Мамаева Е.В., Парфенова В.В.* Разнообразие культивируемых бактерий, выделенных из водной толщи и донных осадков шельфа Карского моря // Микробиология. 2012. Т. 81. № 4. С. 524–531.
24. *Форина Ю.А., Шестеркин В.П.* Особенности гидрохимического состава пресных вод восточного макросклона Северного Сихотэ-Алиня // География и природ. ресурсы. 2010. № 3. С. 81–87.
25. *Astrahan P.* Monocyclic aromatic hydrocarbons (phthalates and BTEX) and aliphatic components in the SE Mediterranean costal Sea-surface microlayer (SML): Origins and phase distribution analysis // Mar. Chem. 2018. V. 205. P. 56–69.
26. *Barbier E.B., Hacker S.D., Kennedy C., Koch E.W., Stier A.C., Silliman B.R.* The value of estuarine and coastal ecosystem services // Ecol. monographs. 2011. V. 81. Iss. 2. P. 169–193.
27. *Bravo-Linares C.M., Mudge S.M.* Analysis of volatile organic compounds (VOCs) in sediments using in situ SPME sampling // J. Environ. Monit. 2007. V. 9. Iss. 5. P. 411–418.
28. *Bravo-Linares C.M., Mudge S.M.* Temporal trends and identification of the sources of volatile organic compounds in coastal seawater // J. Environ. Monit. 2009. V. 11. Iss. 3. P. 628–641.
29. *Bruyn W.J., Clark C.D., Pagel L., Takahara C.* Photoproduction of formaldehyde, acetaldehyde and acetone from chromophoric dissolved organic matter in coastal and estuarine waters // J. Photochem. Photobiol., A. Chem. 2011. V. 226. Iss. 1. P. 16–22.
30. *Callaway R., Grenfell S., Lonborg Ch.* Small estuaries: Ecology, environmental drivers and management challenger // Estuar. Coast. Shelf Sci. 2014. V. 150. P. 193–195.
31. *Cao B., Nagarajan K., Loh K.* Biodegradation of aromatic compounds: current status and opportunities for biomolecular approaches // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2009. V. 85. Iss. 2. P. 207–228.
32. *Coble A.A., Marcarelli A.M., Kane E.S., Toczydlowski D., Stottlemyer R.* Temporal patterns of dissolved organic matter biodegradability are similar across three rivers of varying size // J. Geophys. Res.: Biogeosci. 2016. V. 121. Iss. 6. P. 1617–1631.
33. *Dunfield P.F., Yuryev A., Senin P., Smirnova A.V., Stott M.B., Hou S., Ly B., Saw J.H., Zhou Z., Ren Y., Wang J., Mountain B.W., Crowe M.A., Weatherby T.M., Bodelier P.L.E., Liesack W., Feng L., Wang L., Alam M.* Methane oxidation by an extremely acidophilic bacterium of the phylum Verrucomicrobia // Nature. 2007. V. 450. P. 879–882.
34. *Giudice A.L., Bruni V., Domenico M.D., Michaud L.* Psychrophiles – cold-adapted hydrocarbon-degrading microorganisms // Handbook of hydrocarbon and lipid microbiology / Ed. *Timmis K.N.* Pondicherry: SPI-Publishing, 2010. P. 1897–1921.
35. *Ifelebuegu A.O., Ukpebor J.E., Ahukannah A.U., Nnadi E.O., Theophilus S.C.* Environmental effects of crude oil spill on the physicochemical and hydrobiological characteristics of the Nun River, Niger Delta // Environ. Monit. Assess. 2017. V. 189. Article number 173.
36. *Jickells T.D., Andrews J.E., Parkes D.J., Suratman S., Aziz A.A., Hee Y.Y.* Nutrient transport through estuaries: the importance of the estuarine geography // Estuar. Coast. Shelf Sci. 2014. V. 150. P. 215–229.
37. *König G., Brunda M., Puxbaum H., Hewitt C.N., Duckham S.C., Rudolph J.* Relative contribution of oxygenated hydrocarbons to the total biogenic VOC emissions of selected mid-European agricultural and natural plant species // Atmos. Environ. 1995. V. 29. Iss. 8. P. 861–874.
38. *Lin C., Nguyen K.A., Vu C.T., Senoro D., Villanueva M.C.* Contamination levels and potential sources of organic pollution in an Asian river // Water Sci. Technol. 2017. V. 76. Iss. 9. P. 2434–2444.
39. *Little S., Spencer K.L., Schuttelaars H.M., Millward G.E., Elliott M.E.* Unbounded boundaries and baselines: estuaries and coastal seas in rapidly changing world // Estuar. Coast. Shelf Sci. 2017. V. 198. P. 311–319.

40. *Magoro M.L., Perissinotto R., Wooldridge T.H., Whitfield A.K.* Micro-estuaries and micro-outlets as incipient estuarine systems – Does size and coastal connectivity count? // Sci. Total Environ. 2020. V. 703. 134707.

41. *Pérez-Pantoja D., González B., Pieper D.H.* Aerobic degradation of aromatic hydrocarbons // Handbook of hydrocarbon and lipid microbiology / Ed. *K.N. Timmis.* Pondicherry: SPI-Publishing, 2010. P. 799–837.

42. *Perreault N.N., Andersen D.T., Pollard W.H., Greer C.W., Whyte L.G.* Characterization of the prokaryotic diversity in cold saline perennial springs of the Canadian high Arctic // Appl. Environ. Microbiol. 2007. V. 73. P. 1532–1543.

43. *Pye K., Blott S.J.* The geomorphology of British estuaries: the effects of geological controls, antectdent conditions and human activities // Estuar. Coast. Shelf Sci. 2014. V. 150. P. 196–214.

44. *Roebuck J.A., Avery G.B., Felix J.D., Kieber R.J., Mead R.N., Skrabal S.A.* Biogeochemistry of ethanol and acetaldehyde in freshwater sediments // Aquat. Geochem. 2016. V. 22. Iss. 3. P. 177–195.

45. *Statham P.J.* Nutrients in estuaries – An overview and the potential impacts of climate change // Sci. Total Environ. 2012. V. 434. P. 213–227.

46. *Upstill-Goddard R.C., Barnes J.* Methane emissions from UK estuaries: re-evaluating the estuarine source of tropospheric methane from Europe // Mar. Chem. 2016. V. 180. P. 14–23.

47. *Vergeynst L., Wegeberg S., Aamand J., Lassen P., Gosewinkel U., Fritt-Rasmussen J., Gustavson K., Mosbech A.* Biodegradation of marine oil spills in the Arctic with a Greenland perspective // Sci. Total Environ. 2018. V. 626. P. 1243–1258.

48. *Yu Y.-J., Li C.-Y., Shen W., Wang Z., Xu P.-Q., Yu H.-X.* Volatile compounds released by microalgae-water phase from Taihu Lake in China // Harmful Algae. 2019. V. 84. P. 56–63.

49. *Zeng Y., Zou Y., Chen B., Grebmeier J.M., Li H., Yu Y., Zheng T.* Polar biology phylogenetic diversity of sediment bacteria in the northern Bering Sea // Polar. Biol. 2011. V. 34. P. 907–919.

*ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, 2021, том 48, № 5, с. 568–577*

## ГИДРОХИМИЯ, ГИДРОБИОЛОГИЯ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

*УДК 556.532;556.512*

# СОВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ДИНАМИКА БАЛАНСА БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В БАССЕЙНЕ РЕКИ КУДЬМЫ 2. СЕЗОННЫЙ ВЫНОС АЗОТА И ФОСФОРА[1]

**© 2021 г. С. В. Долгов[a], *, Н. И. Коронкевич[a], ****

[a] *Институт географии РАН, Москва, 119017 Россия*

**e-mail: svdolgov1978@yandex.ru*

***e-mail: hydro-igras@yandex.ru*

Поступила в редакцию 20.12.2019 г.
После доработки 01.12.2020 г.
Принята к публикации 21.01.2021 г.

На примере р. Кудьмы, притока Чебоксарского водохранилища, оценен вклад поверхностной и подземной составляющих стока, стока верховодки в диффузный вынос минерального азота и фосфора с речных водосборов в северной части лесостепной зоны в бассейне Волги. Показано, что роль элементов водного баланса в выносе биогенных веществ существенно меняется по сезонам года и в многолетнем плане. Определено соотношение в нем атмосферной и ландшафтной составляющих. Установлено, что за счет возросшей роли изменившихся гидроклиматических условий, особенно увеличения стока инфильтрационного происхождения (подземного и верховодки) сток биогенов в последние годы существенно вырос. Предложены перспективные направления дальнейшего изучения выноса биогенных веществ с речных водосборов.

*Ключевые слова:* сезонный вынос азота и фосфора, поверхностная и подземная составляющие стока, изменения.

**DOI:** 10.31857/S0321059621050096

## ВВЕДЕНИЕ

Цель выполненного исследования заключается в выявлении особенностей внутригодового распределения выноса биогенов с поверхностным и подземным стоком с речных водосборов в северной части лесостепной зоны в бассейне Волги и в оценке современных его изменений на примере р. Кудьмы.

В 1-й части статьи [3] рассмотрены методические особенности оценки влияния вертикальной гидрологической структуры речного бассейна на миграцию биогенных веществ. Определены основные составляющие годового воднобиогенного баланса бассейна р. Кудьмы с характерной для северной части лесостепной зоны ландшафтной структурой. Выявлена роль природных и антропогенных факторов в поступлении биогенов на водосбор р. Кудьмы. Оценен вклад атмосферных осадков, поверхностной и подземной составляющих стока в годовой вынос биогенов в Чебоксарское водохранилище. Определено соотношение атмосферной и ландшафтной составляющих в выносе биогенов. Показано, что за счет изменившихся гидроклиматических условий, приведших к уменьшению поверхностного стока с водосбора р. Кудьмы и значительному увеличению подземного стока, диффузный вынос азота и фосфора за последние годы существенно вырос.

В данной части статьи представлены результаты оценки и анализа основных составляющих воднобиогенного баланса за отдельные сезоны – весеннее половодье, маловодные сезоны холодного и теплого периодов года.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Методологической основой выполненного исследования послужили представления о высотно-пространственной дифференциации речного бассейна, инструмент изучения гидрохимического функционирования ее элементов, в частности воднобиогенный баланс [1]. Использованы также результаты оценки зональной средней многолетней структуры стока половодья, полученные в работе [5] путем привязки данных воднобалансовых

[1] Статья подготовлена по материалам исследований в рамках Государственного задания (тема 0148-2019-0007, разработка методики) и РНФ (проект 20-17-00209, расчеты и обобщение результатов).

и стоковых стационаров к зональной величине стока половодья на реках Русской равнины.

В данной статье исследуется как полный речной сток р. Кудьмы, так и выделенные по видам питания на его гидрографах поверхностная и подземная составляющие. Поверхностная составляющая стока (включая сток верховодки) определена по разности полного речного и подземного стока. Сток верховодки и сток с площади гидрографической сети рассчитаны по зональной средней многолетней структуре стока половодья, установленной в работе [5].

Для расчета выноса биогенов в реку с составляющими водного стока в связи с отсутствием данных экспериментальных наблюдений приняты следующие допущения.

1. Как и в 1-й части статьи, в связи с тем, что до 1975 г. наблюдения за концентрацией аммонийного азота и фосфатов не проводились, их содержание принято одинаковым для всего периода инструментальных наблюдений и соответствующим содержанию в анализируемый современный период (2008–2018 гг.).

2. По данным Росгидромета, в суммарном речном стоке средняя многолетняя концентрация азота минерального в половодье $C_{\text{реч ст}}$ составила 1.58 и фосфора 0.055 мг/л. В подземной составляющей стока $C_{\text{подз ст}}$ содержание минерального азота составило 3.52 и фосфора 0.062 мг/л. Оно определено по концентрации биогенных веществ в речном стоке в зимнюю межень. В поверхностной составляющей стока $H_{\text{пов ст}}$ содержание азота $C_{\text{пов ст}}$ равно 1.10, фосфора – 0.053 мг/л. Оно определено по уравнению баланса биогенов в речном стоке для периода половодья:

$$C_{\text{реч ст}}H_{\text{реч ст}} = C_{\text{подз ст}}H_{\text{подз ст}} + C_{\text{пов ст}}H_{\text{пов ст}},$$

в котором $C_{\text{пов ст}}$ – концентрация азота (фосфора) в $H_{\text{пов ст}}$ за период половодья. Тогда

$$C_{\text{пов ст}} = (C_{\text{реч ст}}H_{\text{реч ст}} - C_{\text{подз ст}}H_{\text{подз ст}})/H_{\text{пов ст}}.$$

3. Поскольку поверхностный склоновый сток $H_{\text{скл ст}}$ и сток почвенной верховодки $H_{\text{верх ст}}$ близки по ходу развития, то отделить их друг от друга без специальных экспериментальных исследований не представляется возможным. Поэтому для этих показателей стока принято одинаковое содержание биогенов – соответствующее их концентрации в поверхностной составляющей речного стока в половодье ($C_{\text{скл ст}} = C_{\text{верх ст}} = C_{\text{пов ст}}$).

Что касается территории гидрографической сети (ниже бровок оврагов, балок, речных долин), то здесь, с одной стороны, снегозапасы в среднем в 1.2–1.3 раза больше, чем на склонах [5], а коэффициент стока выше, чем на склонах, – достигает 0.7–0.8. Это способствует разбавлению растворов талых вод, поступающих со склонов, и снижению концентрации в них биогенов. С другой стороны, за счет контакта талых вод с неистощенной под сельскохозяйственной нагрузкой почвой, а также с обычно более высокой, чем на склонах, фитомассой и мортмассой возрастает концентрация биогенов. В связи с отсутствием экспериментальных данных концентрация азота в талых водах на площади гидрографической сети $C_{\text{гидр ст}}$ принята такой же, как в поверхностном стоке со склонов: $C_{\text{гидр ст}} = C_{\text{скл ст}}$.

В качестве исходной информации, наряду с данными Росгидромета, использованы результаты полевого гидрохимического обследования снежного покрова, речных и подземных вод, проведенного Институтом географии РАН (ИГ РАН) с участием авторов перед началом весеннего половодья в 2018 г. Определение содержания биогенных элементов в пробах воды выполнено с помощью портативного спектрофотометра DR/2010 фирмы “HACH” (США) на основе аттестованных в России методик. Концентрация аммонийного азота определялась с использованием реактива Несслера (предел обнаружения, за который принята минимальная определяемая концентрация с вероятностью 99%, – 0.06 мг/л), азота нитритов – с использованием реактива Грисса (0.001 мг/л), азота нитратов – с предварительным восстановлением кадмия до нитритов (0.1 мг/л). Содержание минерального фосфора оценивалось методом определения ортофосфатов и полифосфатов с использованием аскорбиновой кислоты (предел обнаружения – 0.003 мг/л).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### *Вынос биогенов с водосбора р. Кудьмы за период весеннего половодья*

Весеннее половодье по-разному сказывается на водном балансе речного бассейна и балансе в нем биогенов. В этот период ресурсы речного стока значительно увеличиваются, но запасы биогенов в речном бассейне, напротив, уменьшаются за счет вымывания талыми и дождевыми водами из различных элементов его вертикальной гидрологической структуры [1].

Для среднемноголетних условий (по состоянию на середину 1970-х гг.) оценка выноса биогенов выполнена по зональным зависимостям элементов весеннего водного баланса водосбора от речного стока половодья [5]. Если принять среднемноголетний слой стока половодья р. Кудьмы у г. Кстово по данным в створе у д. Новой ($H_{\text{реч ст}}$ = = 64 мм [7]) за 100%, то поверхностный склоновый сток, доходящий до реки, составляет 20, сток с площади гидрографической сети 23, сток верховодки 37 и подземный сток 20% (табл. 1).

Из результатов расчетов, приведенных в табл. 1, следует, что вынос минерального азота со стоком

**Таблица 1.** Вынос минерального азота и фосфора с водосбора р. Кудьмы у г. Кстово за период весеннего половодья с основными элементами водного стока по состоянию на 1975 г.

| Элемент водного стока | мм | Вынос азота | | Вынос фосфора | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | кг/км$^2$ | % | кг/км$^2$ | % |
| Суммарный речной сток | 64 | 101 | 100 | 3.52 | 100 |
| Поверхностный сток с водосбора | 28 | 30.3 | 30 | 1.46 | 41 |
| склоновый | 13 | 14.2 | 14 | 0.68 | 19 |
| с площади гидрографической сети | 15 | 16.1 | 16 | 0.78 | 22 |
| Сток верховодки | 23 | 26.3 | 26 | 1.26 | 36 |
| Подземный сток с водосбора | 13 | 44.5 | 44 | 0.80 | 23 |

в половодье составлял весьма существенную величину – 43% величины его выноса за весь годовой период (фосфора – 55%). Причем наибольший вынос биогенных элементов с водосбора в р. Кудьму наблюдался со стоком инфильтрационного происхождения (верховодки и подземным) – азота 70 и фосфора 59% суммарного выноса. Вынос азота с поверхностным стоком (склоновым и с площади гидрографической сети) существенно меньше – 30, фосфора – 41%.

### *Соотношение атмосферной и ландшафтной составляющих в выносе азота*

Под атмосферной составляющей понимается поступление азота с осадками из атмосферы, под ландшафтной – обогащение азотом талых вод вследствие вымывания из растительности, почв и грунтов зоны аэрации в различных ландшафтах (угодьях) [2].

За анализируемый период данные о содержании азота в снежном покрове на водосборе р. Кудьмы отсутствуют, но есть основания полагать, что в многолетнем разрезе оно меняется не столь существенно. Так, по результатам экспериментальных работ лаборатории гидрологии ИГ РАН в феврале 2018 г., средняя концентрация азота минерального в снежном покрове в парках и на территориях жилой застройки Москвы составила 1.13 мг/л (12 образцов). Если судить, например, по наблюдениям на метеостанции им. Небольсина (31 км к ЮЗ от центра Москвы) за 1958–1966 гг. [6], она незначительно отличается от концентрации азота в осадках холодного периода за прошлые годы (1.09 мг/л).

Поэтому для расчетов использовались результаты экспериментальных работ ИГ РАН, проведенных в Нижегородской области перед началом весеннего половодья в 2018 г. В ходе этих работ на водосборе р. Кудьмы было отобрано 4 образца снега на лесных участках, 4 на полевых и 7 на урбанизированных (населенные пункты и автодороги). В каждой обследуемой точке снег отбирался по всей его высоте – от поверхности до почвы.

Установлено, что более высокая концентрация биогенных веществ в снеге наблюдается на лесных территориях, чем на сельскохозяйственных угодьях, что обусловлено, вероятно, удержанием части выпавшего снега кронами деревьев, оттепелями и образованием инея. На участках с лесной растительностью средняя концентрация азота в снеге составила 0.48 (фосфора 0.042), на полевых – 0.40 (0.040) и урбанизированных – 0.77 мг/л (0.037 мг/л). Средневзвешенное с учетом ландшафтной структуры водосбора содержание азота в снеге составило 0.435 мг/л (фосфора 0.041 мг/л).

Средние многолетние (1936–1975 гг.) запасы воды в снежном покрове на водосборе р. Кудьмы перед весенним половодьем (вместе с осадками, выпадающими во время половодья) равны 133 мм. В снеге на каждом квадратном километре водосбора содержалось 57.9 кг азота. Из этого количества 11.9 кг азота мигрировало в реку с поверхностным стоком (склоновым и стоком с площади гидрографической сети), составляющим 28 мм (табл. 1). Отсюда следует, что доля осадков (атмосферная составляющая) в выносе азота с поверхностным стоком (30.3 кг/км$^2$) составляет 39%. Ландшафтная составляющая (вымывания азота из почвы, растительности, лесной подстилки) на 22% больше (табл. 2).

В половодье на водосборе р. Кудьмы наблюдался наиболее значительный вертикальный поток азота осадков в почвогрунты зоны аэрации – почти в 4 раза больше, чем в горизонтальном направлении с поверхностным стоком с водосбора. В процессе инфильтрации талых вод в почву (осадки за вычетом поверхностного стока с водосбора, 106 мм) с каждого квадратного километра площади в почвогрунты зоны аэрации поступало 46 кг азота, содержащегося в осадках. Часть этого вертикального потока азота (22% поступившего в почву с осадками) затем перехватывается стоком верховодки и расходуется на вынос с водосбора в горизонтальном направлении (10.3 кг/км$^2$). Отсюда следует, что доля осадков (атмосферная

**Таблица 2.** Атмосферная и ландшафтная составляющие выноса азота минерального с водосбора р. Кудьмы за период весеннего половодья с основными элементами водного баланса (по состоянию на 1975 г.)

| Элемент водного стока | мм | Суммарный вынос азота | Вынос азота из снежного покрова | Атмосферная составляющая | Ландшафтная составляющая |
|---|---|---|---|---|---|
| | | кг/км$^2$ | кг/км$^2$ | % | % |
| Суммарный речной сток | 64 | 101 | 27.9 | 28 | 72 |
| Поверхностный сток с водосбора, | 28 | 30.3 | 11.9 | 39 | 61 |
| склоновый | 13 | 14.2 | 5.6 | 39 | 61 |
| с площади гидрографической сети | 15 | 16.1 | 6.3 | 39 | 61 |
| Сток верховодки | 23 | 26.3 | 10.3 | 39 | 61 |
| Подземный сток с водосбора | 13 | 44.5 | 5.6 | 12 | 88 |

составляющая) в суммарном выносе азота со стоком верховодки (26.3 кг/км$^2$) близка к доле в поверхностном стоке и равна 39%, а на ландшафтную составляющую приходится 61% (табл. 2). Это соотношение получено при допущении о равенстве концентраций биогенов в верховодке и в поверхностном склоновом стоке. Поэтому оно нуждается в дальнейшей корректировке (скорее всего, в сторону увеличения), прежде всего на основе экспериментальных данных.

Осадки, поглощенные почвой в процессе инфильтрации, расходуются затем не только на сток верховодки, но и на пополнение запасов влаги в почвогрунтах зоны аэрации и на испарение. За вычетом перечисленных составляющих водного баланса остальная часть осадков достигает верхних водоносных горизонтов с грунтовыми водами, в которых азот нередко накапливается за счет суммирования потерь его из верхних слоев речного бассейна (растительности, почвы, грунтов зоны аэрации).

Величина инфильтрационного питания грунтовых вод для средних многолетних условий примерно равна величине дренируемого р. Кудьмой подземного стока – 13 мм, вынос с которым азота осадков составляет 5.6 кг/км$^2$. По сравнению с поверхностным стоком и стоком верховодки доля атмосферной составляющей в нем снижается до 12%, а доля ландшафтной составляющей (включающей и азональные гидрогеологические условия), напротив, увеличивается до 88%.

Расчеты для полного речного стока (64 мм) за период половодья показали, что на его формирование расходовалось ~48% величины стокообразующих осадков (133 мм). При этом с одного квадратного километра водосбора в р. Кудьму поступало в среднем 27.9 кг содержащегося в осадках азота, доля атмосферной составляющей в миграции биогенов с полным речным стоком (101 кг/км$^2$) составила 28, а доля ландшафтной составляющей 72%. Причем ~79% (46 кг/км$^2$) всего количества азота в снежном покрове (57.9 кг/км$^2$) с поверхностным стоком (склоновым и стоком с площади гидрографической сети) с водосбора р. Кудьмы не выносилось, а поступало в почвогрунты зоны аэрации и достигало верхних водоносных горизонтов с грунтовыми водами.

Из табл. 2 видно, что не все количество азота (57.9 кг/км$^2$) в снеге выносилось с водосбора р. Кудьмы с различными составляющими речного стока. Если судить по выносу азота из снега с полным речным стоком (27.9 кг/км$^2$), в пределах водосбора оставалось 30 кг/км$^2$; т.е. коэффициент доставки азота, содержащегося в снеге на водосборной площади, к замыкающему створу составляет в среднем ~0.5.

### *Современные тенденции в выносе биогенов в половодье*

За 2008–2018 гг. антропогенная нагрузка существенно снизилась [3] и произошедшие изменения в диффузном выносе биогенов с водосборной площади обусловлены прежде всего климатическими изменениями. В основном вследствие увеличения осадков в холодный период (по данным метеостанции Нижнего Новгорода, на 35%) полный сток половодья (сумма поверхностной и подземной составляющих) р. Кудьмы увеличился относительно нормы на 19%. Подземная составляющая стока в половодье (23% суммарного стока) заметно (на 25%) увеличилась и составляет в последние годы 16 мм. Поверхностная его составляющая (в сумме склоновый сток, сток с площади гидрографической сети и сток верховодки) увеличилась сравнительно мало (лишь на 4%) и равна 53 мм.

По этим изменениям в табл. 3 приведена структура водного стока за последние годы, а также структура стока азота по состоянию на 1975 г. Расчет выноса биогенов выполнен по данным наблюдений Росгидромета (2008–2018 гг.) за кон-

**Таблица 3.** Структура водного стока с водосбора р. Кудьмы и выноса азота за период весеннего половодья за 2008–2018 гг.

| Элемент водного стока | Водный сток | Вынос азота | | Вынос фосфора | |
|---|---|---|---|---|---|
| | мм (%) | кг/км$^2$ | изменение, % | кг/км$^2$ | изменение, % |
| Суммарный речной сток | 69 (100) | 110 | 8 | 3.81 | 8 |
| Поверхностный сток с водосбора | 28 (41) | 28.4 | –6 | 1.50 | 3 |
| склоновый | 13 (19) | 13.2 | –7 | 0.70 | 3 |
| с площади гидрографической сети | 15 (22) | 15.2 | –6 | 0.80 | 3 |
| Сток верховодки | 25 (36) | 24.8 | –6 | 1.32 | 5 |
| Подземный сток с водосбора | 16 (23) | 56.3 | 26 | 0.99 | 24 |

**Таблица 4.** Изменения за 2008–2018 гг. водного стока с водосбора р. Кудьмы и выноса биогенов за маловодный период года (относительно нормы по состоянию на 1975 г.)

| Элемент водного стока | Водный сток | | Вынос азота | | Вынос фосфора | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | мм (%) | изменение, % | кг/км$^2$ (%) | изменение, % | кг/км$^2$ (%) | изменение, % |
| Речной сток | 66 (100) | 31 | 189 (100) | 43 | 3.85 (100) | 35 |
| Поверхностная составляющая стока | 9 (13) | –48 | 44 (23) | –11 | 0.53 (14) | –44 |
| Подземная составляющая стока | 57 (87) | 72 | 145 (77) | 76 | 3.32 (86) | 74 |

центрацией соединений азота в р. Кудьме у г. Кстово. Как и для периода исчисления нормы, содержание азота в подземном стоке принято по результатам химического анализа проб воды, отобранных в зимнюю межень, и равно 3.52 мг/л. Концентрация азота в суммарном речном стоке составила 1.58 мг/л. Содержание азота в поверхностной его составляющей определено по приведенному выше уравнению воднобиогенного баланса; оно равно 1.00 мг/л. Концентрация фосфора для полного стока принята в размере 0.055, для поверхностной его составляющей 0.053 и для подземной составляющей 0.062 мг/л.

Расчеты показали, что в последние годы вынос в половодье биогенных веществ с суммарным стоком вырос на 8%. Произошло это главным образом за счет увеличения выноса его с подземным стоком (азота на 26 и фосфора на 24%). В то же время вынос с поверхностной составляющей стока, включая сток верховодки, изменился не столь заметно – уменьшился на 6–7% для азота и увеличился на 3–5% для фосфора.

В последние годы вынос нитратов вырос на 8%. Причем это минимальная величина, обусловленная лишь изменением водности. Судя по данным о концентрации нитратов в половодье за 1952–1958 гг., приведенным в гидрологических ежегодниках, то вынос нитратов в последние годы значительно увеличился – в 3 раза (с 23.7 до 70.0 кг/км$^2$). Концентрация азота нитратов при этом выросла с 0.37 мг/л и стала равной в среднем 1.01 мг/л.

### *Вынос биогенов с водосбора р. Кудьмы за маловодный период года*

Оценка современного поступления биогенов в реку с водным стоком с водосборной площади выполнена по данным табл. 3 данной статьи и табл. 3 в [3]. Из результатов расчетов (табл. 4) следует, что в течение длительного маловодного периода года (от даты окончания весеннего половодья до даты начала следующего) вынос биогенов с полным речным стоком весьма значительный. Так, вынос азота минерального составляет 63% выноса за весь годовой период, а вынос фосфора 50%. Причем в маловодный период года миграция биогенов в речную сеть проходит главным образом с подземным стоком, вклад которого в вынос с полным речным стоком составляет в этот период по азоту ~77 и по фосфору 86%.

Из табл. 4 следует, что в последние годы вынос биогенных веществ с подземным стоком с водосборной площади в маловодный период года возрос значительно – на 75%. В то же время роль поверхностной составляющей стока в миграции биогенов существенно снизилась (вынос азота при этом уменьшился на 11, а фосфора на 44%). В итоге вынос биогенов с суммарным речным стоком все-таки увеличился (на 35–40%) в основ-

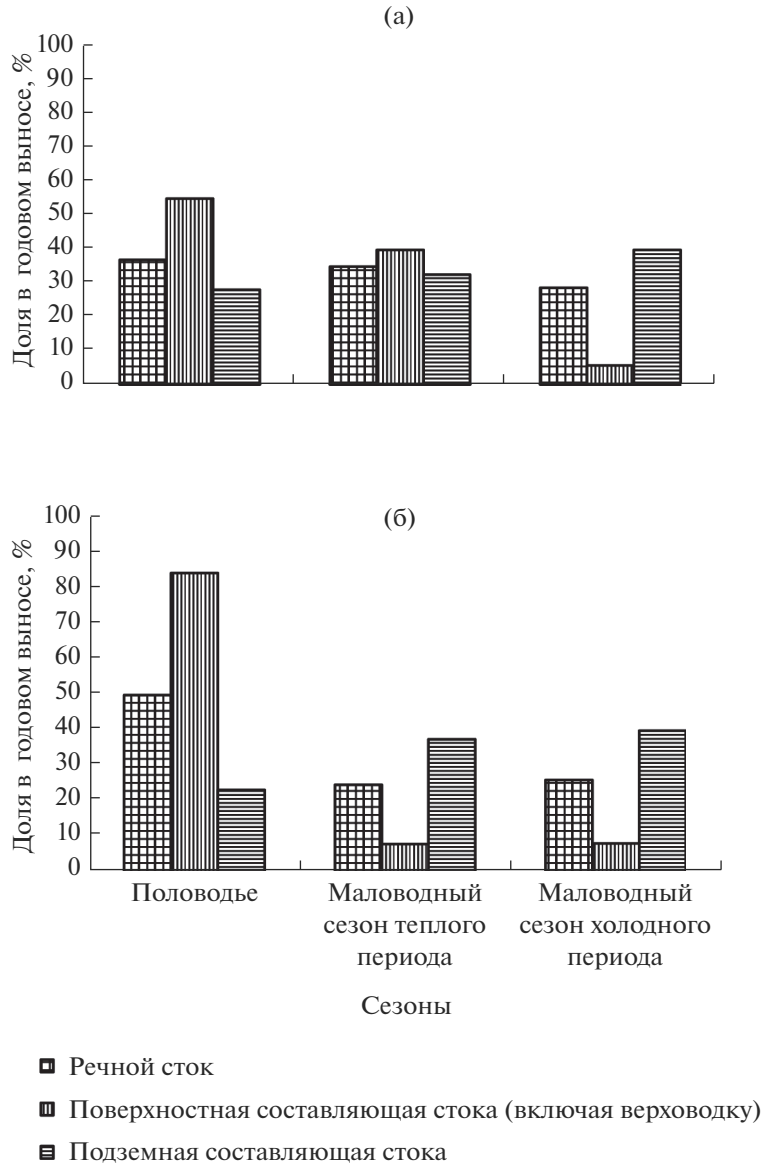


**Рис. 1.** Внутригодовое распределение выноса азота (а) и фосфора (б) со стоком р. Кудьмы и его составляющими.

ном вследствие увеличения величины подземного стока.

Сказанное относится к маловодному периоду в целом. Он включает в себя маловодный сезон теплого периода года (от окончания половодья по октябрь) и маловодный сезон холодного периода (с ноября до начала половодья) с различными условиями формирования водного и химического стока. Результаты расчетов выноса биогенных веществ за эти сезоны, а также за сезон весеннего половодья приведены на рис. 1. Они показали, что вынос азота с суммарным речным стоком сравнительно равномерно распределяется по сезонам года – с максимумом (37% годовой величины выноса) в половодье и с минимумом (29%) в маловодный сезон холодного периода. Вынос азота с поверхностной составляющей стока наибольший в половодье и составляет 55% его годовой величины и резко уменьшается в осенне-зимнюю межень (до 6%). Иная ситуация в отношении подземного стока, вынос азота с которым, напротив, минимален (28%) в половодье и максимален (40%) в межень холодного периода.

В отличие от азота, внутригодовое распределение выноса фосфора с речным стоком неравномерное с максимумом (50% годовой его величины) в сезон половодья и минимумом в летне-осеннюю (25%) и осенне-зимнюю межень (25%). В миграции фосфора более важную роль играет поверхностный сток с водосборной площади (по сравнению с подземным стоком). Наиболее активная миграция фосфора отмечается с поверх-

ностной составляющей стока во время половодья и достигает 84% величины выноса за весь год. С подземным стоком наибольший и примерно одинаковый вынос фосфора наблюдается в маловодные сезоны теплого и холодного периодов года (в сумме 77% годового выноса). В половодье он снижается значительно – до 23%.

### *Перспективы дальнейших ландшафтно-гидрохимических исследований*

Результаты изучения авторами диффузного выноса биогенов в реки и водоемы, особенно в бассейне р. Кудьмы, позволили наметить перспективы дальнейших исследований.

В стоке биогенных веществ, как и в речном стоке, интегрированы различные элементы природных и антропогенных ландшафтов речного бассейна, а также различные элементы их вертикальной структуры (растительность, поверхностный слой почвы, зоны аэрации и насыщения) с разной долей вклада. Поэтому при оценке роли отдельного фактора в его формировании зачастую бывает невозможно исключить влияние других факторов.

Даже при отборе проб талых и дождевых вод, стекающих по поверхности почвы в отдельном элементе ландшафтной структуры (что достаточно широко практикуется), получить в полной мере однородную выборку не всегда удается. Это обусловлено тем, что в отобранных пробах воды содержание биогенов может варьировать по территории в широких пределах в зависимости от количества атмосферных осадков, температуры, при которой образуется анализируемая составляющая водного стока, а также длительности контакта стокообразующих осадков с растительностью, почвогрунтами зоны аэрации и водовмещающими породами в зоне насыщения.

В связи с отсутствием стационарных наблюдений Росгидромета за миграцией биогенных веществ в разных ландшафтах речных водосборов основным источником исходной информации служат данные экспериментальных полевых работ. Как правило, они проводятся во время весеннего половодья [6, 9–12], поскольку априори считается, что преимущественно в этот сезон происходит вынос биогенов. Однако, как показали исследования в бассейне р. Кудьмы, их вынос в маловодный период года весьма значительный и в изменившихся климатических условиях составляет для азота 63 и для фосфора 50% годового выноса (для бассейна р. Линды соответственно 48 и 44% [2]). Отсюда следует, что экспериментальные полевые работы необходимо проводить не только в период половодья, но и в летне-осеннюю и зимнюю межень, что сопряжено со значительным увеличением их объема.

Наиболее эффективный путь получения исходной информации, как представляется авторам статьи, – сочетание полевых работ с лабораторным экспериментом, с помощью которого может быть решен ряд задач, в том числе оценка влияния различных природных и антропогенных факторов на вынос биогенов с речных водосборов. В качестве успешного примера этого, пока не нашедшего широкого применения, направления исследований можно привести разработанную Ю.П. Сухановским с соавторами методику определения потерь биогенных веществ из почвы с использованием портативной дождевальной установки [8].

Перспективное также направление исследований – применение геохимических методов, в том числе лабораторного эксперимента (на основе водных вытяжек из растительности и почвогрунтов зоны аэрации). Такой подход использовался, в частности, в Институте географии РАН в совместных работах с Ростовским и Воронежским государственными университетами по проектам ФЦП “Интеграция” в 1999–2004 гг. [4]. Он позволил без непосредственного отбора проб поверхностных склоновых вод значительно сократить объем полевых работ и дать сравнительную оценку влияния природных и антропогенных ландшафтов на вынос биогенов, выявить особенности влияния основных климатических факторов (атмосферных осадков и температуры воздуха) на этот процесс. Химический анализ водных вытяжек выполнен с помощью портативного спектрофотометра DR/2010 фирмы “HACH” (США), иономера и ионоселективных электродов фирмы “Эконикс” (Россия).

О целесообразности и эффективности использования лабораторного эксперимента для решения ряда задач свидетельствуют, в частности, полученные авторами статьи указанные ниже результаты исследований формирования биогенного стока в бассейнах Верхней Волги и Дона, в том числе на южном черноземе в бассейне р. Бузулук (левый приток р. Хопер).

1. Из полученной в лабораторных условиях зависимости (рис. 2) следует, что в годы с низкой увлажненностью (осадками) речного водосбора концентрация биогенов в поверхностном стоке с водосборной площади может возрастать в разы по сравнению с многоводными годами, а также значительно меняться в течение года, достигая максимальной величины при небольших осадках.

2. Концентрация биогенов в поверхностно-почвенных водах существенно зависит от продолжительности контакта атмосферных осадков с почвой. Особенно значительное насыщение осадков биогенами и солями наблюдается в первые 30 мин от начала контакта (рис. 3) и не столь резко выраженное может продолжаться до 3–4 сут.

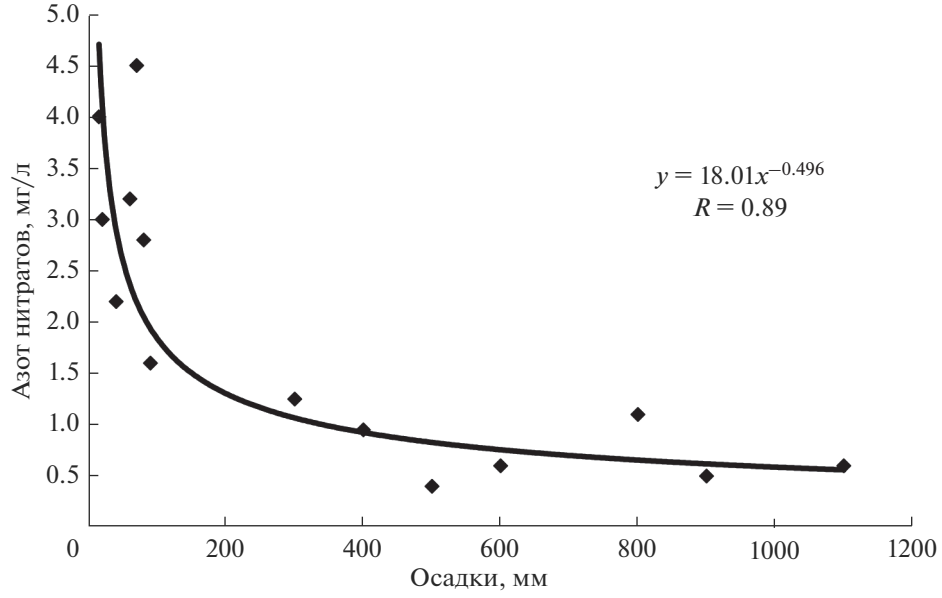


**Рис. 2.** Содержание нитратов в поверхностно-почвенных водах в зависимости от количества атмосферных осадков (пахотный слой южного чернозема, типчаково-ковыльная степь, водосбор р. Бузулук, лабораторный эксперимент при температуре 25°С, 14 образцов почвы).

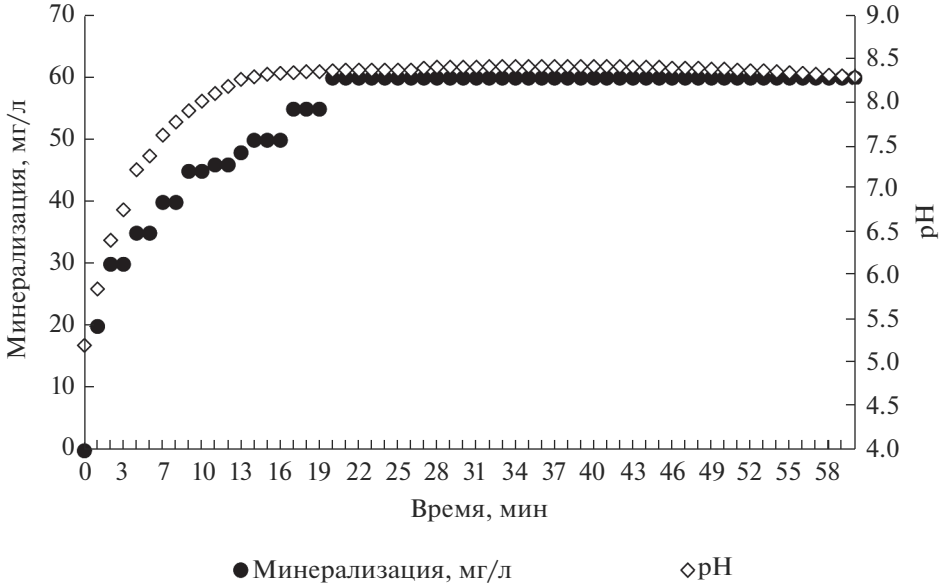


**Рис. 3.** Динамика минерализации и pH поверхностно-почвенных вод в течение 1 ч от начала контакта почвы с атмосферными осадками (южный чернозем, типчаково-ковыльная степь, бассейн р. Бузулук, один образец почвы, температура 25°С).

Затем наступает равновесное состояние между жидкой и твердой фазами и концентрация стабилизируется. Такая же ситуация отмечается по отношению к показателю pH, отсюда следует, например, вывод, что черноземная почва может достаточно быстро нейтрализовать кислотные осадки.

3. Исследования в бассейне Дона и Верхней Волги показали, что ежегодно возобновляемый источник биогенов и других химических веществ – растительность. Причем наблюдается их вымывание осадками из живых тканей растений, а не только из мертвых (опада и подстилки). В водных вытяжках из растений биогенных веществ содержится значительно больше по сравнению с поверхностью почв (рис. 4). Вещественный обмен в системе растительность–почва разомкнут. По-

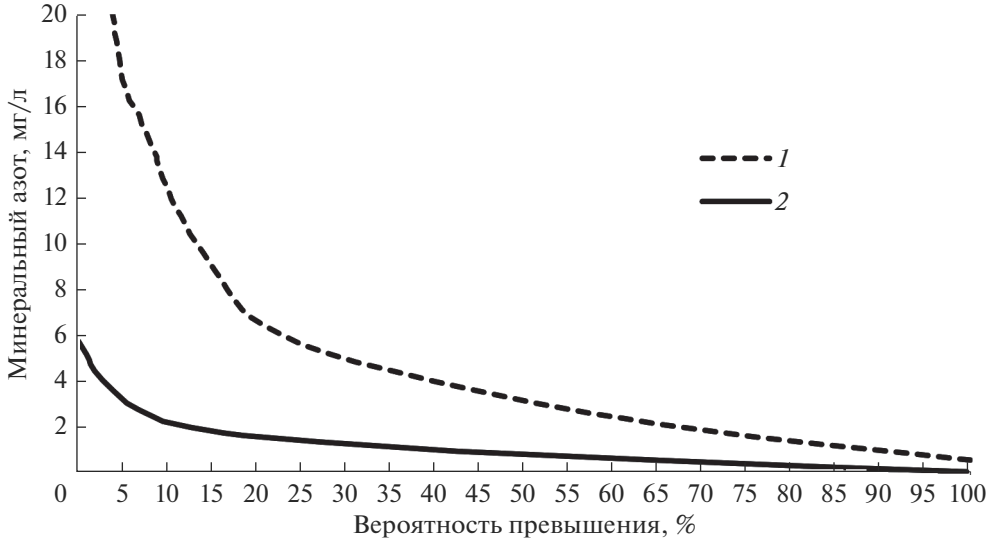


**Рис. 4.** Содержание азота нитратов в водных вытяжках из 10 г сухого вещества 167 образцов травянистых растений *1* и 249 образцов поверхности почв *2* в бассейнах Дона и Верхней Волги в летний период (температура 25°С, время контакта 30 мин).

этому биогены растительного происхождения с фильтрующейся влагой могут достигать грунтовых вод и в них накапливаться.

4. На минерализации поверхностно-почвенных вод и содержании в них биогенов сказываются внутригодовые изменения температуры воздуха и поверхности почвы. Минерализация (вероятно, и содержание нитратов) в поверхностном склоновом стоке при одном и том же количестве осадков с ростом температуры воздуха от весны к лету (в диапазоне 1–35°С) может увеличиваться почти в 2 раза.

Весьма эффективна более детальная количественная оценка сезонного выноса биогенов и других химических веществ с речных водосборов, заключающаяся в сочетании геохимических методов изучения их миграции и экспериментальных наблюдений за водным и химическим стоком на воднобалансовых стационарах в различных природных и антропогенных условиях. К сожалению, большинство их было закрыто в конце 1980-х – начале 1990-х гг., а на оставшихся стационарах наблюдения проводятся лишь за водным поверхностным стоком и по сокращенной программе. На такой генетической основе могут быть получены достаточно надежные результаты физико-математического моделирования внутригодовых и межгодовых величин химического стока, в том числе при его прогнозировании.

## ВЫВОДЫ

На примере р. Кудьмы оценен вклад атмосферных осадков, поверхностного и подземного стока с водосборной площади, стока верховодки в формирование выноса биогенов с речных водосборов в северной части лесостепной зоны Русской равнины в бассейне Волги. Приведенные результаты расчетов показали, что роль элементов водного баланса в миграции биогенных веществ весьма существенно меняется по сезонам года и в многолетнем плане.

В последние десятилетия (с конца 1970-х – начала 1980-х гг.) вследствие потепления климата наблюдаются кардинальные изменения в формировании водного и тесно с ним связанного водно-биогенного баланса речных бассейнов в лесостепной зоне. Они не имеют аналогов за весь период инструментальных наблюдений. Особенно это касается значительно возросшей роли стока инфильтрационного происхождения (стока верховодки и подземного стока) в миграции в реки с их водосборов биогенных веществ на фоне сокращения роли поверхностного склонового стока. Однако климатические изменения в структуре диффузного выноса биогенов не привели к улучшению гидроэкологической ситуации, поскольку дренируемые реками подземные воды нередко содержат эти вещества в большей концентрации, чем поверхностные. Значительный вынос биогенов в маловодный сезон теплого периода, в основном с подземным стоком, способствует ухудшению гидроэкологической ситуации в Чебоксарском водохранилище.

В половодье существенно вырос вынос биогенных веществ с суммарным стоком, главным образом за счет увеличения выноса с подземным стоком. Существенную роль в миграции азота в период весеннего половодья играет его поступление с атмосферными осадками. Доля осадков

(атмосферная составляющая) в выносе азота с суммарным речным стоком составляет 28%. На ландшафтную составляющую (вымывание азота из растительности, лесной подстилки, почвы и грунтов зоны аэрации) приходится 72%.

Вынос азота с суммарным речным стоком сравнительно равномерно распределяется по сезонам года – с максимумом в половодье и минимумом в маловодный сезон холодного периода. В отличие от азота, внутригодовое распределение выноса фосфора неравномерное с максимумом (50% годовой его величины) в сезон половодья и минимумом в летне-осеннюю (25%) и осенне-зимнюю межень (25%).

Полученные результаты в дальнейшем могут быть уточнены и детализированы, в том числе при проведении гидрохимических и геохимических экспериментальных исследований. Более детальный анализ элементов как расходной, так и приходной частей воднобиогенного баланса речного бассейна, в том числе поступления биогенов в результате дорожно-транспортной нагрузки, биологической фиксации азота (в лесах, на залежах и лугах), потребления биогенов при синтезе органического вещества в растениях и т.д., – предмет дальнейших исследований. Остается весьма слабо изученной гидрохимическая и гидроэкологическая роль водорослей, в том числе синезеленых, обитающих в почвах и мигрирующих с водным стоком в речную сеть и водохранилища. К числу перспективных направлений дальнейших ландшафтно-гидрохимических исследований относится сочетание полевых работ с лабораторным экспериментом и физико-математическим моделированием процессов формирования диффузного выноса биогенных веществ в реки и водоемы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Долгов С.В., Коронкевич Н.И.* Гидрологическая ярусность равнинной территории // Изв. РАН. Сер. геогр. 2010. № 1. С. 7–25.
2. *Долгов С.В., Коронкевич Н.И.* Современные изменения выноса биогенных веществ в реки бассейна Волги на юге лесной зоны // Изв. РАН. Сер. географ. 2019. № 5. С. 43–55.
3. *Долгов С.В., Коронкевич Н.И.* Современные особенности и динамика баланса биогенных веществ в бассейне реки Кудьмы. 1. Годовой баланс биогенов // Вод. ресурсы. 2020. Т. 47. № 2. С. 151–161.
4. *Закруткин В.Е., Коронкевич Н.И., Шишкина Д.Ю., Долгов С.В.* Закономерности антропогенного преобразования малых водосборов степной зоны Юга России (в пределах Ростовской области). Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 2004. 252 с.
5. *Коронкевич Н.И.* Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. М.: Наука, 1990. 204 с.
6. *Назаров Н.А.* Оценки эрозионного смыва почв и выноса биогенных элементов с поверхностным стоком талых и дождевых вод в речном бассейне // Вод. ресурсы. 1996. Т. 23. № 6. С. 645–652.
7. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 10. Верхне-Волжский район. Кн. 1. М.: Гидрометеоиздат, 1973. 477 с.
8. *Сухановский Ю.П., Вытовтов В.А., Соловьёва Ю.А., Прущик А.В., Санжарова С.И., Титов А.Г.* Методика определения потерь из почвы биогенных веществ с использованием портативной дождевальной установки // Достижения науки и техники АПК. 2016. Т. 30. № 6. С. 68–71.
9. *Хрисанов Н.И., Осипов Г.К.* Управление эвтрофированием водоемов. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. 279 с.
10. *Чернышев Е.П., Барымова Н.А., Иванова Н.Б., Китаев Л.М.* Пространственно-временна́я дифференциация гидрологических процессов и связанного с ними вещественного обмена в системе “водосбор–река” // Географо-гидрологические исследования. М.: ИГ РАН, МЦ ГО РФ, 1992. С. 4–26.
11. *Чуян Г.А., Бойченко З.А., Тур О.П.* Методические рекомендации по оценке выноса биогенных веществ поверхностным стоком. М.: ВАСХНИЛ, 1985. 32 с.
12. *Ясинский С.В., Гуров Ф.Н.* Метод оценки характеристик диффузного загрязнения малых рек на основе ландшафтно-гидрологического подхода (на примере р. Истры) // Вод. хоз-во России. 2006. № 2. С. 41–71.

*ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, 2021, том 48, № 5, с. 578–587*

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОД СУШИ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

*УДК 551.340*

# ПРИЗНАКИ И ЗНАЧЕНИЕ СТРУКТУР ПОДПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА НА ТЕРРИТОРИИ КРИОЛИТОЗОНЫ[1]

**© 2021 г. И. В. Чеснокова[a], *, А. П. Безделова[b], Д. О. Сергеев[c], Н. И. Тананаев[d], Е. А. Гришакина[e]**

[a] *Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия*
[b] *Институт глобального климата и экологии им. Ю.А. Израэля, Москва, 107258 Россия*
[c] *Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва, 101000 Россия*
[d] *Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, 677010 Россия*
[e] *Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, Москва, 119991 Россия*
**e-mail: ichesn@rambler.ru*

Поступила в редакцию 24.09.2020 г.
После доработки 24.09.2020 г.
Принята к публикации 30.03.2021 г.

Подповерхностный водный сток на территории криолитозоны обладает значительной структурной и сезонной спецификой. Структурность связана, с одной стороны, с литологически обусловленными проницаемыми областями массивов горных пород, с другой стороны – с геокриологически обусловленной проницаемостью. Эта проницаемость – сезонный фактор водного стока с территории, который в последнее время активно изучается исследователями различных направлений. Структурность обусловлена историей геологического и геокриологического развития: чаще всего структуры стока унаследованы положением пород более грубого литологического состава или особенностями, связанными с протеканием в прошлом геокриологических процессов (растрескивания, формирования криогенных текстур, локального термокарста и др.). Рассмотрена пространственная неоднородность надмерзлотного стока на Европейском Севере и горах Северного Забайкалья.

*Ключевые слова:* грунтовый сток, многолетняя мерзлота грунтов, растительные сообщества, индикаторы, глубина сезонного оттаивания.

**DOI:** 10.31857/S0321059621050060

## ВВЕДЕНИЕ

Подземный сток обычно подразделяют на подмерзлотный, межмерзлотный, внутримерзлотный и надмерзлотный [6]. Режим подмерзлотных и межмерзлотных вод относительно консервативен, поскольку относится к области замедленного водообмена (не считая высокопроницаемых коллекторов в горных областях). Надмерзлотные воды сезонноталого слоя (СТС) и таликов разного типа ("подповерхностный водный сток") высоко динамичны и активно влияют на сезонные особенности речного стока. Подповерхностный водный сток на территории криолитозоны обладает значительной структурной и сезонной спецификой. Структурность связана, с одной стороны, с литологически обусловленными проницаемыми областями массивов горных пород, с другой стороны – с геокриологически обусловленной проницаемостью горных пород. Проницаемость массивов горных пород обусловлена историей геологического и геокриологического развития: чаще всего структуры стока унаследованы положением пород более грубого литологического состава или криолитологическими неоднородностями тонкодисперсных грунтов, связанными со следами палеогеокриологических процессов (растрескивания, формирования криогенных текстур, локального термокарста и др.).

Геокриологически обусловленная проницаемость – сезонный фактор промерзания и оттаивания, влияние которого на общий сток территории в последнее время активно изучается исследователями различных направлений и специализаций [9, 10, 13]. Влияние геокриологических условий и геокриологической динамики на режим водного стока представляется очевидным и поддается количественным оценкам [7].

Надмерзлотные воды имеют более динамичный режим и обладают сложной структурой в плане и разрезе. Структурность стока приводит к

[1] Работа подготовлена в рамках государственных заданий (темы НИР, государственная регистрация АААА-А19-119021190077-6 и АААА-А19-119040990079-3).

пространственному перераспределению и концентрации потоков надмерзлотных вод, которые питаются атмосферными осадками, талыми снеговыми водами, водами оттаивающих мерзлых грунтов, водами конденсации в поровом пространстве грунта. В зонах концентрации надмерзлотного стока воды больше и, как правило, движение воды быстрее.

Задача настоящего продолжающегося исследования – выявление признаков и оценка распространенности структурированного грунтового стока в пределах таких различных природных обстановок, как Арктический Север Европейской равнины и Становое нагорье в Северном Забайкалье.

## РАЙОНЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Основными источниками информации о структуре и режиме надмерзлотного стока служат материалы мерзлотной съемки. Стандартный набор методов инженерных изысканий малопригоден для решения этой задачи, поскольку требуются поисковые специализированные исследования границ водных потоков, скоростей фильтрации и уровенного режима грунтовых вод на протяженных участках, не совпадающих с границами проектирования инженерных сооружений.

### *Юго-Восточная часть Большеземельской тундры*

Авторы воспользовались возможностями студенческой геокриологической съемки, проводимой в рамках Учебной инженерно-геокриологической практики магистров геологического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова, проводимой ежегодно в районе г. Воркуты на учебно-научном полигоне Хановей. На площади ~1 км$^2$ выполняется ландшафтная съемка, проводится бурение скважин с опробованием грунта, круглогодичные режимные термометрические наблюдения, а также специализированные гидрологические исследования. При ландшафтном картировании используются снимки космические и снимки с радиоуправляемого квадрокоптера “Mavic 2 Zoom”.

Характерная особенность региона – повсеместное распространение крупнобугристой (крупноблочной) структуры мезорельефа, основные части которой – поверхность блока и его склоны различной морфологии. Высота блоков составляет от 0.5 до 2 м при поперечных размерах 50–70 м на 25–45 м. На основных структурных элементах макрорельефа (водораздел, склон, речная долина) крупнобугристая структура различна.

Крупнобугристая структура на пологих склонах мусюров и приводораздельных котловин представлена отдельными разрозненными буграми, занимающими от 20 до 35% площади поверхности. Бугры разделены широкими и неглубокими ложбинами (средняя ширина 15–20 м) и имеют выраженную подсклоновую часть, склоны и собственно поверхность блока; иногда подсклоновая структурная часть отсутствует. В переходной зоне между блоками и ложбинами встречаются маленькие зарастающие озерки-лужи с фрагментами сфагновых сообществ. На дне водораздельных котловин и в речной долине преобладает крупнобугристо-западинный комплекс мезорельефа, представленный сочетанием крупнобугристых структур различных форм (средний размер 70–50 м на 25–40 м, высота 1.0–2.5 м), соединенных небольшими (1.5–4.0 м) и неглубокими (0.5–1.0 м) межбугровыми понижениями. В мезорельефе крупнобугристой структуры водораздельных котловин преобладают относительно невысокие равномерные боковые склоны, переходящие в неглубокие и неширокие межбугровые понижения. Присклоновые структурные части фрагментарны по берегам верховьев ручьев. Редкие бугры пучения и крупные торфяники, разделенные заболоченными понижениями, занимают небольшие площади по окраинам термокарстовых озер и озерков. Крупнобугристая структура в речной долине р. Воркуты наиболее выражена с преобладанием вытянутой формы блоков в сторону реки с общим уклоном 1°–2°.

### *Горы Северного Забайкалья*

Второй район геокриологических исследований относится к Северному Забайкалью и включает в себя Чарскую межгорную котловину рифтового типа и обрамляющие ее горные хребты Удокан и Кодар, абсолютные высоты которых достигают соответственно 2200 и 3000 м. Днище котловины имеет абсолютные отметки ~700 м. Котловина заполнена преимущественно песками ледникового и водно-ледникового происхождения, причем мощность четвертичных отложений достигает 1 км. Тектоническое строение территории имеет блоковый характер. Глубинный тепловой поток весьма изменчив по территории [1], что совместно со сложной геокриологической историей, связанной с оледенениями и развитием подпрудных ледниковых озер, обусловило неоднородную мощность многолетнемерзлых толщ (ММТ). В пределах Чарской котловины описаны как обширные участки без многолетней мерзлоты (урочище Пески), так и аномальные мощности ММТ, достигающие 450 м [2]. Под водораздельными участками горных хребтов мощность ММТ достигает 900 м; мерзлота имеет сплошное распространение [8]. Температура горных пород на глубине проникновения сезонных колебаний в районе исследований также весьма изменчива в разных ландшафтах и меняется от –7 до +2°С [3].

Распространенность крупнообломочных отложений усложняет проходку скважин и шурфов на склонах, и авторы активно исследовали участки подрезки склонов автомобильными подъездными дорогами, прослеживая пути стока по хорошо слышимому с поверхности журчанию воды.

## СТРУКТУРЫ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА

*Юго-Восточная часть Большеземельской тундры*

За историю развития рельефа и геокриологических условий сформировался широко распространенный в Большеземельской тундре крупноблоковый ландшафт (рис. 1). Блоки-бугры скованы высокотемпературной многолетней мерзлотой (среднегодовая температура на глубине проникновения сезонных колебаний близка к –0.5°С) со слоем сезонного оттаивания, который полностью промерзает зимой (рис. 2а). Отсутствие кустарничковой растительности приводит к уменьшению толщины снежного покрова на поверхности бугров, способствуя их выхолаживанию. В пределах межблочных понижений, напротив, зимнее промерзание с поверхности не достигает кровли ММТ благодаря аккумуляции снега, мощному органическому горизонту почвы и его высокой влажности (рис. 2б).

Структура сети подповерхностного стока связана со структурой ландшафта. На приводораздельных участках, где уклон поверхности невелик и также невелика область аккумуляции стока, возникают небольшие округлые термокарстовые западины диаметром от 10 до 50 м, питающие полосы стока. Одна западина может давать начало нескольким полосам стока, расходящимся в разных направлениях. В настоящее время линейные размеры и влагосодержание таких котловин увеличиваются, о чем свидетельствует мелко-кочкарниковый рельеф их окраинных частей – берега котловин как бы разваливаются под отепляющим влиянием подповерхностных вод. В полосах стока обильно разрастается карликовая березка, что локально увеличивает снегонакопление и способствует растеплению поверхностных слоев почвы.

Ниже по рельефу на склонах долины в области транзита стока рисунок сети подповерхностного стока меняется с веерообразного на перистый. Несколько полос объединяются в одной осевой долине, к которой под прямым углом причленяются полосы стока, причем одна такая полоса стока может разгружаться одновременно в обе соседние осевые долины. Последние, как правило, достаточно глубоко вложены в окружающий рельеф и в отдельные периоды года могут иметь поверхностный сток. Индикатор присутствия поверхностного стока – резкая смена карликовой березки на тальник при уменьшении мощности органического горизонта.

В придолинной части уклон поверхности уменьшается, что способствует увеличению общей увлажненности, расширению и заболачиванию межбугровых понижений, развитию термокарста. В осевых долинах наблюдается постоянный поверхностный сток. Следовательно, в верхних частях склонов характер и структура рельефа определяют рисунок сети подповерхностного стока, тогда как в придолинных частях, напротив, именно обилие почвенной влаги – важный фактор развития крупноблочного ландшафта.

Разновозрастные термокарстовые явления, наблюдавшиеся Воркутинской мерзлотной станцией с 1936 г., свидетельствуют о наличии вековой тенденции растепления многолетней мерзлоты и уменьшения площади ее распространения в этом районе [4]. Изменение размеров мерзлых массивов по разрезу и по простиранию неминуемо должно было влиять на режим стока с территории. Этот вопрос остается недостаточно изученным, и в его разрешении необходимо учитывать наличие структуры каналов с переменной проницаемостью грунтов.

Несливающаяся мерзлота (участки, где ее кровля находится глубже сезонного промерзания) в межбугровых понижениях создает условия для продолжения питания поверхностных водотоков в воднокритический период из талого прослоя грунта, мощность и гранулометрический состав которого весьма изменчивы по площади. Частичное промерзание водоносных надмерзлотных таликов может создавать избыточный “криогенный” напор, распространяющийся вверх по склонам крупных бугров и локально приводящий к эжекции перенасыщенного водой грунта. Вероятно, именно так возникают многочисленные пятна-медальоны, полосами окаймляющие долины крупных полос подповерхностного стока.

Морфология ложбинной структуры стока определяется положением мерзлотных границ блоков-бугров и разделяющих их межбугровых понижений. Относительная площадь полос грунтового стока, по данным дешифрирования, составляет 15–25%, и это в целом соответствует геофизическим и термометрическим данным, полученным в результате мерзлотной съемки (рис. 3). Однако положение границ этих полос пока не обеспечено надежными ландшафтными индикаторами, а их динамика остается недоизученной, как и пространственные закономерности неоднородности условий фильтрации. Известны данные даже о новообразовании мерзлоты на фоне потепления климата [5].

Пространственная неоднородность грунтового стока требует учета при моделировании режима водного стока с территории. Летом, в частно-

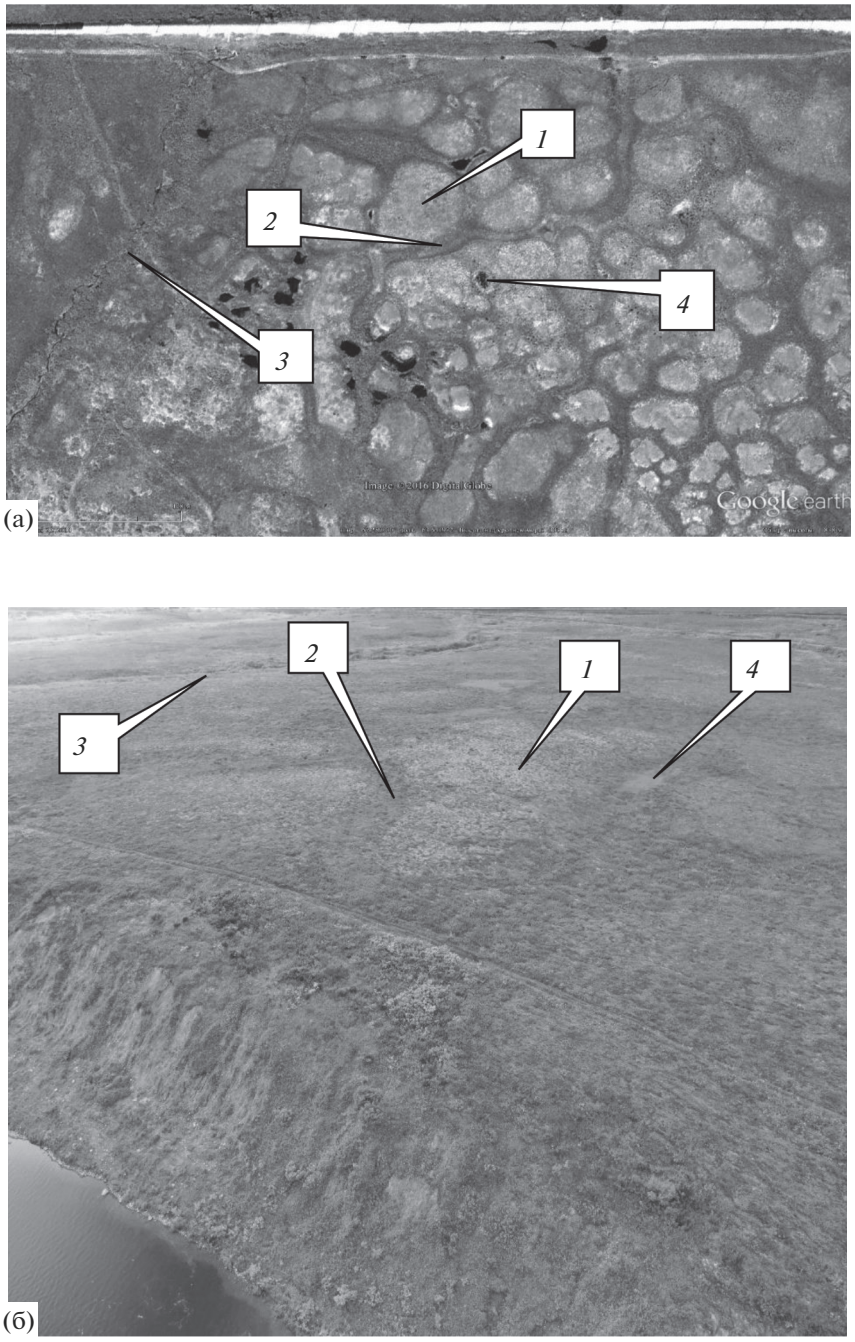


**Рис. 1.** Характерный облик ландшафта Большеземельской тундры в районе ст. Хановей: а – космоснимок Google, б – перспективный снимок с квадрокоптера; *1* – минеральные бугры; *2* – межбугровые понижения; *3* – поймы рек и ручьев; *4* – термокарстовые озера и обводненные понижения.

сти, существует гетерогенная система фильтрации, при которой атмосферные осадки, попадая на блоки-бугры, частично стекают с их выпуклой поверхности, а частично – насыщают относительно тонкий СТС, в первой половине лета обладающий повышенной проницаемостью из-за остаточных макропор, наследующих сезонные криогенные текстуры. Большая часть атмосферной влаги насыщает межбугровые понижения. Коэффициенты фильтрации здесь невелики, но кровля мерзлоты залегает глубже 4 м, и, что самое важное, фильтрация продолжается круглый год. Водообеспечение грунтового стока в воднокритический период доказывается сохранением стока в ручьях – притоках р. Воркуты, что хорошо видно при анализе температурного режима в рус-

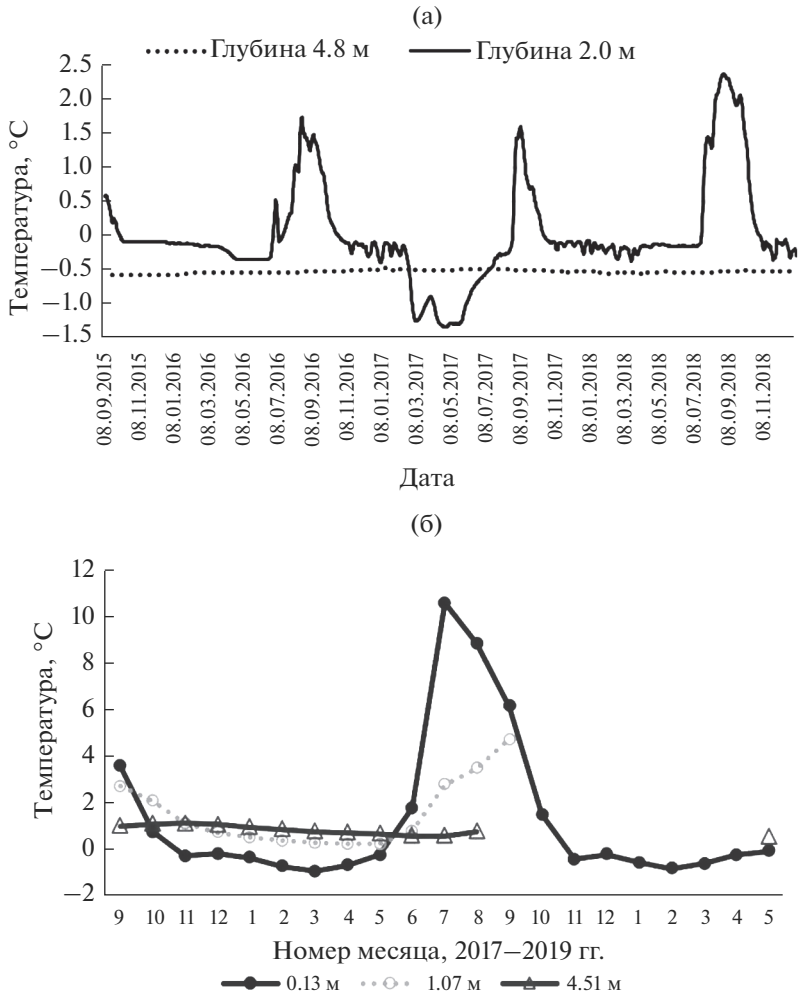


**Рис. 2.** Температурный режим грунта на разной глубине на возвышенных (а) и пониженных (б) участках рельефа.

ле одного из них (рис. 4). Нулевая температура сохраняется в русле, несмотря на пятидесятиградусные морозы.

Отсутствие поверхностного движения воды в полосах стока и межбугровых понижениях объясняется хорошей водоудерживающей способностью и высоким коэффициентом фильтрации мощного органического горизонта [11]. Возникновение поверхностного стока возможно в период быстрого весеннего снеготаяния, однако в это время коэффициент поверхностного стока, вероятно, лишь очень локально >50%. Основная часть влагозапаса в снеге при снеготаянии расходуется на инфильтрацию в снежный покров и частично – на испарение с поверхности снега, которое может достигать от 20 до 30% суммарного влагозапаса [14, 15]. По данным наблюдений 1977–1979 гг. на стоковых площадках в долине р. Томсен (Канадский Арктический архипелаг), на слабонарушенной задернованной поверхности приводораздельного склона коэффициент поверхностного стока менялся от 3 до 26% при влагозапасе в снежном покрове от 200 до 300 мм и лишь за бровкой террасы, где суммарный влагозапас >700 мм, достигал 74% [12]. В летний период с оттаиванием сезоннопромерзающего слоя уровень грунтовых вод (УГВ) находится в органическом горизонте почвы, что обеспечивает высокую скорость фильтрации и ограничивает подъем УГВ выше дневной поверхности.

### *Горы Северного Забайкалья*

Надмерзлотные воды СТС в пределах рассматриваемой территории повсеместно распространены и приурочены ко всем геолого-генетическим типам четвертичных отложений. Это преимущественно поровые воды с коротким периодом существования (от 3 до 6 мес.). Воды СТС движутся в виде струйчатых потоков по криогенному водоупору (гольцовый лед или мерзлые супесчано-песчаные отложения) или по скальному основанию. Потоки надмерзлотных вод СТС по мере

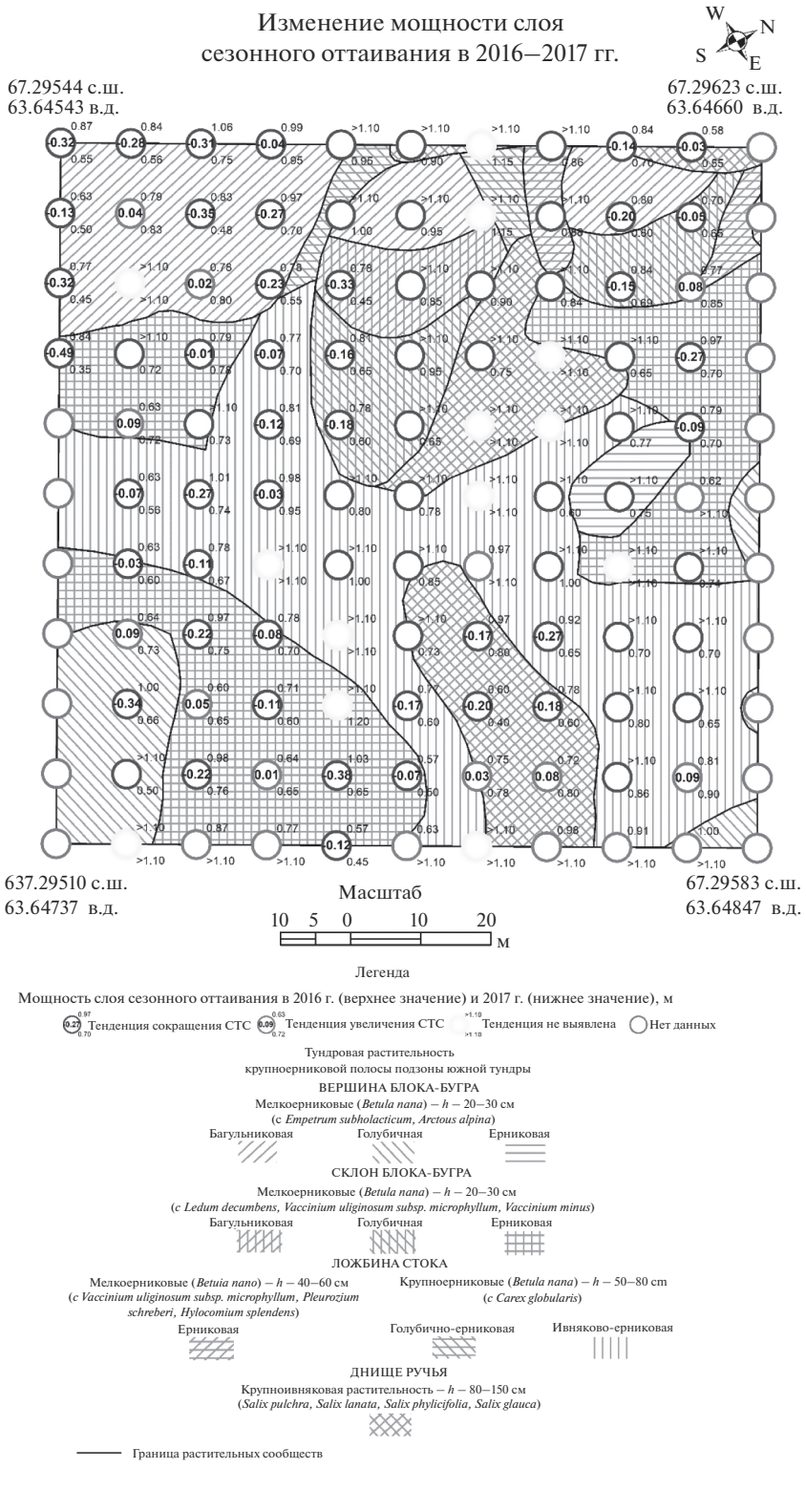


**Рис. 3.** Межгодовая динамика глубины сезонного оттаивания в пределах различных типов местности на участке Хановей.

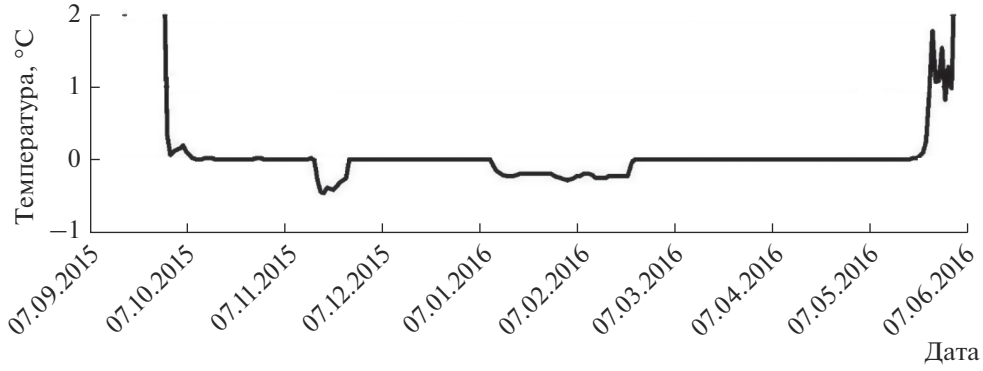


**Рис. 4.** Зимняя динамика температуры на дне ручья – притоке р. Воркуты.

своего движения переходят из элювиальных образований в образования склонового ряда, затем – в аллювиальные отложения, представляя собой в гидравлическом отношении единое целое, и имеют свободный уровень. Колебания уровня вод СТС обусловлены понижением криогенного водоупора по мере сезонного оттаивания и отепляющего действия атмосферных осадков. Частичная разгрузка надмерзлотных вод СТС происходит в местах перегибов склонов, у тыловых швов террас, а также в местах подрезки дорогами. В горно-таежном поясе это проводит к формированию небольших осенних наледей объемом до 10 м$^3$.

Водный сток в этих районах формируется под влиянием процессов конденсации влаги в крупнообломочных отложениях и гольцового льдообразования весной и в первой половине лета. Процесс гольцового льдообразования начинается ранней весной при отрицательной температуре воздуха в дневные часы за счет радиационных оттепелей, вызывающих снеготаяние. При радиационном нагревании поверхности выступающих над снежным покровом обломков до положительной температуры снег при контакте с ними тает, а образующаяся вода затекает в пустоты и замерзает там в виде небольших гнезд, корочек или сосулек (так называемый “гольцовый лед”). В это же время происходит интенсивная аблимация льда на нижних поверхностях обломков в верхней части разреза СТС. В конце весны – начале лета верхние горизонты гольцового льда в СТС подтаивают и образующаяся вода затекает с последующим замерзанием в более глубокие горизонты курума, которые еще имеют отрицательную температуру. Таким образом, слой гольцового льда постепенно перемещается до глубины максимального сезонного оттаивания в данный год. В некоторых случаях, когда запасы холода в СТС превосходят тепловыделение замерзающей в куруме талой снеговой воды, дополнительное количество гольцового льда может сформироваться за счет первых весенне-летних дождей. Вследствие этого острота пика весеннего паводка смягчается.

Другой важный процесс, влияющий на водный сток в рассматриваемом районе, – конденсация влаги в грунте. По материалам работы экспедиции БАМ геологического факультета МГУ в 1983–1988 гг., в курумах формируется до 50 мм конденсационной влаги за летний сезон. Эта вода, соединяясь с водой оттаивающего в течении лета сезонного гольцового льда и влагой атмосферных осадков, промывает каналы, свободные от мелкозема в крупнообломочных отложениях, которые маркируются “на слух” по интенсивному журчанию воды, а также иногда по относительному понижению поверхности их тальвега благодаря суффозионному выносу обломочного материала и/или пониженному положению кровли ММТ (рис. 5).

Попытка оценить относительную площадь и геометрию таких полос концентрированного надмерзлотного стока привела авторов к неожиданному выводу, что эти полосы не приурочены преимущественно к курумам, но встречаются и на участках супесчано-песчаных солифлюкционно-делювиальных отложений, покрытых растительностью, включая лиственницу и кедровый стланик (рис. 6).

В тех местах, где насыпи и полки дорог пересекают подобные полосы стока, легко возникают размывы, которые развиваются как с подгорной, так и с нагорной частей дорожного полотна (рис. 7). На самой дорожной насыпи при этом возникают просадки, обусловленные суффозионным выносом мелкообломочного материала. На участках дренирования вод подповерхностного стока легко возникают оползни-сплывы, связанные с локальным переувлажнением тонкого слоя почвы.

Попытка определить геометрию подобных полос концентрированного стока на склоне показала кажущуюся хаотичность их путей. Структура стока оказалась не древовидной, некоторые пото-

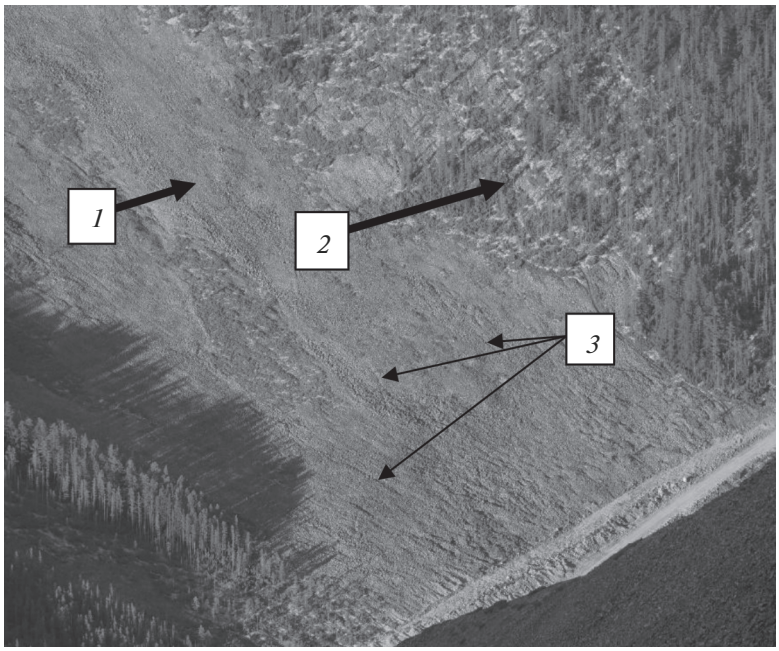


**Рис. 5.** Общий вид курума “Тещин огород” на правом борту руч. Клюквенного (хребет Удокан): *1* – курум; *2* – делювиально-солифлюкционный склон; *3* – полосы стока (фото Д. Сергеева).

**Рис. 6.** Разгрузка надмерзлотных вод по полосе промытых солифлюкционно-делювиальных отложений (фото И. Чесноковой).

ки ветвятся вниз по склону, а затем сливаются вновь. Средний интервал между полосами по простиранию склона составляет 30 м, при этом интенсивные потоки чередуются с относительно маловодными.

Важное следствие неоднородности грунтового стока в подгольцовом поясе – увеличение скорости дренирования атмосферных осадков из-за увеличения скорости стекания в полосах крупнообломочного материала. Одновременно это приводит к ускоренному распространению загрязняющих веществ при очень слабой естественной защищенности надмерзлотных вод от загрязнения с поверхности при освоении территории.

**Рис. 7.** Размыв полотна и нагорного откоса дороги Удокан–Наминга в 2018 г. на участке их пересечения полосами подповерхностного стока (показаны стрелками) (фото Д. Сергеева).

## ВЫВОДЫ

В Большеземельской тундре перераспределение надмерзлотного стока обусловлено историей геокриологического развития территории, которое изучено недостаточно. Сформированная система блоков-бугров и межблоковых понижений создала современную неоднородность теплообмена, при которой несливающаяся мерзлота в понижениях обеспечивает возможность грунтового стока в зимний период, при которой она влияет на геокриологические условия через распределение снежного покрова и микрорельеф, что поддерживает зимний сток в мелких ручьях.

В Северном Забайкалье перераспределение и концентрация стока в крупнообломочных полосах стока во всех типах склоновых четвертичных отложений увеличивает энергию и скорость дренирования. Развитие гольцового льдообразования и конденсации в промытых крупнообломочных отложениях полос стока существенно влияет на гидрограф водотоков разного порядка и требует дальнейшего изучения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Дучков А.Д., Соколова Л.С.* Геотермический атлас Сибири // Закономерности строения и эволюции геосфер. Матер. Международ. междисциплинар. науч. симпоз. Хабаровск, 2004. С. 45–56.
2. *Железняк М.Н.* Геотемпературное поле и криолитозона Юго-Востока Сибирской платформы. Дис. ... докт. геол.-минерал. наук. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 2002. 337 с.
3. *Железняк М.Н.* Геотемпературное поле и криолитозона Юго-Востока Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 2005. 227 с.
4. *Редозубов Д.В.* Геотермический метод исследования толщ мерзлых пород. М.: Наука, 1966. 156 с.
5. *Ривкин Ф.М., Власова Ю.В., Пармузин И.С.* Закономерности изменения геокриологических условий в результате осадки мерзлых пород при оттаивании // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 6. С. 26–34.
6. *Романовский Н.Н.* Подземные воды криолитозоны / Под ред. *В.А. Всеволожского.* М.: Изд-во МГУ, 1983. 231 с.
7. *Сергеев Д.О., Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Булдович С.Н., Типенко Г.С., Йошикава К., Романовский В.* Влияние динамики климата и геокриологических условий на режим регионального стока и наледеобразования горных водосборов бассейна реки Лена // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 3. С. 29–35.
8. *Шасткевич Ю.Г.* Многолетнемерзлые породы высокогорной части хребта Удокан и условия формирования их температурного режима // Геокриологические условия Забайкальского Севера. Новосибирск: Наука, 1966. С. 24–43.
9. *Akhtar M., Ahmad N., Booij M.J.* Use of regional climate model simulations as input for hydrological models for the Hindukush-Karakorum-Himalaya region // Hydrol. Earth System Sci. 2009. V. 13 (7). P. 1075–1089.
10. *Connon R.F., Quinton W.L.* Changing runoff pathways due to permafrost thaw in discontinuous permafrost

terrains / Eds *F. Günther, A. Morgenstern*. XI Int. Conf. Permafrost – Book of Abstracts. Potsdam, Germany: Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein, 2016. P. 625.
https://doi.org/10.2312/GFZ.LIS.2016.001.

11. *Letts M.G., Roulet N.T., Comer N.T., Skarupa M.R., Verseghy D.L.* Parametrization of peatland hydraulic properties for the Canadian land surface scheme, // Atmosphere–Ocean. 2000. V. 38 (1). P. 141–160.
12. *Lewkowicz A.G., French H.M.* The hydrology of small runoff plots in an area of continuous permafrost, Banks Island, N.W.T. // Proc. 4th Canadian Permafrost Conf. 1982. P. 151–162.
13. *Liljedahl A.K., Boike J., Daanen R.P. et al.* Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology // Nat. Geosci. 2016. V. 9. P. 312–318.
14. *Pomeroy J.W., Gray D.M., Brown T., Hedstrom N.R., Quinton W.L., Granger R.J., Carey S.K.* The cold regions hydrological model: a platform for basing process representation and model structure on physical evidence // Hydrol. Processes. 2007. V. 21. P. 2650–2666.
15. *Ryden B.E.* Hydrology of Truelove Lowland // Truelove Lowland, Devon Island, Canada: A High Arctic Ecosystem / Ed. *L.C. Bliss*. Edmonton, AB: Univ. of Alberta Press, 1977. P. 107–136.

*ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, 2021, том 48, № 5, с. 588–598*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ, ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ

*УДК 628.17:556.18:338.27*

# ПРОГНОЗ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ В РОССИЙСКОЙ ЧАСТИ БАССЕЙНА ДОНА[1]

**© 2021 г. А. П. Дёмин[a], *, А. В. Зайцева[a]**

[a] *Институт водных проблем РАН, Москва, 109333 Россия*

******e-mail: deminap@mail.ru, yew-tree@mail.ru*

Поступила в редакцию 01.02.2021 г.
После доработки 26.02.2021 г.
Принята к публикации 30.03.2021 г.

Описаны методические подходы к прогнозу водопотребления. На основе демографического прогноза и прогноза удельного водопотребления по регионам бассейна Дона выполнен прогноз водопотребления на хозяйственно-питьевые нужды. Приведены сводные данные по вводу в эксплуатацию орошаемых земель за 2008–2018 гг. в 15 субъектах Российской Федерации бассейна р. Дон. Показана фактическая и прогнозная площадь орошаемых земель на 2025 и 2030 гг. Выявлены противоречивые изменения объемов водопотребления на перспективу трех секторов экономики: снижение в ЖКХ, незначительный рост в промышленности и существенный рост в сельском хозяйстве. В целом по бассейну объем полного водопотребления к 2030 г., по оценкам авторов, увеличится незначительно.

*Ключевые слова:* бассейн Дона, хозяйственно-бытовое и питьевое водоснабжение, удельное водопотребление, прогноз водопотребления, площадь орошаемых земель.

**DOI:** 10.31857/S0321059621050084

## ВВЕДЕНИЕ

Территория бассейна р. Дон – один из важнейших в экономическом отношении регион России, где проживает более 12 млн человек, а плотность населения в 4.5 раза превышает среднероссийский показатель. Бассейн р. Дон занимает территорию 422 тыс. км$^2$, на которой размещены полностью или частично 15 субъектов Российской Федерации и 3 области Украины. Благоприятные транспортно-географическое положение, природные и демографические условия обусловили большие потенциальные возможности для социально-экономического развития региона. Однако нарастающий дефицит водных ресурсов тормозит дальнейшее поступательное развитие региона. В связи с этим прогноз водопотребления – очень важная задача. Цель данного исследования – получение прогнозных оценок водопотребления на нужды хозяйственно-питьевые, производственные и орошения, а также полного водопотребления (водозабора) на среднесрочную перспективу.

[1] Работа выполнена при финансировании из средств государственного бюджета (тема 0147-2019-0003 государственного задания ИВП РАН, государственная регистрация АААА-А18-118022090105-5).

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ПРОГНОЗУ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ

К настоящему времени как в России, так и в других странах накоплен весомый опыт по прогнозированию водопотребления отдельных отраслей водохозяйственного комплекса и других показателей развития водного хозяйства. Прогнозирование объемов водопотребления и водоотведения входило в состав балансовой оценки водных ресурсов при разработке комплексных программ и схем их рационального использования и охраны.

Наиболее подробно методика расчета объемов водопотребления на перспективу рассмотрена в [6]. По мнению авторов, основной метод расчета потребности в воде по отраслям или народному хозяйству в целом заключается в использовании удельных норм расхода воды на душу населения либо на 1 руб. продукции. Приведены особенности методических подходов к расчету перспективного водопотребления для коммунально-бытового хозяйства, сельского населения, промышленности, теплоэнергетики, животноводства, прудового рыбоводства, орошаемого земледелия.

В [26] разработана методика составления многовариантного нормативного прогноза для отдельной отрасли промышленности, позволяющая учесть как уровень развития производства

отрасли, так и ограничения, накладываемые на забор чистой воды, сброс сточных вод, сброс загрязняющих веществ, объем финансовых ресурсов. Данная методика чрезвычайно детализирована, включает в себя данные каждого предприятия и технологического процесса и требует тщательно подготовленной информации, труда большого коллективов специалистов.

По расчетам в [5], ~20% зерна и 50% кормов необходимо производить на орошаемых землях. Площадь орошаемых земель существенно зависит от прогнозируемой урожайности всех сельскохозяйственных культур. Согласно прогнозам авторов, потребность в орошаемых землях в России (верхний предел) к 2020–2025 гг. составит 18–20 млн га. В расчетах автор исследования не рассматривал проблему ограниченных капиталовложений, а проецировал поступательное линейное развитие экономики на будущее.

В [22] рассмотрены три сценария развития водохозяйственного комплекса. Площадь орошаемых земель к 2025 г. должна составить, млн га: по оптимистическому сценарию – 10.8, по реалистическому – 9.0, а по пессимистическому – 4.8 млн га. Объем забора воды для орошения прогнозных площадей в 2020 г. должен был составить 14.6 км$^3$. В 2019 г. площадь орошаемых земель РФ составляла 4.67 млн га (из них фактически поливалось 1.7 млн га), а объем использования воды на орошение – 6.57 км$^3$, что с учетом потерь воды на транспортировку значительно ниже данных пессимистического прогноза. По расчетам, к 2025 г. общий объем водопотребления для нужд сельскохозяйственного водоснабжения должен превысить 8 км$^3$. Как показало время, прогнозы авторов оказались абсолютно нереальными. В 2019 г. на эти нужды в России было использовано 0.3 км$^3$.

Важный комплексный прогноз водопотребления – работа, выполненная в Государственном гидрологическом институте [27]. По расчетам авторов, к 2020 г. суммарное водопотребление в России должно было вырасти по сравнению с 2005 г. на 9%. При этом промышленное потребление свежей воды сократится по сравнению с 2005 г. на 10, коммунальное – на 25%, а сельскохозяйственное вырастет в >1.5 раза в результате увеличения площади орошаемых земель до 10.2 млн га. Анализ фактических данных показывает, что в 2019 г. промышленное водопотребление по сравнению с 2005 г. снизилось в 1.7, коммунальное – в 1.63 раза, а сельскохозяйственное – на 7%. Суммарное водопотребление за 14 лет не только не выросло, а снизилось на треть.

Итак, большинство прогнозов, разработанных в конце XX – начале XXI в., не учитывало реальную экономическую ситуацию в России и исходило из привлечения огромных средств в водное хозяйство. Не учитывались нестабильность национальной экономики и новые геополитические условия. Это приводило к завышенным прогнозным оценкам водопотребления, особенно в сельском хозяйстве, которые в дальнейшем не оправдывались.

В зарубежных исследованиях самая активная область – прогнозирование спроса на воду в городах. В [31] отмечается, что методы прогнозирования можно условно разделить на две группы: 1) методы, требующие обширного сбора данных, данные используются для формулирования зачастую сложных статистических соотношений и вывода правил, которые будут указывать уровень спроса, эти методы обычно предназначены для краткосрочного прогнозирования; 2) методы, основанные на концептуальном подходе и требующие относительно ограниченного количества данных, эти методы обычно используются для долгосрочных прогнозов, типичная проблема, связанная с большинством стратегий прогнозирования спроса на воду, – нехватка подходящих исторических данных о тенденциях потребления воды, характеристиках микрокомпонентов, социально-экономических влияниях.

В [30] выполнен анализ прогнозов водопотребления в городах. Ранние методологии использовали относительно простые эконометрические модели и модели временны́х рядов, для которых требовалось ограниченное количество данных и которые можно использовать с небольшими вычислительными мощностями. В последние годы использовались разные методы и подходы – от простой исторической экстраполяции до сложных аналитических моделей, использующих обширные области искусственного и вычислительного интеллекта. Привлекательность одномерных временны́х серийных моделей уменьшилась, так как в них не учитывается влияние изменений демографических, экономических и технологических переменных, а также стратегий управления спросом на воду.

Сценарии глобального будущего водных ресурсов предполагают разные направления социально-экономических и климатических изменений [28]. Прогнозные объемы водопотребления для каждого из крупных секторов рассчитываются для мира в целом, континентов и 18 субрегионов на 2030, 2050, 2080 гг. Прогнозные объемы водопотребления для коммунально-бытового хозяйства учитывают демографические прогнозы, изменение доходов населения и водной инфраструктуры. Площадь орошаемых земель увеличивается с 321 млн га в 2010 г. до 356–376 млн га в 2050 г. и 350–400 млн га в 2080 г.

Растущий спрос на электроэнергию приводит к увеличению производства электроэнергии во всем мире. Гидроэнергетика остается крупнейшим производством возобновляемых источников

энергии. Мощность атомных электростанций увеличивается до 150%. Глобальный спрос на воду составит от 5500 до 6000 км$^3$/год в соответствии с тремя рассматриваемыми сценариями, при этом промышленный и коммунальный спрос на воду будет расти намного быстрее, чем спрос в сельском хозяйстве. Ожидается, что значительный рост общего спроса на воду произойдет в развивающихся странах, что обусловлено их интенсивным социально-экономическим ростом.

В [29] проведена оценка основных неопределенностей в прогнозах нехватки воды и влияния этих неопределенностей на процесс планирования и принятия решений в региональном или глобальном масштабе. Анализируется широкий спектр возможных будущих условий, которые могут создать серьезные проблемы планирования для органов управления водными ресурсами в уязвимых регионах мира и речных бассейнах. Для оценки неопределенности используется ансамбль из 45 прогнозов будущего дефицита воды, основанных на трех глобальных гидрологических моделях, пяти глобальных климатических моделях и трех водных сценариях.

По результатам проделанного анализа, методика расчета оценок водопотребления на перспективу в России должна опираться на следующие методические положения:

основной метод расчета потребности в воде по отраслям хозяйства заключается в использовании удельных норм расхода воды на душу населения, на 1 руб. или единицу продукции в натуральном выражении, на единицу орошаемой площади;

необходим тщательный анализ как можно более широкого круга разработанных основополагающих документов демографического и социально-экономического развития России на перспективу, отраслевых и территориальных прогнозов;

требуется применение сценарного подхода к развитию водохозяйственного комплекса;

необходимы возможно более полный учет основных факторов, определяющих изменение удельного водопотребления в каждом секторе водного хозяйства, и оценка предстоящего изменения этих факторов в результате научно-технического прогресса;

при оценке перспектив использования водных ресурсов необходимо рассматривать их не в целом, а с учетом целевых видов водопользования на различные нужды, региональных и отраслевых особенностей водопользования.

## ПРОГНОЗ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ХОЗЯЙСТВЕННО-ПИТЬЕВЫЕ НУЖДЫ

Коммунальное водопотребление в любом регионе определяется численностью жителей городов и прилегающих сельских населенных пунктов, а также величиной удельного водопотребления, выраженной в литрах в сутки на одного жителя, которая зависит от степени благоустройства населенных пунктов, т.е. от наличия водопроводов, канализации, централизованного горячего водоснабжения, а также от климатических условий. В величину удельного водопотребления включают и затраты воды на общегородские нужды: полив улиц и зеленых насаждений, обеспечение водой всех городских учреждений, а также промышленности, работающей на нужды городского населения и потребляющей воду высокого качества из городских водопроводов.

Оценка развития водопроводно-канализационного хозяйства России и обеспечения населения чистой питьевой водой должна опираться на “Стратегию развития жилищно-коммунальной сферы Российской Федерации до 2035 года”, проект которой разработан в октябре 2019 г. [23], и федеральный проект “Чистая вода” национального проекта “Экология” [14]. Стратегия является основой для формирования и реализации государственной политики в сфере жилищно-коммунальной сферы на федеральном, региональном, муниципальном, отраслевом и межотраслевом уровнях. Основная цель федерального проекта “Чистая вода” – повышение качества питьевой воды посредством модернизации систем водоснабжения и водоподготовки с использованием перспективных технологий [14].

Большое значение при прогнозе водопотребления на ХПВ имеют также демографические прогнозы [18], так как без них невозможно определить потенциальную водообеспеченность россиян и их потребность в объемах водопотребления на хозяйственно-питьевые нужды в ближайшей перспективе. Во всех субъектах федерации на территории бассейна р. Дон (за исключением Краснодарского края) численность населения в среднесрочной перспективе будет снижаться. Максимальные темпы снижения населения до 2030 г. (11–13%) прогнозируются в Орловской, Тамбовской областях, Республике Калмыкии. В большинстве регионов темпы снижения населения составят 3–8, в Воронежской области <1%. В соответствии с проведенными авторами расчетами численность населения на территории бассейна р. Дон по среднему варианту развития снизится с 12.1 млн человек в 2018 г. на 0.27 млн к 2025 г. и на 0.49 млн к 2030 г.

В последние годы в подавляющем большинстве регионов за счет привлечения средств бюджетов, внебюджетных источников, займов и других инвестиций проводится комплекс мероприятий по рациональному расходованию воды в жилом фонде, активно внедряются общедомовые и квартирные водосчетчики, применяется улуч-

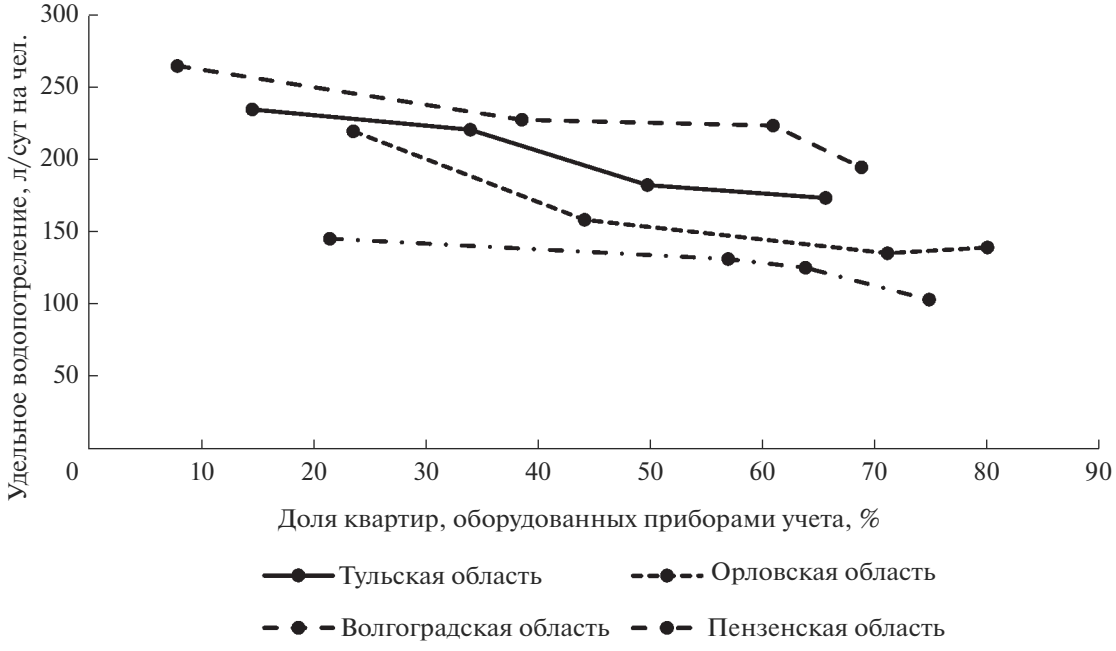


**Рис. 1.** Связь величины удельного использования воды на хозяйственно-питьевые нужды с долей квартир в многоквартирных домах, оборудованных приборами учета холодной воды.

шенная санитарно-техническая арматура, новые машины (посудомоечные, стиральные), приборы и насадки, позволяющие экономить воду в быту. В результате удельное водопотребление на хозяйственно-питьевые нужды на 1 человека повсеместно сокращается. В большинстве регионов на территории бассейна р. Дон среднесуточное водопотребление на 1 жителя за 2000–2018 гг. снизилось на 30–40%, а в Пензенской и Саратовской областях в ≥2 раза [7].

С 2010 г. каждые три года публикуются данные по числу индивидуальных приборов учета коммунальных ресурсов, устанавливаемых в многоквартирных домах во всех субъектах федерации России, в том числе и приборов учета холодной воды [9, 10, 20, 21]. Поскольку тарифы на воду ощутимо увеличиваются, граждане стали бережно относиться к этому важному ресурсу. Это хорошо видно на примере ряда регионов территории бассейна р. Дон, где последовательно приведены данные за 2009, 2012, 2015 и 2018 гг. (рис. 1).

Поскольку доля квартир, оборудованных приборами учета холодной воды, будет расти, предполагаем дальнейшее снижение удельного водопотребления на хозяйственно-питьевые нужды, хотя и в меньшей степени, чем ранее. В соответствии с прогнозами Росстата численности населения и с региональными прогнозами удельного водопотребления объем использования воды на хозяйственно-питьевые нужды в бассейне р. Дон снизится с 555 млн м$^3$ в 2018 г. до 521 и 483 млн м$^3$ в 2025 и 2030 гг. соответственно (табл. 1).

## ПРОГНОЗ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ НУЖДЫ

Оценка развития промышленного водопотребления проведена с учетом разработок, предложенных в “Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года”, “Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики до 2035 года”, “Схеме и программе развития Единой энергетической системы России на 2019–2025 годы” [19, 24, 25].

Анализ использования воды на нужды промышленности и энергетики в бассейне р. Дон показал, что введение мощностей оборотного и повторно-последовательного водоснабжения – главная причина снижения забора свежей воды [7]. С 1990 по 2018 г. использование свежей воды в бассейне р. Дон на производственные нужды сократилось с 5.8 до 2.9 км$^3$, оборотной и повторно-последовательной воды – увеличилось с 10.4 до 17.0 км$^3$, а суммарное водоснабжение – с 16.2 до 20.0 км$^3$. Коэффициент водооборота (отношение объема оборотного и повторно-последовательного водопотребления к валовому водопотреблению на производственные нужды) в целом по бассейну за этот период вырос с 64.2 до 85.3%. В годы экономической депрессии его рост был незначительным, после 2000 г. – весьма существенным.

Наиболее крупные водопопользователи в бассейне р. Дон – объекты атомной и тепловой энергетики межрегионального значения: Нововоро-

**Таблица 1.** Фактический и прогнозный объем использования воды на хозяйственно-питьевые нужды в субъектах федерации на территории бассейна р. Дон

| Субъект Федерации | Объем использования воды на хозяйственно-питьевые нужды, млн м$^3$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | всего | | | в бассейне р. Дон | | |
| | 2018 г. | 2025 г. | 2030 г. | 2018 г. | 2025 г. | 2030 г. |
| Белгородская область | 97.62 | 89 | 82 | 88.8 | 81 | 75 |
| Воронежская область | 126.36 | 119 | 110 | 126.36 | 119 | 110 |
| Курская область | 44.03 | 41 | 38 | 1.5 | 1.4 | 1.3 |
| Липецкая область | 61.1 | 57 | 51 | 60.9 | 56 | 51 |
| Орловская область | 38.07 | 33 | 30 | 3.8 | 3.3 | 3.0 |
| Рязанская область | 68.05 | 61 | 55 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| Тамбовская область | 58.25 | 50 | 46 | 15.2 | 13 | 12 |
| Тульская область | 94.23 | 84 | 76 | 15.1 | 13 | 12 |
| Республика Калмыкия | 6.59 | 6 | 5 | 0.5 | 0.4 | 0.4 |
| Краснодарский край | 272.99 | 266 | 261 | 2.7 | 2.7 | 2.6 |
| Волгоградская область | 178.54 | 158 | 143 | 17.9 | 17 | 16 |
| Ростовская область | 179.67 | 173 | 163 | 167.1 | 161 | 151 |
| Ставропольский край | 91.18 | 89 | 83 | 39.2 | 38 | 36 |
| Пензенская область | 50.48 | 50 | 44 | 3.7 | 3.7 | 3.2 |
| Саратовская область | 131.31 | 120 | 107 | 11.8 | 11 | 9.7 |
| Итого бассейн р. Дон | – | – | – | 554.8 | 521 | 483 |

нежская и Ростовская АЭС, Новочеркасская и Ставропольская ГРЭС. На Верхнем Дону расположены крупные промышленные комплексы городов Липецка и Воронежа. На Нижнем Дону крупные потребители – промышленные комплексы городов Волгодонска, Новочеркасска, Шахты, Ростова-на-Дону, Азова и др.

Поскольку основная доля воды в промышленности расходуется на охлаждение реакторов атомных и тепловых электростанций, производство электроэнергии оказывает очень большое влияние на изменение объема водопотребления в промышленности. Покажем влияние изменения величин коэффициентов водооборота $X_1$ и производства электроэнергии $X_2$ за 1997–2018 гг. на динамику объема использования воды на производственные нужды на примере двух регионов – Воронежской и Тамбовской областей. Связь величины $X_1$ и объема использования воды на производственные нужды – тесная и выражается следующими уравнениями регрессии:

по Воронежской области: $Y = 23.141X_1 + 2410.7$, $R^2 = 0.814$,

по Тамбовской области: $Y = 4.667X_1 + 442.92$, $R^2 = 0.959$.

Связь объема производства электроэнергии в регионах и объема использования воды на производственные нужды менее тесная, но существенная и выражается следующими уравнениями регрессии:

по Воронежской области: $Y = 14.202X_2 + 489.62$, $R^2 = 0.366$,

по Тамбовской области: $Y = 52.853X_2 - 27.42$, $R^2 = 0.527$.

Такие связи выявлены для всех регионов территории бассейна р. Дон. Далее строились уравнения множественной регрессии зависимости объема использования воды на производственные нужды одновременно от величин $X_1$ и $X_2$ за 1997–2018 гг. По некоторым регионам коэффициенты регрессии (в основном при $X_2$) не удовлетворяли критериям 95%-й значимости. Однако для многих регионов получены достоверные уравнения регрессии:

для Воронежской области: $Y = -30.718X_1 + 8.568X_2 + 2987.26$, $R^2 = 0.860$,

для Ростовской области: $Y = -17.741X_1 + 11.286X_2 + 2132.01$, $R^2 = 0.842$,

для Тульской области: $Y = -32.716X_1 + 16.961X_2 + 3129.74$, $R^2 = 0.829$,

для Курской области: $Y = -52.741X_1 + 3.144X_2 + 5208.82$, $R^2 = 0.927$,

для Саратовской области: $Y = -25.986X_1 - 4.763X_2 + 2918.11$, $R^2 = 0.956$.

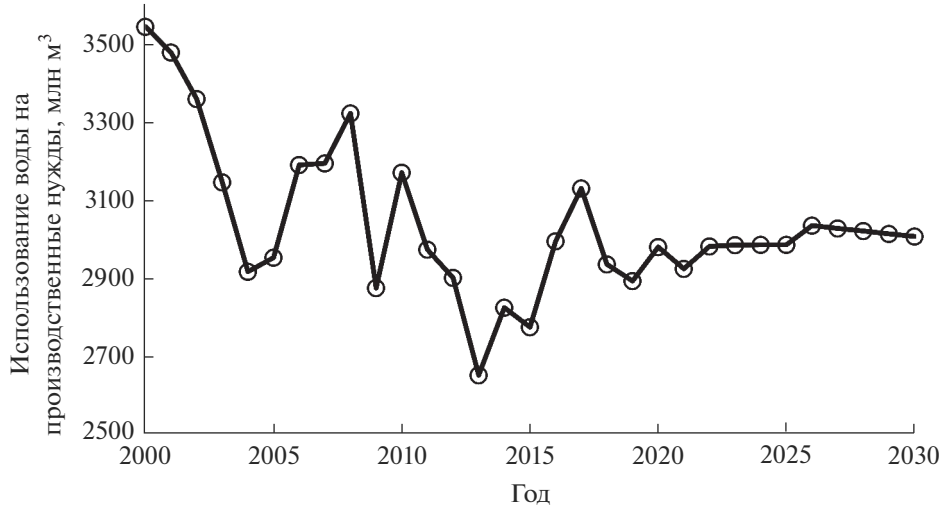


**Рис. 2.** Фактический и прогнозный объем использования воды на производственные нужды на территории бассейна р. Дон, млн м$^3$.

Для прогноза объема использования воды на производственные нужды в других субъектах федерации использовались линейные уравнения регрессии зависимости объема использования воды на производственные нужды или от $X_1$, или от $X_2$.

На основе полученных уравнений множественной и линейной регрессии рассчитаны прогнозные оценки использования воды на производственные нужды по субъектам федерации территории бассейна р. Дон. Максимальные приросты объема водопотребления на производственные нужды на территории бассейна р. Дон отмечаются в Воронежской области и Ставропольском крае в результате ввода новых мощностей электроэнергетики и увеличения производства электроэнергии [19, 24]. В то же время в Ростовской области в результате противоположного процесса произойдет сокращение промышленного водопотребления. В целом по бассейну объем водопотребления на производственные нужды увеличится в 2025 г. по сравнению с 2018 г. на 5, а в 2030 г. – на 6% (рис. 2).

В результате медленного роста $X_1$ (во многих регионах он приближается к максимуму) и незначительного увеличения $X_2$ в целом по бассейну на фоне его сокращения в некоторых регионах в предстоящей среднесрочной перспективе будет отмечаться незначительный равномерный рост промышленного водопотребления в отличие от его резких колебаний и заметного падения в периоды экономических кризисов.

## ПРОГНОЗ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ОРОШЕНИЕ

Для прогнозных оценок водопотребления на орошение определяющее значение имеют достоверные оценки развития площадей орошаемых земель (ОЗ) по отдельным регионам, входящим в бассейн р. Дон, а также сценарии изменения климата. В каждом субъекте федерации с начала 2010-х гг. разрабатывались государственные программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции. Как правило, составной частью таких программ были подпрограммы по развитию мелиорации земель сельскохозяйственного назначения.

Имеющаяся отчетность о наличии площади ОЗ, посылаемая региональными управлениями мелиорации и водного хозяйства в департамент мелиорации Министерства сельского хозяйства (МСХ) РФ, весьма недостоверна. В [15] отмечено, что с 2006 по 2016 г. площадь мелиорированных земель (орошаемых и осушаемых) сократилась на 40% (что существенно выше данных, показываемых МСХ РФ), а с фактически действующими мелиоративными системами – сократилась на 18%. В 2016 г. доля земель с фактически действующими мелиоративными системами в площади фактически используемых сельскохозяйственных угодий составляла всего 1.3%.

Наиболее достоверные данные по площади мелиорированных земель, на взгляд авторов, содержат материалы Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2016 г. Подготовка к переписи длится обычно несколько лет, ее проводят высококвалифицированные кадры. Информация по мелиорированным землям представлена по каждому муниципальному району, отдельно по ОЗ и

осушаемым землям, а также по категориям товаропроизводителей – сельхозорганизаций, крестьянских (фермерских) хозяйств, индивидуальных предпринимателей.

Если по данным Департамента мелиорации, основанным на отчетах управлений мелиорации водного хозяйства субъектов федерации и публикуемых в Государственных (национальных) докладах о состоянии и использовании земель в Российской Федерации, в 2016 г. в России имелось 4670.6 тыс. га ОЗ, то по итогам Всероссийской сельскохозяйственной переписи, площадь орошаемых сельскохозяйственных угодий составляла 1816.5 тыс. га, из них с фактически действующей оросительной системой 1003.0 тыс. га [12]. Расчет площади фактических ОЗ в бассейне р. Дон был основан на итогах сельскохозяйственной переписи 2016 г. по 15 субъектам федерации. Данные по площади ОЗ за более ранние годы определялись как разность между площадью в 2016 г. и площадью введенных в эксплуатацию ОЗ в результате нового строительства и реконструкции ОЗ за соответствующие периоды, взятые из статистических сборников по агропромышленному комплексу [1, 2]. Данные по приросту ОЗ после 2016 г. брались из сборников по АПК [3, 4].

Ниже для примера приведена информация о современном состоянии и развитии орошаемого земледелия в будущем по двум субъектам федерации на территории бассейна Дона, хотя она была собрана и обработана по всем 15 субъектам федерации.

По данным сельскохозяйственной переписи 2016 г., в Липецкой области находилось 8438 га ОЗ, из них с фактически действующей оросительной системой – 8387 га [11]. По отчетам “Липецкмелиоводхоза”, в 2007–2018 гг. ежегодно фактически поливалось 10.7 тыс. га земель, что превышает площадь наличных ОЗ по данным переписи. В 2010–2017 гг. ежегодно вводили в эксплуатацию 0.2–1.3 тыс. га ОЗ, а в 2018 г. ввели 5.3 тыс. га, но площадь наличных ОЗ в области, по отчетности “Липецмелиоводхоза”, по-прежнему оставалась неизменной. Согласно подпрограмме “Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения Липецкой области на 2018–2024 годы”, в области намечается ввести в эксплуатацию за 2020–2024 гг. суммарно 3824 га ОЗ [16].

По данным сельскохозяйственной переписи 2016 г., в Ростовской области находилось 145316 га ОЗ, из них с фактически действующей оросительной системой – 76992 га [13]. По отчетам “Ростовмелиоводхоза”, в последние годы фактически поливалось 57–77 тыс. га земель. В 2014–2018 гг. ежегодно вводилось в эксплуатацию 3.2–6.1 тыс. га ОЗ. Всего за этот период введено 26.1 тыс. га орошаемых сельскохозяйственных угодий. Согласно подпрограмме “Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения”, в 2020–2030 гг. в области намечается ввести 36 тыс. га ОЗ [17].

При отсутствии программ развития орошения до 2030 г. (в большинстве регионов) при обосновании прогнозных площадей орошения авторы исходили из темпов развития мелиорации, характерных для программ развития до 2024–2025 гг. По оценкам авторов, площадь ОЗ на территории бассейна Дона к 2030 г. увеличится на 72% и составит 332 тыс. га (табл. 2).

По прогнозам климатологов, в XXI в. в ЕЧР ожидается увеличение расходной части водного баланса. Диапазон ожидаемого роста дефицита испарения может возрасти к 2030–2039 гг. для регионов территории бассейна Дона от 40–60 мм для среднего и влажного сценариев до 100 м для сухого сценария [8].

На изменение величины удельного водопотребления будут оказывать влияние две противоположные тенденции. С одной стороны, в результате роста засушливости климата и дефицита испарения частота поливов и оросительная норма должны увеличиваться. С другой стороны, в производстве все шире применяются водосберегающие и экологически безопасные технологии орошения. За период с 1999 по 2018 г. площадь капельного орошения, позволяющего резко снизить потребление воды, выросла в России с 0.9 до 83.4 тыс. га. Такие же темпы развития капельного орошения характерны и для бассейна Дона. Многочисленными опытами, проводимыми в РФ более 20 лет, доказано, что на посевах риса аэробных сортов, поливаемого капельным способом, возможно получить высокую урожайность при экономии оросительной воды до 5 раз по сравнению с постоянным поддержанием слоя воды на поле. Увеличивается площадь, поливаемая современными экономичными дождевальными машинами. По оценкам авторов статьи, в итоге к 2030 г. удельное водопотребление на 1 га может вырасти на 10–15%, что и было заложено в расчеты величины водопотребления.

Исходя из прогнозных площадей орошения и удельных норм водопотребления, характерных для каждого региона в связи с особенностями структуры посевных площадей на орошении, рассчитаны объемы водопотребления на орошение сельскохозяйственных земель для каждого субъекта федерации. В целом для бассейна р. Дон объем водопотребления для этих целей увеличится с 843 млн м$^3$ в 2018 г. до 1184 млн м$^3$ в 2025 г. и 1368 млн м$^3$ в 2030 г. (рис. 3).

**Таблица 2.** Фактическая и прогнозная площадь орошаемых земель с учетом ежегодного ввода в эксплуатацию земель в результате строительства, реконструкции и технического перевооружения оросительных систем в субъектах федерации на территории бассейна р. Дон, тыс. га

| Субъект Федерации | Площадь орошаемых земель, тыс. га | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | всего | | | в бассейне р. Дон | | |
| | 2018 г. | 2025 г. | 2030 г. | 2018 г. | 2025 г. | 2030 г. |
| Белгородская область | 10.4 | 18.4 | 23.4 | 7.3 | 12.9 | 16.4 |
| Воронежская область | 24.2 | 38.0 | 48.0 | 24.2 | 38.0 | 48.0 |
| Курская область | 3.4 | 5.8 | 8.3 | 0.3 | 0.6 | 0.8 |
| Липецкая область | 14.3 | 21.7 | 24.7 | 14.3 | 21.7 | 24.7 |
| Орловская область | 1.5 | 4.0 | 5.7 | 0.4 | 1.2 | 1.7 |
| Тамбовская область | 9.5 | 13.5 | 15.5 | 2.8 | 6.0 | 6.9 |
| Тульская область | 4.3 | 5.5 | 6.5 | 0 | 0.1 | 0.1 |
| Республика Калмыкия | 42.7 | 78.1 | 105.6 | 3.6 | 6.6 | 9.0 |
| Волгоградская область | 89.5 | 147.7 | 187.7 | 19.7 | 32.5 | 41.3 |
| Ростовская область | 97.1 | 119.2 | 139.2 | 92.3 | 113.2 | 132.2 |
| Ставропольский край | 85.0 | 127.8 | 155.3 | 23.4 | 35.2 | 42.7 |
| Пензенская область | 7.6 | 15.0 | 20.0 | 0.1 | 1.1 | 1.4 |
| Саратовская область | 111.0 | 150.9 | 173.5 | 4.4 | 6.0 | 6.9 |
| Итого бассейн р. Дон | – | – | – | 192.8 | 275.1 | 332.1 |

В условиях нарастающего дефицита водных ресурсов необходимо проводить опытные работы по привлечению сточных вод ЖКХ, животноводческих комплексов, а также коллекторно-дренажных вод для орошения различных видов сельскохозяйственных культур, в первую очередь технических. Данные меры широко используются в сельском хозяйстве зарубежных стран и должны применяться в России при наступлении маловодных и засушливых периодов.

## ПРОГНОЗ ОБЪЕМА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДЫ НА ВСЕ НУЖДЫ И ПОЛНОГО ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ (ВОДОЗАБОРА)

Расходы воды в трех вышеописанных секторах народного хозяйства составляют, как правило, 75–95% суммарного водопотребления на все нужды для отдельных регионов. Рассмотрим кратко особенности водопотребления на другие значимые нужды.

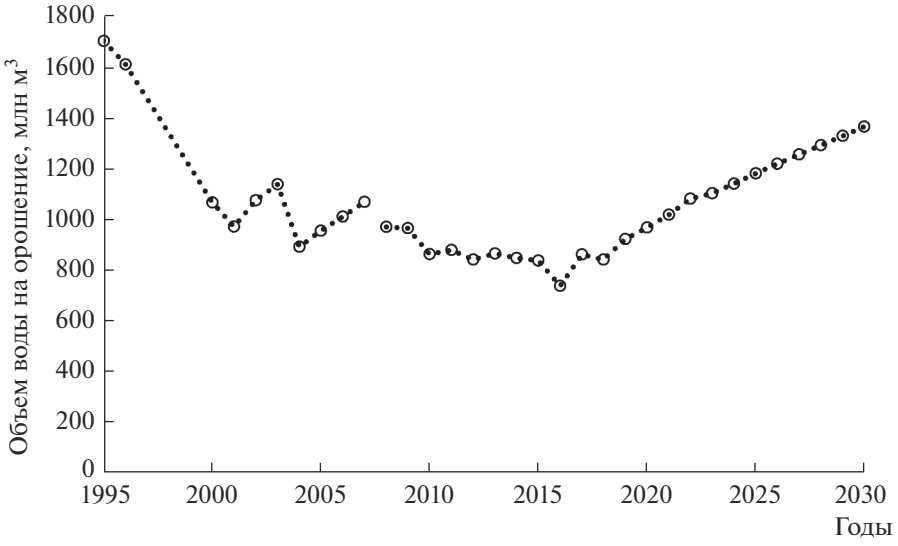


**Рис. 3.** Фактический и прогнозный объем использования воды на орошение на территории бассейна р. Дон.

**Таблица 3.** Фактические и прогнозные объемы изъятия воды из водных источников (водозабора) по регионам территории бассейна Дона

| Субъект федерации | Объем изъятия воды из водных источников, млн м$^3$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | всего | | | в бассейне р. Дон | | |
| | 2018 г. | 2025 г. | 2030 г. | 2018 г. | 2025 г. | 2030 г. |
| Белгородская обл. | 321.5 | 339 | 335 | 295 | 302 | 298 |
| Воронежская обл. | 405.5 | 555 | 537 | 406 | 555 | 537 |
| Курская обл. | 225.2 | 219 | 188 | 7.1 | 6,8 | 5.8 |
| Липецкая обл. | 193.0 | 184 | 175 | 199 | 189 | 180 |
| Орловская обл. | 82.4 | 77 | 71 | 16 | 16 | 15 |
| Рязанская обл. | 173.1 | 167 | 159 | 0.3 | 0.3 | 0.4 |
| Тамбовская обл. | 110.2 | 111 | 107 | 33 | 35 | 34 |
| Тульская обл. | 293.6 | 316 | 290 | 39 | 40 | 36 |
| Республика Калмыкия | 380.3 | 603 | 848 | 16 | 24 | 34 |
| Краснодарский край | 6290.0 | 7669 | 8644 | 6.3 | 6.2 | 6.0 |
| Ставропольский | 2179.1 | 2017 | 2131 | 37 | 36 | 37 |
| Волгоградская обл. | 966.8 | 1228 | 1343 | 99 | 169 | 201 |
| Ростовская обл. | 3558.4 | 3616 | 3788 | 3459 | 3531 | 3599 |
| Пензенская обл. | 203.2 | 238 | 232 | 5.7 | 7.0 | 6.7 |
| Саратовская обл. | 852.3 | 1185 | 1264 | 43 | 48 | 48 |
| Итого бассейн р. Дон | – | – | – | 4661 | 4965 | 5038 |

В связи с резким уменьшением поголовья скота в 1990-х – начале 2000-х гг. существенно снизилось водопользование на нужды сельскохозяйственного водоснабжения. Если раньше в регионах Черноземья его доля превышала 10% в суммарном водопотреблении, то сейчас она составляет 2–3%. Лишь в самое последнее время в связи с возрождением животноводства стала существенно расти эта статья водопотребления в Белгородской, Тамбовской областях и Ставропольском крае. Так как в ближайшем будущем намечается существенное развитие животноводства, в том числе мясного направления для экспортной реализации этой продукции, следует ожидать заметного роста объемов сельскохозяйственного водоснабжения в регионах с аграрной специализацией.

Значительные расходы воды на нужды прудового рыбного хозяйства отмечаются в Волгоградской, Ростовской областях, Ставропольском и Краснодарском краях (60–120 млн м$^3$). По-видимому, в среднесрочной перспективе резкого изменения объема водопотребления на эти нужды не предвидится.

Расходы воды на поддержание горизонтов в каналах, включая замочку каналов, за последние 10 лет существенно выросли, и в 2016–2018 гг. в Ростовской области они составили ~100 млн м$^3$, а в Ставропольском крае приблизились к 300 млн м$^3$. Эти обстоятельства учтены при прогнозировании водопотребления на период 2025–2030 гг. Расходы воды на все остальные нужды, кроме вышеперечисленных, в большинстве субъектов федерации невелики и суммарно в общей структуре водопотребления составляют максимально 4–7% (кроме Ставропольского края и Калмыкии).

С учетом всех вышеперечисленных обстоятельств рассчитаны прогнозные объемы использования воды на все нужды. Суммарный объем использования воды на все нужды на территории бассейна р. Дон к 2030 г. вырастет по сравнению с 2018 г. незначительно – на 13%. Для расчета объемов полного водопотребления (водозабора) на среднесрочную перспективу использовано отношение объема использования воды на все нужды к объему водозабора в последние годы, специфические для каждого субъекта федерации и в то же время довольно устойчивые во времени из-за существенной консервативности структуры водопотребления. В результате получены прогнозные объемы водозабора по регионам бассейна р. Дон (табл. 3).

По оценкам авторов статьи, объем водозабора на территории бассейна р. Дон в среднесрочной перспективе к 2030 г. вырастет незначительно – на ~8%. Максимальные приросты водозабора в бассейне будут отмечаться в Воронежской области в связи с развитием энергетики и в Волгоградской области в связи с развитием орошения.

## ВЫВОДЫ

Прогнозы водопотребления, разработанные в конце XX – начале XXI в., разработаны без учета реальной экономической ситуации в России и исходя из привлечения огромных средств в водное хозяйство. Это приводило к завышенным прогнозным оценкам, особенно в сельском хозяйстве.

Выполненный прогноз потребности в воде имеет ориентировочный характер, исходит из принятых климатических сценариев, утвержденных программ социально-экономического и демографического развития и допущения, что экономических кризисов и природных катаклизмов в этот короткий период не произойдет.

Согласно демографическим прогнозам, численность населения на территории бассейна р. Дон по среднему варианту развития снизится по сравнению с 2018 г. на 0.27 млн к 2025 г. и на 0.49 млн к 2030 г. Будет продолжать снижаться и водопотребление на хозяйственно-питьевые нужды в расчете на 1 человека.

Объем потребления свежей воды на производственные нужды зависит в первую очередь от динамики коэффициента водооборота и спроса на электроэнергию. По прогнозам этих показателей, водопотребление на эти нужды в бассейне Дона к 2030 г. немного вырастет.

Всероссийская сельскохозяйственная перепись 2016 года выявила реальные площади орошаемых земель в 15 субъектах федерации на территории бассейна. Согласно региональным программам по развитию мелиорации земель, площадь орошаемых земель вырастет к 2030 г. на 140 тыс. га, а объем водопотребления на орошение с учетом климатических сценариев – на ~60%.

В целом по бассейну объем полного водопотребления к 2030 г., по оценкам авторов, увеличится на ~8%. Рост не очень значительный, но в случае сохранения тенденции снижения стока антропогенное воздействие на водные ресурсы в бассейне р. Дон станет критическим и потребуется привлечение внешних источников водообеспечения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. Агропромышленный комплекс России в 2010 году. М.: МСХ РФ, 2011. 554 с.
2. Агропромышленный комплекс России в 2013 году. М.: МСХ РФ, 2014. 668 с.
3. Агропромышленный комплекс России в 2016 году. М.: МСХ РФ, 2017. 721 с.
4. Агропромышленный комплекс России в 2018 году. М.: МСХ РФ, 2019. 555 с.
5. *Березнер А.С.* Прогноз развития водопотребления орошаемого земледелия СССР в отдаленной перспективе // Изв. РАН. Сер. геогр. 1982. № 1. С. 44–52.
6. *Воропаев Г.В., Благоверов Б.Г., Исмайылов Г.Х.* Экономико-географические аспекты формирования территориальных единиц в водном хозяйстве страны. М.: Наука, 1986. 240 с.
7. *Демин А.П.* Водообеспечение населения и объектов экономики в бассейне реки Дон: современное состояние и проблемы // Вод. ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 767–778.
8. Доклад о научно-методических основах для разработки стратегий адаптации к изменениям климата в Российской Федерации (в области компетенции Росгидромета). СПб.; Саратов: Амирит, 2020. 120 с.
9. Жилищное хозяйство и бытовое обслуживание населения в России: 2010. Стат. сб. М.: Росстат, 2010. 326 с.
10. Жилищное хозяйство и бытовое обслуживание населения в России: 2013. Стат. сб. М.: Росстат, 2013. 286 с.
11. Итоги Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2016 года. Т. 3. Земельные ресурсы и их использование. Липецк: Липецкстат, 2018. 93 с. [Электронный ресурс]. https://lipstat.gks.ru/folder/41912 (дата обращения: 12.11.2020)
12. Итоги Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2016 года. Т. 3. Земельные ресурсы и их использование. М.: Статистика России, 2018. 307 с. [Электронный ресурс]. https://www.gks.ru/storage/mediabank/VSXP_2016_T_3_web.pdf (дата обращения: 12.11.2020)
13. Итоги Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2016 года. Т. 3. Земельные ресурсы и их использование. Ростов-на-Дону: Территориальный орган Федер. службы гос. статистики по Ростовской области, 2018. 267 с. [Электронный ресурс]. https://rostov.gks.ru/storage/mediabank/%D0%92%D0%A1%D0%A5%D0%9F-2016_%D0%A2%D0%BE%D0%BC_3.pdf (дата обращения: 12.11.2020)
14. Паспорт федерального проекта “Чистая вода”. [Электронный ресурс]. https://www.minstroyrf.ru/docs/17692/ (дата обращения: 10.11.2020)
15. *Петриков А.В.* Использование инновационных технологий различными категориями хозяйств и совершенствование научно-технологической политики в сельском хозяйстве // АПК: экономика. управление. 2018. № 9. С. 4–11.
16. Постановление администрации Липецкой области от 28.10.2013 г. № 485 “Об утверждении государственной программы Липецкой области “Развитие сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции”. Ред. 26.11.2019. [Электронный ресурс]. http://ush48.ru/support/programs/ (дата обращения: 12.11.2020)
17. Постановление правительства Ростовской области от 17 октября 2018 года № 652 “Об утверждении государственной программы Ростовской области “Развитие сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия в Ростовской области” (с изменениями на 29 ноября 2019 г.). [Электронный ре-

сурс]. http://docs.cntd.ru/document/550217748 (дата обращения: 12.11.2020)

18. Предположительная численность населения Российской Федерации до 2035 года (статистический бюл.). М.: Росстат, 2018. [Электронный ресурс]. http://old.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/publications/catalog/doc_1140095525812 (дата обращения: 10.11.2020)
19. Приказ Минэнерго России от 28.02.2019 № 174 "Об утверждении схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2019–2025 годы". [Электронный ресурс]/ https://minenergo.gov.ru/node/14828 (дата обращения: 11.11.2020)
20. Приложение к статистическому сборнику "Жилищное хозяйство в России. 2016" (Информация в разрезе субъектов Российской Федерации). [Электронный ресурс]. https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13234 (дата обращения: 10.11.2020)
21. Приложение к статистическому сборнику "Жилищное хозяйство в России. 2019" (Информация в разрезе субъектов Российской Федерации). [Электронный ресурс]. https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13234 (дата обращения: 10.11.2020)
22. Проблемы и перспективы использования водных ресурсов в агропромышленном комплексе России / Под ред. *В.Н. Щедрина*. М.: Мелиоводинформ, 2009. 342 с.
23. Проект стратегии развития жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации до 2035 г. [Электронный ресурс]. https://www.minstroyrf.ru/docs/55897/ (дата обращения: 10.11.2020.)
24. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2017 г. № 1209-р "Об утверждении Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики до 2035 года". [Электронный ресурс]. http://government.ru/docs/28131/ (дата обращения: 11.11.2020)
25. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р "Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года". [Электронный ресурс]. https://minenergo.gov.ru/node/1026 (дата обращения: 11.11.2020)
26. *Родзиллер И.Д., Воронова О.М.* Многовариантный нормативный прогноз развития водного хозяйства отрасли промышленности // Вод. ресурсы. 1982. № 4. С. 99–108.
27. *Шикломанов И.А., Балонишникова Ж.А., Цыценко К.В.* Оценка перспективного водопотребления // Водные ресурсы России и их использование. СПб.: ГГИ, 2008. С. 473–484.
28. *Burek P., Satoh Y., Fischer G. et al.* Water Futures and Solution – Fast Track Initiative (Final Rep.). IIASA Working Paper. Laxenburg, Austria: IIASA, 2016. [Электронный ресурс]. http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/13008/ (дата обращения: 04.11.2020)
29. *Greve. P., Kahil. T., Mochizuki. J. et al.* Global assessment of water challenges under uncertainty in water scarcity projections // Nature Sustainability. 2018. № 1. P. 486–494. [Электронный ресурс]. 10.1038/s41893-018-0134-9 (дата обращения: 04.11.2020)
30. *Karamaziotis. P.I., Raptis. A., Nikolopoulos. K. et al.* An empirical investigation of water consumption forecasting methods // Int. J. Forecasting. 2020. V. 36. Iss. 2. P. 588–606. [Электронный ресурс]. https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2019.07.009 (дата обращения: 04.11.2020)
31. Water Demand Management / Ed. *D. Butler, F. Memon*. London: IWA Publ., 2006. 384 p.