

СОДЕРЖАНИЕ

Том 154, номер 4, 2022

Приречные пространства города: картографирование и оценка социально-экологических функций <i>О. А. Илларионова, О. А. Климанова</i>	3
Цифровая трансформация и пространственная организация непищевого ритейла в российском городе <i>К. Э. Аксенов</i>	22
Химический состав поверхностных сточных и речных вод, поступающих с территории города Петрозаводска в Онежское озеро <i>А. В. Сабьлина, Т. А. Ефремова, О. И. Икко</i>	39
Оценка вклада санитарно-технических мероприятий в снижение поступления общего фосфора и азота в Балтийское море с водосборов рек Волковки и Охты Санкт-Петербурга <i>С. М. Клубов, В. Ю. Третьяков, В. В. Дмитриев, Ю. О. Рожкова</i>	54
К оценке возможного влияния материкового стока на гибель гидробионтов в Авачинском заливе Тихого океана (Камчатка) <i>С. Р. Чалов, А. С. Цыпленков, Д. И. Школьный, К. Н. Прокопьева, Е. И. Бахарева</i>	69
Новые виды голожаберных моллюсков семейства Onchidorididae по материалам экспедиции “Восточный бастион-Курильская гряда 2021” из прибрежных вод островов Уруп и Чирпой <i>А. В. Мартынов, Т. А. Коршунова</i>	85

ПРИРЕЧНЫЕ ПРОСТРАНСТВА ГОРОДА: КАРТОГРАФИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ

© 2022 г. О. А. Илларионова^а, *, О. А. Климанова^а, **

^аМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: heatherpaw95@gmail.com

**E-mail: oxkl@gmail.com

Поступила в редакцию 18.05.2022 г.

После доработки 07.07.2022 г.

Принята к публикации 12.07.2022 г.

В работе предложены методы выделения приречных пространств (ПРП) в городе и оценки их социально-экологических функций на основе геопространственных данных, в т.ч. космических снимков Landsat 8, цифровой модели рельефа Aster Global DEM, материалов генеральных планов городов, карт четвертичных отложений ВСЕГЕИ (1 : 200000) и OpenStreetMap. Рассмотрены геоморфологические, социальные и административно-правовые подходы к обособлению ПРП. Авторы статьи предлагают комбинированный метод определения границ ПРП для городского уровня с использованием TWI (Topographic Wetness Index – топографический индекс влажности), инструмента “глубины долин”, данных о четвертичных отложениях, и карт функционального зонирования, а также свои критерии оценки качества зелёной инфраструктуры ПРП в аспекте предоставления социальных и экологических функций при помощи карт земельного покрова и функционального зонирования для административных границ города и зоны сплошной застройки. Выделены ПРП для трех модельных городов (Нижний Новгород, Волгоград, Хабаровск) и для них рассчитаны площади разных по эколого-социальной ценности категорий земельного покрова и функциональных зон. Получены выводы о величине вклада зелёной инфраструктуры ПРП в общий объем экосистемных услуг зелёной инфраструктуры города и зависимости этого показателя от физико-географических условий и взаиморасположения реки и города.

Ключевые слова: зелёная инфраструктура города, оценка комфортности городской среды, приречные пространства, экосистемные услуги

DOI: 10.31857/S086960712204005X

ВВЕДЕНИЕ

Реки и прилегающие к ним территории выступают важной частью городской среды, определяя как возможности градостроительного развития, так и его ограничения. В практике городского планирования они входят в состав водно-зеленого или экологического каркаса (сейчас также широко используется термин “водно-зеленая инфраструктура”) и оказывают ряд важнейших экосистемных услуг (ЭУ), необходимых для обеспечения комфортной городской среды и поддержания здоровья населения [26]. Так, экосистемы незапечатанных приречных пространств (ПРП) способствуют регулированию поверхностного и подземного стока и городского микроклимата [20, 27], сохранению биологического разнообразия околородных и водных местообитаний, предоставляют возможности для разных видов рекреации горожан (прогулки на све-

жем воздухе, занятия водными видами спорта, рыбная ловля и т.д.). Все это, наряду с отмечаемым увеличением риска неблагоприятных гидрологических явлений как в России, так и других странах мира, определяет необходимость дополнительного внимания к исследованию функций приречных территорий в составе зеленой инфраструктуры (ЗИ) города.

В отечественных научных трудах по географии, экологии и архитектуре ПРП определяются по-разному, но везде отмечается, что это буферные зоны, являющиеся связующим звеном между рекой и городской застройкой, которые обеспечивают взаимодействие природных и антропогенных процессов. Д.В. Литвинов [4] рассматривает городское ПРП как контактную полосу, где происходит взаимопроникновение природных и антропогенных элементов города. Е.В. Баклаженко [1] определяет ПРП как зону, непосредственно прилегающую к реке с обеих сторон и воспринимающую как природное влияние реки, так и антропогенное воздействие города. Ха Дуи Ань [8] рассматривает ПРП как планировочные элементы городского каркаса и запасных общественных рекреационных пространств. М.А. Маташова [5] дает определение ПРП как прилегающих к реке городских территорий, объединенных общими механизмами функционирования и использования природных ресурсов. О.Е. Садковская [6] определяет границы ПРП комплексом природных (рельеф, крутизна склонов, характер растительного покрова, литогенная основа и т.д.) и антропогенных (городские морфоструктуры, функциональная зона, тип использования территории, плотность застройки и др.) факторов.

В зарубежных работах для обозначения приречных пространств используется либо термин “*riparian area*” (*рипарианские зоны*), либо “*urban river zone*” (*зона вдоль городской реки*). В первом случае, чаще (но не исключительно) рассматриваются проблемы экологических функций и биоразнообразия; второе понятие чаще применяется для исследования социокультурных, экономических, архитектурных и урбоэкологических задач. П.М. Гроффман и соавторы [14] определяют ПРП как горячие точки экологических функций на месте соприкосновения сухопутных и водных экосистем в городе. Национальный исследовательский совет США [22] называет городские “рипарианские зоны” экотонами между сухопутными и аквальные экосистемами, имеющими особые биофизические условия, экологические процессы и биоту.

В крупных городах России современное состояние и состав зеленой инфраструктуры приречных пространств (ПРП) определяется совокупностью природных, исторических и социально-экономических факторов. В зоне исторической застройки набережные часто сосредоточивают главные достопримечательности и исторически ценные объекты города [6]. И в центральных, и в периферийных частях города, в условиях сокращения промышленного производства в промышленных зонах, значительная часть ПРП оказалась занята недействующей производственной инфраструктурой и пустырями. Часть озелененных территорий (в частности, на речных поймах) из-за инженерно-геологических условий, ограничивающих застройку, сохранилась в естественном или близком к ним состоянии, нередко имея охранный статус [9].

Учитывая большую площадь объектов, ограниченность исходных материалов о состоянии и качестве компонентов городской среды, нередко недоступных только для отдельных участков приречных пространств, актуальными становятся задачи разработки алгоритмов исследования приречных территорий на основе общедоступных геопространственных данных, в т.ч. материалов дистанционного зондирования. Продуктивность такого подхода для оценки состояния и экосистемных услуг зеленой инфраструктуры на общегородском уровне уже показана нами на примере территорий крупнейших городов России [18]. В задачах исследования зеленой инфраструктуры приречных территорий отдельную сложность составляет вопрос их выделения с учетом природных (гипсометрических и геоморфологических), планировочных и функциональных особенностей городской территории. Использование какого-то одного –

градостроительного или экологического — подходов не позволяет полностью учесть своеобразие приречных пространств и предложить адекватные инструменты для их благоустройства и экореабилитации. Последнее же с учетом значимости приречных территорий как знаковых для города особенно актуально при разработке мастер-планов городов или стратегий городского развития. В связи этим цель данной статьи — оценка возможностей использования общедоступных геопространственных данных, в т. ч. данных дистанционного зондирования, для выделения приречных пространств и оценки их функций с целью их последующей оптимизации.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ВЫДЕЛЕНИЮ ПРИРЕЧНЫХ ТЕРРИТОРИЙ И ОЦЕНКЕ ИХ ФУНКЦИЙ

В отечественной и зарубежной литературе, а также в практике градостроительного регулирования используются три основных подхода к определению границ ПРП: административно-правовой, геоморфологический и социально-ориентированный.

Административно-правовой метод подразумевает использование официальных документов (ГОСТ, СНИП, Кодексы РФ и пр.) и упомянутых в них определений для проведения границ. В Российской Федерации единственным задокументированным термином, близким по значению к ПРП, является водоохранная зона (и прибрежная защитная полоса), которая определяется 65 Статьей Водного кодекса РФ как территория, примыкающая к береговой линии водного объекта со специальным режимом осуществления хозяйственной или иной деятельности. Ширина зоны различается в зависимости от длины реки; так, для рек протяженностью более 50 км она составляет 200 м.

С инструментальной точки зрения это наиболее простой метод, который может быть сразу применен к оцифрованному контуру реки инструментами создания буфера в большинстве ГИС-программ. В западноевропейской и американской практике территориального планирования предпринимались попытки дифференцировать размер буфера в зависимости от геоботанических и фаунистических признаков, средней ширины поймы или необходимой для защиты рек озелененной полосы. Для этого выбирались эталонные реки, результаты изучения которых распространялись впоследствии на аналогичные по природным особенностям объекты. Такой подход был отражен в региональных руководствах по штатам США и речным бассейна (Guidelines for Riparian Buffers from Minnesota Forest Resources Council, A Guide for Establishing and Maintaining Riparian Forest Buffers from USDA, Tennessee Urban Riparian Buffer Handbook). В 2000-х гг. появляется ряд работ [23, 29, 32], критикующих подход с зафиксированными буферами ПРП, т.к. подобные границы не отражают реальной зависимости ширины приречной зоны от окружающего ландшафта или гидрологических, геоморфологических, гидрохимических и прочих свойств реки [21] и не совпадают с ландшафтными границами ПРП.

С точки зрения геоморфологического подхода ПРП выделяются по границам речной долины [18], зоне развития активной прибрежной эрозии [31], области распространения аллювиальных отложений и аллювиальных почв [21], тыловому шву первой надпойменной террасы или поймы [27]. Распространение этих явлений отражается на тематических картах, оцифрованные контуры которых впоследствии интегрируются в материалы градостроительного проектирования.

В базе данных Copernicus для выделения приречных пространств, наряду с анализом повторяемости наводнений (JRC Flood Hazard Risk Maps), широко используются различные индексы (индекс топографической влажности TWI, NDVI, NDWI), рассчитанные по ЦМР и мультиспектральным снимкам, и приемы моделирования на основе цифровых моделей рельефа. Указанные индексы в сочетании с данными полевых

исследований могут быть использованы и для выделения зоны приречной растительности [15, 24, 33].

Необходимость в использовании социально-ориентированных подходов чаще всего возникает при исследовании плотно застроенных городских территорий, где естественные берега занимают незначительную площадь. В этом случае при выделении ПРП наибольшее значение придается функциональному назначению и землепользованию прибрежных территорий, их демографическим, архитектурным и планировочным свойствам. Они могут быть учтены в ходе кластерного анализа, с помощью которого обособливаются однородные зоны по характеру городской ткани, плотности населения и функциям вдоль реки [16].

В данной работе мы определяем ПРП города как непосредственно прилегающую к реке в черте города территорию с особыми природными, планировочными или хозяйственными свойствами, отличающими ее от других городских пространств. Учитывая разнородный характер приречных территорий в крупных городах России, для разработки унифицированного алгоритма выделения приречных территорий представляется целесообразным сочетание указанных методов. Для природных (незастроенных) территорий приоритет отдается геоморфолого-гидрологическому подходу, для застроенных – социально-ориентированному.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты исследования. В качестве объектов исследования выбраны Нижний Новгород, Волгоград и Хабаровск. Выбор городов для исследования обоснован их размером (с населением более 500 тыс. чел.), размером крупнейшей реки (длина более 1000 км), а также разными типами взаиморасположения “река-город”. Последнее позволяет отразить роль реки и ее приречных пространств в развитии города: мы предполагаем, что река и ее приречные пространства могут предоставлять максимум услуг для населения, в случае, если она проходит через наиболее плотно застроенный и населенный центр города, а территории города в значительной степени лежат на берегах реки. Примерными критериями для определения взаиморасположения “река-город” могут быть следующие:

- расположение города относительно реки (на одном/нескольких берегах);
- удаленность центрального района от реки;
- форма развития города относительно реки (равномерное “расползание” города по обоим берегам, параллельное реке, однонаправленное в сторону от реки). На рис. 1 отражены возможные типы взаиморасположения “река-город”.

К первому типу (рис. 1а) мы отнесли Нижний Новгород: он равномерно развивается между Окой и Волгой, и большая часть центра расположена на берегах этих рек. Второй тип (рис. 1б) характерен для Волгограда, он развивается параллельно правому берегу Волги и имеет вытянутый вдоль реки центр. В Хабаровске город и река относятся к правобережному типу взаиморасположения (рис. 1в). Форма городской зоны сплошной застройки с “лучами” застройки вдоль дорог по направлению от реки позволяет предполагать, что город постепенно развивается вглубь суши, а не вдоль реки, тем самым удаляясь от нее.

Под “сплошной зоной застройки” в данной работе мы подразумеваем непрерывно застроенную (с разной степенью плотности застройки) территорию города. Сплошная зона застройки может включать в себя аэропорты, участки малоэтажной застройки и частных домов, а также другие инфраструктурные объекты как запечатанные территории, являющиеся непосредственным продолжением застроенной части города. Часто отдельные застроенные участки могут быть отделены от других лесными массивами или сельскохозяйственными угодьями. Если эти участки незначительно удалены друг от друга или примыкают друг к другу, то мы считаем их продолжением зоны сплошной

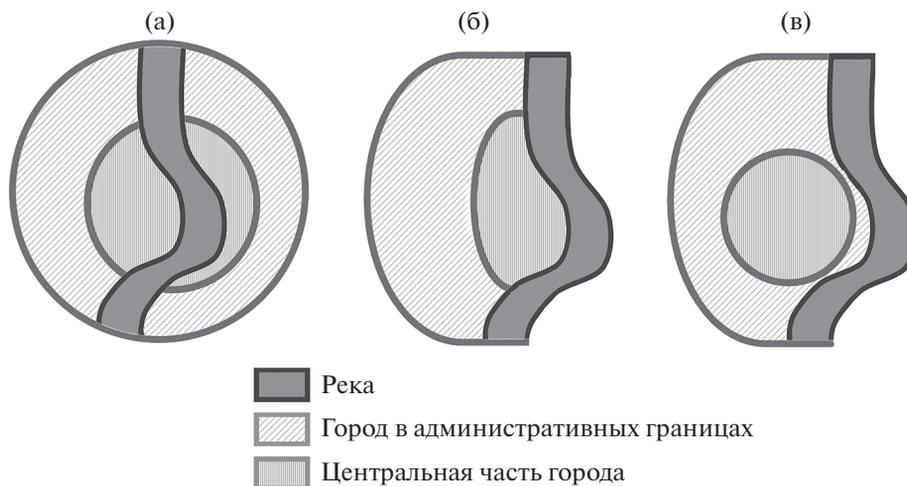


Рис. 1. Типы взаиморасположения “река-город”: а – развитие города по обоим берегам с прибрежным центром; б – развитие города по одному берегу с прибрежным центром; в – развитие города по одному берегу с удаляющимся от реки центром.

Fig. 1. Types of relative position between the city and the river: а—both banks city development; б—one bank city development; в—one bank city development away from the river.

застройки, а включенные массивы рассматриваем как элементы зеленой инфраструктуры. Более того, если зеленый массив “вписан” в зону застройки – то есть глубоко внедряется в застроенную часть и окружен с нескольких сторон застроенной территорией, – мы считаем, что он оказывает значительное влияние на прилегающие городские территории и таким образом является элементом зеленой инфраструктуры внутри зоны сплошной застройки.

Методы определения ПРП. В нашей работе мы определяем ПРП для городов с достаточно разными и неоднородными по структуре прибрежными зонами: один берег может быть плотно застроенным центром города, другой представлять собой “незапечатанную” пойму или “мозаику” зеленых и запечатанных пространств. В связи с этим в работе для выделения ПРП в пределах природных территорий и зон городской застройки использовались разные подходы:

1) Для природных частей, свободных от городской застройки, используется геоморфологический метод. Наиболее доступным представляется использование карты четвертичных образований в масштабе 1 : 200000 (ВСЕГЕИ), доступной на портале <https://www.vsegei.ru/> для ряда регионов России. В этом случае за ПРП принимаются границы контуров современных аллювиальных отложений, соответствующих поймам. На данный момент данные о четвертичных образованиях доступны не для всех регионов России, поэтому ограничиваться одним этим методом при исследовании нескольких объектов не представляется возможным. Более того, при использовании масштаба 1 : 200000 требуется дополнительная верификация, которую можно провести при помощи топографических индексов. Мы опирались на полученные в ArcMap 10.3 растры индекса топографической влажности (Topographic Wetness Index, TWI) [12] и глубины долин (Valley Depth) (рис. 2).

Индекс TWI показывает потенциальную влажность водосбора, т.е. способность ячейки аккумулировать воду. Наиболее высокие значения соответствуют областям с наибольшей аккумуляцией влаги. Поскольку приречная биота и свойственные для

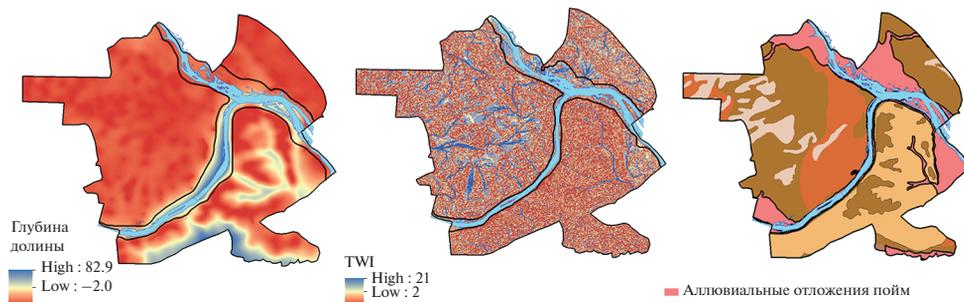


Рис. 2. Геоморфологические подходы к выделению ПРП на примере Нижнего Новгорода.

Fig. 2. Geomorphological approaches to urban river zones delimitation for Nizhniy Novgorod case study.

ПРП эрозионные и гидрологические процессы приурочены к наиболее влажным территориям с высокой аккумуляцией воды, данный индекс можно использовать для определения границ ПРП [28]. TWI был рассчитан на основе предварительно обработанного растра ЦМР Aster Global DEM V3 по формуле [10]:

$$TWI = \ln(\alpha/\text{tg}\beta),$$

где: α – отношение площади, дренируемой через определенную точку на склоне, к длине склона, и рассчитываемое как суммарный сток (flow accumulation); β – крутизна склона (slope).

Другой инструмент, который использовался для определения границ ПРП – глубина долин. Глубина долин – это разница между высотой определенной точки и интерполированной высотой водораздела. Данный показатель обычно используется для определения степени расчлененности рельефа и выделения овражно-балочной сети [30]. Мы приняли за ПРП наиболее четко выделяющиеся террасы долины с наибольшими значениями глубины (т.е. разница высот между этими территориями и водоразделом максимальна) для каждого берега. На растре “глубины долин” ПРП выделялось по границе “наибольшей разницы высот” между точкой и интерполированной высотой водораздела. Последняя обозначается преобладающим красным цветом (значение около 2 м), т.е. это относительно ровная поверхность без значительных колебаний высот. Желтый и синий цвет, напротив, обозначают наибольшую разницу высот относительно средней высоты водораздела. По желтому и синему цвету проводилась граница ПРП. В случае с Нижним Новгородом, эту границу сложнее провести по левому берегу Волги из-за обширной поймы и незначительных перепадов высот в границах города на левом берегу. Мы провели границу на данном участке, ориентируясь на средние размеры ПРП в городах, чтобы избежать включения огромных площадей пойм, относительно других участков ПРП. На данном участке выделение ПРП данным способом не объективно и лучше ориентироваться на данные по TWI или четвертичным отложениям.

Для получения финальных границ ПРП для природных территорий все три полученных растра были наложены друг на друга, после чего была вручную отрисована финальная граница. В случае, если ширина ПРП в одной “природной” части города оказывалась значительно больше, чем в среднем в других, эта большая часть ПРП выделялась так, чтобы ее ширина превышала среднюю не более чем в 3–4 раза. Этот шаг необходим для адекватной оценки состояния ПРП города и предупреждения завышенных показателей озеленения.

2) Для плотно застроенных частей города мы пользовались социально-ориентированным подходом. Во-первых, по ЦМР не всегда возможно достоверно определить

высоту поверхности в пределах города из-за высотных зданий. Во-вторых, внутри городской зоны сплошной застройки трансформированы практически все естественные процессы и свойства, присущие речной долине, и опираться на методы, которые определяют ПРП по практически несуществующим в условиях застройки признакам, по нашему мнению, нецелесообразно. Более того, внутри города большую роль имеет функциональное значение прилегающих к реке территорий, поскольку это является одним из основных критериев определения состояния и ценности ПРП. Таким образом, на основе карт функционального зонирования из приложения к Генеральным планам городов [34–36] мы выделяли ПРП по границам прилегающих непосредственно к реке функциональных зон (рис. 3).

Такие границы часто проведены по крупным улицам, относительно совпадающим с высотными ступенями на растре глубины долин, так как, несмотря на трансформацию плотно урбанизированных земель, при образовании и развитии город, как правило, “вписывается” в существующие мезоформы рельефа [3].

Оценка состояния и ценности ПРП. Состояние зеленой инфраструктуры на ПРП оценивалось по трем индикаторам: 1) доля ЗИ на ПРП; 2) структура ЗИ ПРП; 3) соотношение функциональных зон на ПРП. За показатель ценности ПРП мы принимали вклад ЗИ ПРП в общий объем экосистемных услуг городской ЗИ. Поскольку предо-

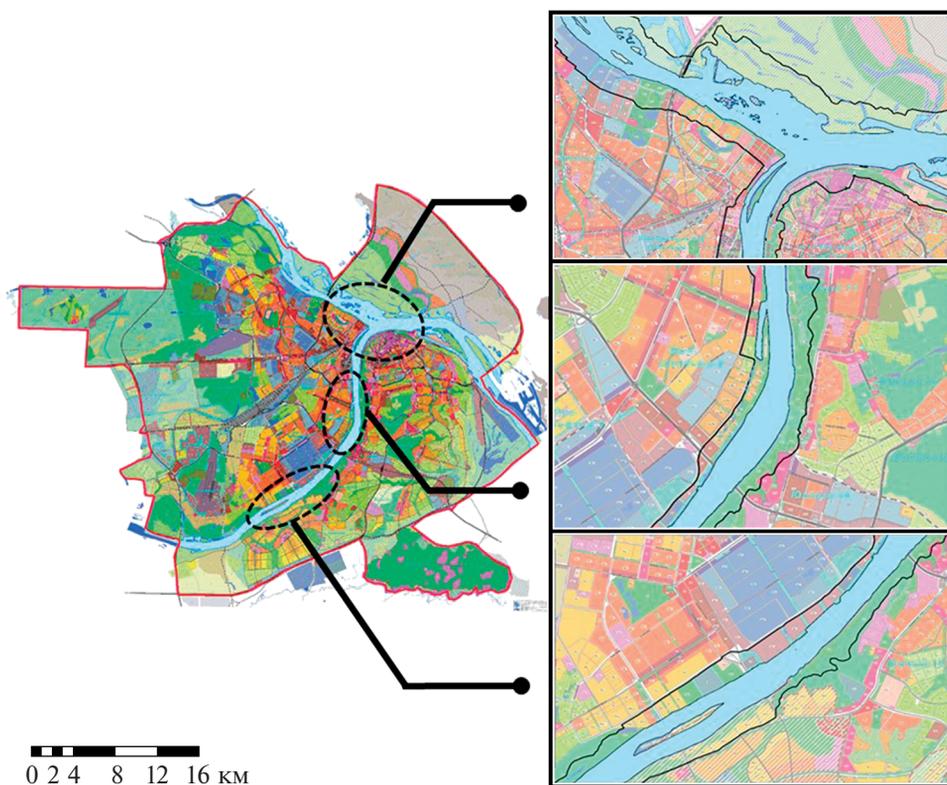


Рис. 3. Выделение границ ПРП по границам функциональных зон Генерального плана на примере Нижнего Новгорода.

Fig. 3. Delimitation of urban river zones according to functional zones' boundaries of the General Plan: case study of Nizhniy Novgorod.

ставляемый объем экосистемных услуг ЗИ в городе напрямую зависит от площади ЗИ [19], то долю ЗИ ПРП от всей площади городской ЗИ можно считать вкладом ЗИ ПРП в формирование общего объема ЭУ зеленой инфраструктурой города. Суть данного “площадного подхода” к оценке объема ЭУ заключается в том, что если мы считаем, что ПРП полностью выполняет ту или иную ЭУ, то оно полностью покрыто незапечатанными озелененными пространствами (т.е. ЗИ занимает 100% площади исследуемой территории). Однако, очевидно, что в городе ЗИ не занимает всю площадь ПРП, а некую долю от его площади. То есть не все ПРП является “поставщиком” ЭУ, а только определенная его часть. Именно этим показателем – долей ЗИ, способной выполнять свою экосистемную роль, от площади всего ПРП – мы и оцениваем вклад ПРП в общий объем ЭУ. Более того, древесная растительность предоставляет больший спектр культурных и средорегулирующих экосистемных услуг, чем недревесная. По этой причине мы также предлагаем оценить, сколько древесной растительности приходится именно на ПРП. Под ЗИ мы подразумеваем совокупность всех незастроенных элементов городского пространства, для которых характерна мультифункциональность, связность и иерархичность [18]. Каждый элемент ЗИ занимает определенное место в системе общего городского озеленения (что характеризует его иерархичность), выполняет определенные функции (функциональность) и связан с определенными районами города, прилегающими территориями или другими элементами зеленой инфраструктуры (связность). В рамках данной работы мы оцениваем иерархичность, связность и функциональность, разделяя растительный покров на древесный и недревесный, допуская, что первый выполняет больший спектр экосистемных услуг и тем самым является более ценным, и учитывая месторасположение ЗИ относительно городской зоны сплошной застройки.

Для определения площади ЗИ города и ПРП на основе синтезированных в “искусственных цветах” снимков Landsat 8 за июль–август 2020 г. была создана карта земельного покрова. Для этого в ArcMap 10.3 сначала было проведено дешифрирование с обучением при помощи инструмента Maximum Likelihood Classification и вручную созданных эталонов для пяти классов земельного покрова: 1) древесная растительность; 2) недревесная растительность; 3) незапечатанные поверхности, лишенные растительности; 4) застроенные территории; 5) водные поверхности. Затем были выделены сельскохозяйственные угодья, для чего по снимку в “естественных цветах” проводилось ручное дешифрирование по геометрическим дешифровочным признакам. В целях верификации и уточнения границ с/х угодий к ним были добавлены полигоны из категории “landuse” в OSM с ключами “meadow”, “farmland”, “orchard” (другие категории с/х земель для изучаемых территорий не представлены в OSM). Сельскохозяйственные площади были выделены из прочей растительности и отнесены в отдельный класс земельного покрова.

Чтобы проводить оценку ЗИ ПРП на основе данных дистанционного зондирования (ДДЗ), удобно пользоваться пороговыми значениями рекомендуемых размеров ЗИ на исследуемом объекте. С одной стороны, можно ориентироваться на градостроительные нормативы, согласно которым доля ЗИ от площади города должна составлять от 40 [13] до 50% [2] в жилых районах. Данные нормативы в первую очередь ориентированы на формирование комфортной городской среды для горожан, т.е. охватывают социальный аспект ЗИ ПРП. С другой стороны, следует принимать во внимание и рекомендации по озеленению самих ПРП. Как таковых, стандартов озеленения городских ПРП в нашей стране не разработано, так как не установлено и общее понятие ПРП. Обычно стандарты приводятся для разных функциональных зон города, без дополнительных рекомендаций для ПРП. Тем не менее, стандарты по озеленению водоохраных зон и набережных в городах могут иметься в отдельных стандартах благоустройства городов по распоряжению местных администраций: например, [7]. Отечественное законодательство касается только лесов, расположенных в водоохраных

зонах, где запрещены сплошные рубки (Статьи 104, 113 Лесного кодекса РФ). Зарубежные стандарты допускают шадящие рубки в рипарианских зонах (по ширине сопоставимых с водоохранными зонами: 50–150 м) при условии сохранения определенной доли сомкнутого древесного покрова на территории. Значения минимально допустимой доли озеленения ПРП водотоков первого порядка варьируют от 50 до 75% [11]. В руководствах по управлению лесами рипарианских зон разных штатов США наиболее часто используется значение 75% [25]. Данные рекомендации ориентированы на сохранение целостности и нормального функционирования рипарианских экосистем, то есть выполнение функций регулирования и формирования стока, предотвращения эрозии, поддержания местообитаний. Это второй, так называемый экологический аспект городских ПРП, которые, несмотря на свое расположение в трансформированных городских ландшафтах остаются природными объектами и выполняют соответствующие экологические функции. Учитывая дуалистичность нашего объекта исследования, мы предлагаем за норму озеленения ПРП в городе принять среднее значение градостроительных и водоохраных рекомендаций – 60% ЗИ от площади ПРП.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расположение и границы ПРП. Во всех трех обследованных городах ПРП представлены как условно-природными территориями, так и застроенными городскими территориями, причем наблюдается преобладание первых. Это связано, во-первых, с наличием обширных неосвоенных прилегающих к реке территорий внутри административных границ города, во-вторых, с наличием обширных пойм (в том числе островов), которые часто непригодны для активного развития. Для получения более объективных результатов, мы отдельно предлагаем оценивать вклад только ПРП сплошной зоны застройки для наиболее плотно застроенных частей города (т.е. не включая в оценку неблагоустроенные окраины города). Во всех городах наблюдается тот или иной тип озелененных ПРП вне зоны сплошной застройки (см. рис. 3). Так, в Нижнем Новгороде ПРП левых берегов Волги (рис. 4б) и Оки (рис. 4а) за пределами зоны сплошной застройки – это обширные поймы; в Хабаровске и Волгограде левобережные ПРП значительно шире ПРП зоны сплошной застройки из-за включенных в границы города островов (рис. 4в). В контексте социальных функций ЗИ, наиболее ценными выглядят ПРП вне зоны сплошной застройки типа “а”, поскольку у них наибольшая доступность по сравнению с другими типами ПРП: зеленые берега или острова, пригодные для рекреации, зачастую являются труднодоступными из-за отсутствия мостов или регулярного паромного сообщения. Такой тип ПРП вне зоны сплошной застройки (“а”) преобладает в Нижнем Новгороде. С другой стороны, изолированные или удаленные от зоны сплошной застройки ПРП наиболее ценны с точки зрения сохранения приречных экосистем, поскольку на них ограничено количество, и, соответственно, воздействие рекреантов (острова в Волгограде и Хабаровске, левый берег Волги в Нижнем Новгороде).

Размеры выделенных ПРП колеблются между 10 и 25% от всей площади города. Наибольшие площади у ПРП Волгограда и Хабаровска из-за включенных в их границы крупных речных островов (25% и 20% от площади городов соответственно), тогда как у Нижнего Новгорода только 8% (табл. 1). Острова не отличаются высокой плотностью застройки, поэтому мы исключили их из границ ПРП зоны сплошной застройки. Тогда размеры ПРП Волгограда и Хабаровска уменьшаются до 9 и 15% соответственно.

Оценка ЗИ ПРП. Категории функциональных зон несколько отличаются на картах генпланов функционального зонирования во всех городах. Для сравнения объектов мы предлагаем выделять шесть основных функциональных зон, объединяя однотипные категории с точки зрения вклада ЗИ ПРП в предоставление ЭУ (рис. 5). Например,

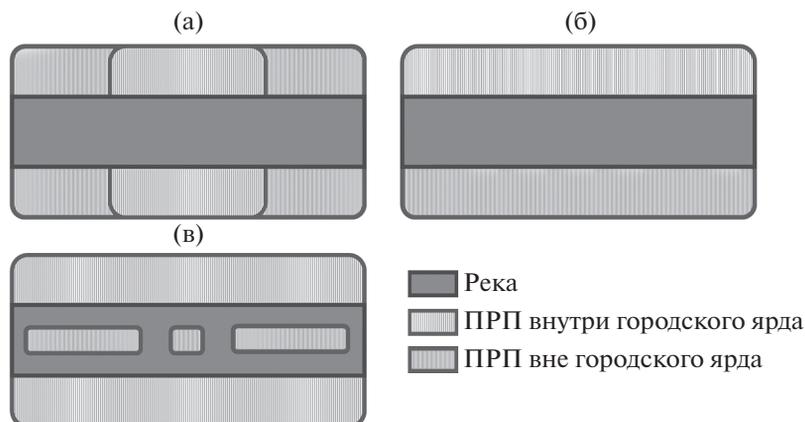


Рис. 4. Типы озелененных ПРП внутри административных границ города вне зоны сплошной застройки: а – периферийный; б – лево/правобережный; в – островной.

Fig. 4. Types of urban river zones green infrastructure inside the administrative city boundaries and outside the urban built-up core: а—peripheral; б—left or right bank; в— island.

имеет смысл объединить все типы застройки (кроме индивидуальной малоэтажной) в одну категорию “жилой зоны”; в зону природно-рекреационных земель включить общественные озелененные территории, лесопарки, леса и др.; в производственно-коммуникационную зону включить зоны транспортной, инженерной и прочей специальной инфраструктуры.

Таблица 1. Структура земельного покрова ПРП исследуемых городов
Table 1. Land cover structure of urban river zones of the cities of case studies

Показатель	Нижний Новгород			Волгоград			Хабаровск		
	доля от площади города, %	доля от площади ПРП, %	доля площади в ПРП от площади в городе, %	доля от площади города, %	доля от площади ПРП, %	доля площади в ПРП от площади в городе, %	доля от площади города, %	доля от площади ПРП, %	доля площади в ПРП от площади в городе, %
Древесная растительность	23	18	6	9	26	74	10	10	28
Недревесная растительность (без с/х земель)	25	37	11	27	33	31	30	67	59
Открытый грунт	15	17	9	30	20	17	9	5	17
Застроенные территории	25	24	7	22	18	21	32	16	13
Водная поверхность	7	4	4	1	2	75	18	2	3
С/х земли	6	0	0	35	0	0	2	0	0
ВСЕГО	100	100	8	100	100	20	100	100	25

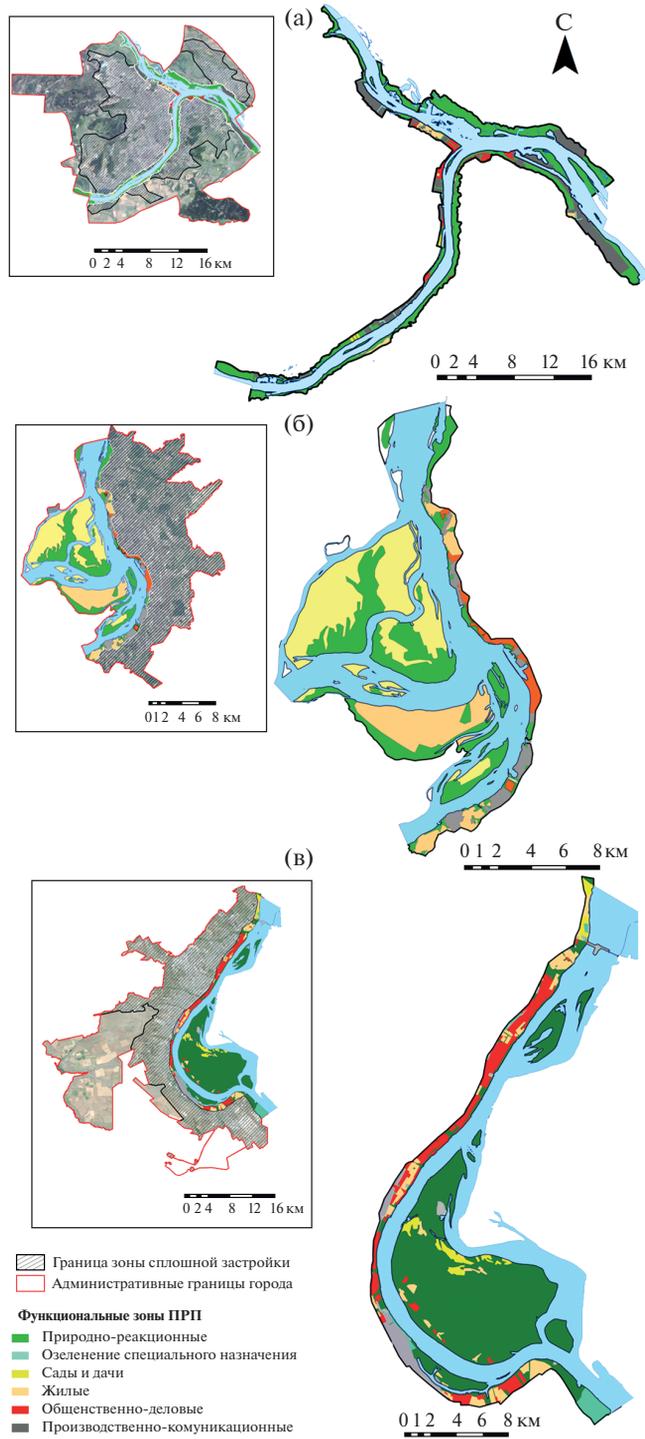


Рис. 5. Функциональные зоны городов: а – Нижний Новгород; б – Хабаровск; в – Волгоград.

Fig. 5. Urban functional zones: а—Nizhniy Novgorod; б—Khabarovsk; в—Volgograd.

Полученные данные позволяют определить долю наиболее благоприятных для предоставления экологических и социальных функций земель. Преобладание природно-рекреационных территорий свидетельствует о высокой представленности как экологических, так и социальных функций. По сути, это и есть вся ЗИ, выполняющая широкий спектр ЭУ. Наличие на некоторых картах функционального зонирования отдельной категории “городских парков/скверов” (как в Волгограде) позволило бы отдельно оценить их вклад в объем рекреационных функций, так как подобные элементы ЗИ в первую очередь созданы для ежедневной рекреации граждан. Зона садов и дач, преимущественно состоящая из коттеджей и индивидуальных малоэтажных домов, также входит в рекреационный потенциал ПРП. Высокая доля производственных территорий на ПРП, напротив, свидетельствует о слабом вкладе зоны в комфортность городской среды. Обычно разные категории ЗИ не выделяются на картах генеральных планов. Поэтому для оценки эффективности выполнения социально-экологических функций ЗИ ПРП нам представляется более уместным использование категорий древесной и недревесной растительности, выделенных по картам земельного покрова (рис. 6).

Вклад ПРП в формирование объема ЭУ ЗИ города в исследованных городах составляет в среднем 15%, причем наибольшую значимость ПРП имеют, с одной стороны, в степной зоне, а с другой – для городов равномерного двустороннего типа развития с приречным центром. Первый вывод сделан на основе результатов по Волгограду, где естественная древесная растительность формируется практически исключительно на ПРП (в т.ч. байрачные пойменные леса), Второй вывод получен из результатов по Нижнему Новгороду, где ПРП находится буквально в самом центре зоны сплошной застройки и обеспечивает наиболее плотно застроенные районы города зелеными и открытыми пространствами. Наименьший вклад ЗИ ПРП отмечается в городах с благоприятным для развития древесной растительности климатом, расположенных на одном берегу и развивающихся не вдоль реки, а вглубь суши. С одной стороны, центр города (т.н. «живая» часть города) удаляется от реки. С другой, города в благоприятных для произрастания древесной растительности природных зонах (Хабаровск, Нижний Новгород) имеют большую общую обеспеченность древесным покровом, поэтому роль ПРП по этому показателю не так высока. Если зона сплошной застройки занимает значительную долю ПРП (Волгоград, Нижний Новгород), ПРП отличается большей средней обеспеченностью ЗИ, чем остальная часть зоны сплошной застройки и центра благодаря незастроенным зеленым склонам и поймам, непригодным для освоения (табл. 2).

В естественных ландшафтах речные долины выполняют ключевую для устойчивости экосистем роль зеленых коридоров. В городе данная роль рек и ПРП также частично сохраняется [37]. Реки могут стать основой для создания почти непрерывных экологических коридоров, а не отдельных зеленых массивов на них. Такие экологические коридоры обладают большинством свойств остальных элементов ЗИ, но, помимо этого, позволяют осуществляться естественному обмену вещества и энергии между зелеными ядрами, стабилизирующему экологический каркас, поддерживающему большинство природных процессов и обеспечивающему биоразнообразию [38]. Более того, связность подразумевает не только связь между зелеными элементами, но и связь городской ЗИ с пригородными экосистемами. Способность ЗИ и ПРП, в частности, выполнять роль зеленого коридора может быть оценена показателями ее фрагментарности (минимальный и средний размер, плотность, близость зеленых “патчей” – сплошных зеленых участков) и непрерывности озелененной полосы ПРП (отношение длин непрерывных озелененных пространств внутри зоны сплошной застройки к длине береговой линии внутри этой зоны) [39]. В данной работе, для оценки способности ПРП выполнять роль зеленого коридора мы в качестве рабочей выбрали следующую гипотезу: если рассматривать все ПРП как экологические коридоры, то эти функции будут

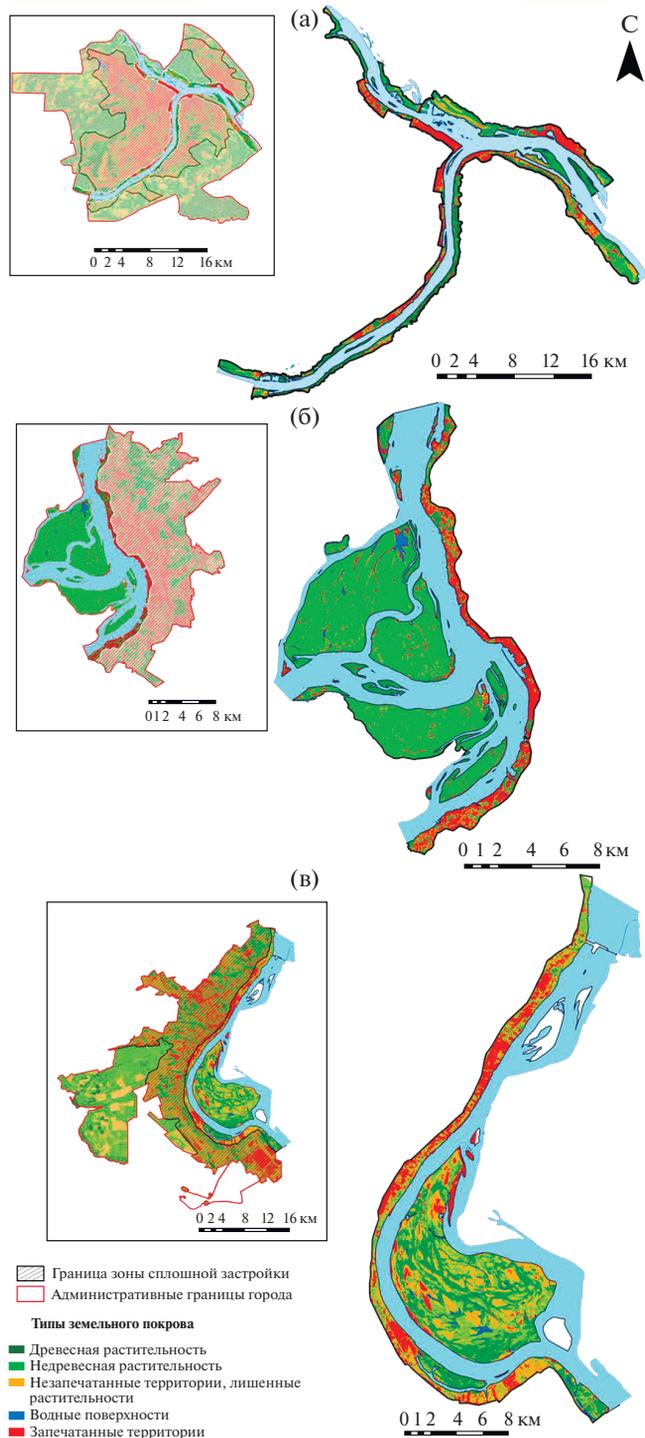


Рис. 6. Земельный покров городов и ПРП: а – Нижний Новгород; б – Хабаровск; в – Волгоград.
 Fig. 6. Land cover of the cities and urban river zones: а–Nizhniy Novgorod; б–Khabarovsk; в–Volgograd.

Таблица 2. Структура земельного покрова ПРП и всего города внутри зоны сплошной застройки
Table 2. Land cover structure of urban river zones inside the urban built-up zone

Показатель	Нижний Новгород			Волгоград			Хабаровск		
	доля от площади зоны сплошной застройки, %	доля от площади ПРП, %	доля площади в ПРП от площади в городе, %	доля от площади зоны сплошной застройки, %	доля от площади ПРП, %	доля площади в ПРП от площади в городе, %	доля от площади зоны сплошной застройки %	доля от площади ПРП, %	доля площади в ПРП от площади в городе, %
Древесная растительность	11	19	17	5	13	35	14	10	6
Недревесная растительность (без с/х земель)	21	28	13	30	32	14	21	15	6
Открытый грунт	17	17	9	36	19	7	12	15	11
Застроенные территории	43	33	8	28	34	16	51	60	10
Водная поверхность	8	3	3	0	2	100	0	0	0
ВСЕГО	100	100	10	100	100	14	100	100	9

выполняться полностью в том случае, если 100% его площади занимают естественные или близкие к ним экосистемы. В таком случае доля озелененных территорий внутри ПРП – это доля земель, потенциально поддерживающих и обеспечивающих биоразнообразие. Во всех исследованных городах данный показатель выше 50% (см. табл. 2), то есть минимум половина площади ПРП способна выполнять роль поддержания биоразнообразия. Недостатком данного подхода является то, что не учитывается непрерывность ЗИ, поэтому данный показатель характеризует общий потенциал поддержания биоразнообразия, но не его обеспечение за счет формирования экологического коридора.

Методы выделения и оценки ПРП. Многие крупные улицы и другие транспортные пути совпадают по конфигурации с определенными высотными уровнями (бровками или тыловыми швами склонов, ограничивающими ПРП). Таким методом удобно пользоваться при проведении границ в зоне сплошной застройки по карте функционального зонирования. В случае, когда четкой закономерности не выявлено (Нижний Новгород), границы в зоне сплошной застройки проводятся по первой параллельной реке улице, отделяющей разные типы прилегающих к реке функциональных зон. Наше исследование показало, что для определения ПРП крупных рек использование TWI наименее удобно (см. рис. 2), так как значения индекса отражают множество мелких водотоков и элементов овражно-балочной системы и показывают отдельные локальные участки потенциальной аккумуляции воды, но не ограничивают сплошного пространства ПРП.

Полученные площади ЗИ в городе в результате полуавтоматизированного дешифрирования космических снимков с обучением в целом совпадают с площадью озелененных территорий, приведенной в генеральных планах городов, с разницей в 10–15%, что связано не только с погрешностью дешифрирования, но и разными подходами к выделению ЗИ. Мы оцениваем именно ЗИ, включающую все озелененные территории горо-

да, тогда как в генпланах фиксируются озелененные общественные территории, обычно подразумевающие только благоустроенные элементы ЗИ. Учитывая относительную точность определения площади ЗИ в городе, мы считаем целесообразным использование тех же методов и для ЗИ ПРП. Данный способ позволяет достаточно оперативно инвентаризовать ЗИ в границах ПРП и соотнести площади ПРП с площадями городов.

ВЫВОДЫ

Исследование зеленой инфраструктуры городских приречных пространств осложнено, во-первых, выбором метода выделения их границ, во-вторых – относительной неразработанностью подходов к оценке их состояния и вклада в формирование общегородского объема экосистемных услуг зеленой инфраструктуры. Данные трудности связаны в первую очередь с дуалистичной природой городских ПРП, которые, с одной стороны, представляют собой застроенные и сильно преобразованные ландшафты города, с другой – продолжают оставаться речными долинами со свойственными им экосистемами и процессами. Трудно использовать только одни геоморфологические подходы к выделению границ: ведь в городе река формирует и особое социокультурное пространство. Это неповторимые с другими элементами ЗИ набережные, бечевники и пляжи, приречные леса, или, напротив, промышленные и специализированные, но тоже уникальные для города портовые и промышленные зоны. Даже жилые кварталы вдоль реки отличаются от других жилых районов города обычно привязанной к линиям рельефа планировкой, открытостью, проветриваемостью, организацией дорожного движения. По этой причине рационально совмещать геоморфолого-геоэкологические и социокультурные подходы как к выделению ПРП, так и к оценке их состояния и вклада в формирование устойчивой городской среды. В статье мы рассмотрели лишь один, пусть и крайне важный, элемент ПРП – зеленую инфраструктуру, которая включает и искусственное озеленение, и сохраняющиеся естественные приречные экосистемы.

Оценка объема экосистемных услуг по площадным показателям зеленой инфраструктуры приречных пространств – первый шаг на пути реализации подобной оценки. Его использование возможно при первичной диагностике городской территории, а достоинства связаны с возможностью сопоставления результатов, полученных в ходе унифицированной методики для разных городов. В то же время он слабо учитывает качественные и пространственные свойства ЗИ: во внимание принимается только тип растительного покрова (древесный или недравесный; с допущением, что первый потенциально выполняет больше экосистемных услуг) и расположение ЗИ относительно зоны сплошной застройки и элементов речной долины. Перспективные направления совершенствования методики связаны с расширением перечня индикаторов оценки и уточнения результатов по таким ключевым экосистемным функциям, как поддержание биоразнообразия, регулирование микроклимата, стока и формирование мест для рекреации.

При оценке ЗИ ПРП, как и ЗИ всего города, необходимо отдельно оценивать индикаторы для зоны сплошной застройки. Исходя из того, что бенефициары экосистемных услуг – это прежде всего жители города, зеленая инфраструктура в зоне сплошной застройки более всего направлена на обеспечение их повседневных потребностей, в том числе рекреационных и климаторегулирующих, то есть работает на локальном уровне. В то же время, зеленая инфраструктура незастроенных приречных пространств вносит существенный вклад в объем услуг на уровне города и региона, выполняя функции экологического коридора. Это определяет необходимость разработки отдельных подходов к оценке ее экосистемных услуг с учетом столь важной функции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баклаженко Е.В.* Классификация и зонирование ПРП малых городов на примере Белгородской области // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. 2020. № 8. С. 61–68.
2. *Горохов В.А.* Городское зеленое строительство. М.: Стройиздат, 1991. 416 с.
3. *Колбовский Е.Ю.* Ландшафтное планирование. М.: Академия, 2008. 128 с.
4. *Литвинов Д.В.* Градоэкологические принципы развития прибрежных зон (на примере крупных городов Поволжья): автореф. дис. ... канд. арх. СПб.: ГАСУ, 2009. 20 с.
5. *Маташова М.А.* Эколого-градостроительная оптимизация ПРП крупного города (на примере г. Хабаровска): автореф. дис. ... канд. арх. СПб.: ГАСУ, 2011. 23 с.
6. *Садковская О.Е.* Архитектурно-планировочная организация ландшафтов зарегулированных рек малых и средних городов юга России // Интернет-Вестник ВолгГАСУ. 2010. № 1. С. 1–7.
7. *Старобина А., Трофимова К.* Стандарт благоустройства объектов инфраструктуры отдыха в городе Москве. Книга 3. Стандарт благоустройства зон отдыха у воды – [Электронная версия]. https://www.mos.ru/upload/documents/files/4128/RIOT_Standart_Kniga_3_Red_06042017_.pdf (Дата обращения: 20.03.2022).
8. *Ха Дуи Ань.* Направления преобразования и развития приречных территорий города Ханоя: диссертация ... кандидата арх. СПб.: СПбГАСУ, 2013. 182 с.
9. *Шатрова А.И.* Особо охраняемые природные территории в крупнейших городах РФ // Антропогенная трансформация природной среды. 2018. № 4. С. 113–117.
10. *Beven K.J., Kirkby M.J.* A physically based, variable con-tributing area model of basin hydrology // Hydrological Sciences Bulletin. 1979. № 24. pp. 43–69.
11. *Broadmeadow S., Nisbet T.R.* The effects of riparian forest management on the freshwater environment: a literature review of best management practice // Hydrology and Earth System Sciences. 2004. V. 8. № 3. pp. 286–305.
12. *Chaves H. et al.* Mapping Hydromorphic Areas and Drainage Networks in Tropical Riparian Zones using Topographic Attributes // Authorea. 2020. V. 29. pp. 1–23.
13. *DCRG.* Planning Policy Statement: Eco-towns. A Supplement to Planning Policy Statement 1. Section ET14. London: Department for Communities and Local Government. 2009. URL: <http://www.communities.gov.uk/publications/planningandbuilding/pps-ecotowns> (дата обращения: 25.12.2021).
14. *Groffman P.M. et al.* Down by the riverside: urban riparian ecology //Frontiers in Ecology and the Environment. 2003. V. 1. № 6. pp. 315–321.
15. *Hagan J.M., Pealer S., Whitman A.A.* Do small headwater streams have a riparian zone defined by plant communities? // Journal of Forestry Research. 2006. V. 36, № 9. pp. 2131–2140.
16. *Hermida M. A. et al.* Methodology for the assessment of connectivity and comfort of urban rivers // Cities. 2019. V. 95. pp. 102376.
17. *Holmes K.L., Goebel P.C.* A functional approach to riparian area delineation using geospatial methods //Journal of Forestry. 2011. V. 109. № 4. pp. 233–241.
18. *Klimanova O., Kolbowski Yu., Illarionova O.* Green Infrastructure, Urbanization, and Ecosystem Services: The Main Challenges for Russia’s Largest Cities // Land. 2021. V. 10. № 12. pp. 1292.
19. *Klimanova O.A.* Ecosystem services of Russia. Prototype of the national report. V. 3. Green infrastructure and ecosystem services of Russia’s largest cities // Moscow: BCC Press, 2021. 102 p.
20. *Kozak D. et al.* Blue-Green Infrastructure (BGI) in Dense Urban Watersheds. The Case of the Medrano Stream Basin (MSB) in Buenos Aires //Sustainability. 2020. V. 12. № 6. pp. 2163.
21. *Mason L., Maclean A. L.* GIS modeling of riparian zones utilizing digital elevation models and flood height data: an intelligent approach // ASPRS 2007 Annual Conference, Tampa, Florida. 2007.
22. *NAP.* Riparian areas: functions and strategies for management. 2002. URL: <https://www.nap.edu/read/10327/chapter/1> (дата обращения: 20.04.2022).
23. *Palik B.J., Zasada J. and Hedman C.* Ecological considerations for riparian silviculture. // New York, US: Lewis Publishers, 2000. 534 p.
24. *Pennington D.N., Hansel J., Blair R.B.* The conservation value of urban riparian areas for landbirds during spring migration: land cover, scale, and vegetation effects // Biological Conservation. 2008. V. 141. № 5. pp. 1235–1248.
25. *Phillips M.J., Swift L.W., Blinn C.R.* Best management practices for riparian areas // Boca Raton, US: Lewis Publishers, CRC Press LLC, 2000. 428 p.
26. *Pinto U., Maheshwari B.L.* River health assessment in peri-urban landscapes: an application of multivariate analysis to identify the key variables // Water Research. 2011. V. 45, № 13. pp. 3915–3924.
27. *Qiao J., Wang M., Zhang D., Ding C., Wang J., & Xu D.* Synergetic development assessment of urban river system landscapes // Sustainability. 2017. V. 9. № 2145. pp. 1–15.

28. *Robinson T.S.* Mapping ecologically functional riparian corridors using LiDAR and hydrologic landscape analysis: degree in geographic information science. San Francisco State University, US, 2017. 82 p.
29. *Skally C. and Sagor E.* Comparing riparian management zones to riparian areas in Minnesota: a pilot study // Minnesota Forest Resources Council, Research Report. 2001.
30. *Skentos A.* Topographic Position Index based landform analysis of Messaria (Ikaria Island, Greece) // *Acta Geobalcanica*. 2018. V. 4. № 1. pp. 7–15.
31. *Sparovek G., Ranieri S.B.L., Gassner A., Maria I.C., Schnug E., Santos R.F.D., Joubert A.* A conceptual framework for the definition of the optimal width of riparian forests // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2002. V. 90. pp. 169–175.
32. *Verry E.S., Dolloff C.A., Manning M.E.* Riparian ecotone: a functional definition and delineation for resource assessment. *Water, Air, and Soil Pollution // Focus*. 2004. № 4. pp. 67–94.
33. *Yang X.* Integrated use of remote sensing and geographic information systems in riparian vegetation delineation and mapping // *International Journal of Remote Sensing*. 2007. V. 28. № 1–2, pp. 353–370.
34. Генеральный план г. Нижнего Новгорода (разработан с расчетным сроком до 2030 г.). Схема 3. Схема границ функциональных зон территории г. Нижнего Новгорода с параметрами планируемого для развития и границами участков для размещения объектов капитального строительства федерального, регионального и местного значения. Масштаб 1 : 20000.
35. Генеральный план городского округа Хабаровск (разработан с расчетным сроком до 2035 г.). Графический материал 1. Карта функционального зонирования. Карта границ населенного пункта. Масштаб 1 : 20000.
36. Генеральный план городского округа город-герой Волгоград (разработан с расчетным сроком до 2025 г.). Графический материал 3. Карта функциональных зон городского округа город-герой Волгоград. Масштаб 1 : 50000.
37. *Разгулова А.М.* Экокоридор в рамках мегаполиса как элемент преодоления экологических барьеров // *Наука, образование и экспериментальное проектирование*. 2015. С. 228–232.
38. *Chung L., Zhang F., & Wu F.* Negotiating green space with landed interests: The urban political ecology of greenway in the Pearl River Delta, China // *Antipode*. 2018, № 50 (4), pp. 891–909.
39. *Wang Q. et al.* Effects of urban agglomeration and expansion on landscape connectivity in the river valley region, Qinghai-Tibet Plateau // *Global Ecology and Conservation*. 2022. V. 34, pp. 02004.

Urban River Zones: Mapping and Social Environmental Functions Assessment

O. A. Illarionova¹, *, and O. A. Klimanova¹, **

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

**E-mail: heatherpaw95@gmail.com*

***E-mail: oxkl@gmail.com*

The paper proposes methods for identifying urban river zones (URZ) and assessing their socio-environmental functions, based on geospatial data, including Landsat 8 satellite images, Aster Global DEM, city master plan materials, VSEGEI maps of Quaternary deposits (1 : 200000) and OpenStreetMap. Social, geomorphological and administrative approaches to the URZ delimitation are considered. The authors propose a combined method for determining URZ boundaries at the urban level using TWI, the “Valley Depth” tool, data on Quaternary deposits, and functional zoning maps. Authors also suggest their criteria for assessing the quality of URZ green infrastructure in terms of providing social and environmental functions using land cover data and functional zoning for the administrative boundaries of the city and the built-up urban core. URZ were defined for three model cities (Nizhny Novgorod, Volgograd, Khabarovsk). Authors calculated the area of land cover categories and functional zones of different social and environmental value. The article demonstrates conclusions about how large the contribution of URZ green infrastructure (GI) to the total volume of urban GI ecosystem services is and how this indicator depends on geographical conditions and relative position of the city and the river.

Keywords: ecosystem services, green infrastructure, urban environment comfort assessment, urban river zone

REFERENCES

1. Baklazhenko E.V. Klassifikacija i zonirovanie PRP malyh gorodov na primere Belgorodskoj oblasti // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. VG Shuhova. 2020. № 8. S. 61–68.
2. Gorohov V.A. Gorodskoe zelenoe stroitel'stvo. M.: Strojizdat, 1991. 416 s.
3. Kolbovskij E.Ju. Landshaftnoe planirovanie. M.: Akademija, 2008. 128 s.
4. Litvinov D.V. Gradoekologicheskie principy razvitiya pribrezhnyh zon (na primere krupnyh gorodov Povolzh'ja): avtoref. dis. ... kand. arh. SPb.: GASU, 2009. 20 s.
5. Matashova M.A. Jekologo-gradostroitel'naja optimizacija PRP krupnogo goroda (na primere g. Habarovska): avtoref. dis. ... kand. arh. SPb.: GASU, 2011. 23 s.
6. Sadkovskaja O.E. Arhitekturno-planirovochnaja organizacija landshtafrov zaregulirovannyh rek malyh i srednih gorodov juga Rossii // Internet-Vestnik VolgGASU. 2010. № 1. S. 1–7.
7. Starobina A., Trofimova K. Standart blagoustrojstva ob#ektov infrastruktury otdyha v gorode Moskve. Kniga 3. Standart blagoustrojstva zon otdyha u vody – [Jelektronnaja versija]. https://www.mos.ru/upload/documents/files/4128/RIOT_Standart_Kniga_3_Red_06042017_.pdf (Data obrashhenija: 20.03.2022)
8. Ha Dui An'. Napravlenija preobrazovanija i razvitiya prirechnyh territorij goroda Hanoja: dissertacija ... kandidata arh. SPb.: SPbGASU, 2013. 182 s.
9. Shatrova A.I. Osobo ohranjaemye prirodnye territorii v krupnejshih gorodah RF // Antropogennaja transformacija prirodnoj sredy. 2018. № 4. S. 113–117.
10. Beven K.J., Kirkby M.J. A physically based, variable con-tributing area model of basin hydrology // Hydrological Sciences Bulletin. 1979. № 24. pp. 43–69.
11. Broadmedow S., Nisbet T.R. The effects of riparian forest management on the freshwater environment: a literature review of best management practice // Hydrology and Earth System Sciences. 2004. V. 8. № 3. pp. 286–305.
12. Chaves H. et al. Mapping Hydromorphic Areas and Drainage Networks in Tropical Riparian Zones using Topographic Attributes // Authorea. 2020. № 29. pp. 1–23.
13. DCRG. Planning Policy Statement: Eco-towns. A Supplement to Planning Policy Statement 1. Section ET14. London: Department for Communities and Local Government. 2009. URL: <http://www.communities.gov.uk/publications/planningandbuilding/pps-ecotowns> (data obrashhenija: 25.12.2021).
14. Groffman P. M. et al. Down by the riverside: urban riparian ecology // Frontiers in Ecology and the Environment. 2003. V. 1. № 6. pp. 315–321.
15. Hagan J.M., Pealer S., Whitman A.A. Do small headwater streams have a riparian zone defined by plant communities? // Journal of Forestry Research. 2006. V. 36. № 9. pp. 2131–2140.
16. Hermida M. A. et al. Methodology for the assessment of connectivity and comfort of urban rivers // Cities. 2019. № 95. pp. 102376.
17. Holmes K.L., Goebel P.C. A functional approach to riparian area delineation using geospatial methods // Journal of Forestry. 2011. V. 109. № 4. pp. 233–241.
18. Klimanova O., Kolbowski Yu., Illarionova O. Green Infrastructure, Urbanization, and Ecosystem Services: The Main Challenges for Russia's Largest Cities // Land. 2021. V. 10. № 12. pp. 1292.
19. Klimanova O.A. Ecosystem services of Russia. Prototype of the national report. V. 3. Green infrastructure and ecosystem services of Russia's largest cities // Moscow: BCC Press, 2021. 102 p.
20. Kozak D. et al. Blue-Green Infrastructure (BGI) in Dense Urban Watersheds. The Case of the Medrano Stream Basin (MSB) in Buenos Aires // Sustainability. 2020. V. 12. № 6. pp. 2163.
21. Mason L., Maclean A.L. GIS modeling of riparian zones utilizing digital elevation models and flood height data: an intelligent approach // ASPRS 2007 Annual Conference, Tampa, Florida. 2007.
22. NAP. Riparian areas: functions and strategies for management. 2002. URL: <https://www.nap.edu/read/10327/chapter/1> (data obrashhenija: 20.04.2022).
23. Palik B.J., Zasada J. and Hedman C. Ecological considerations for riparian silviculture. // New York, US: Lewis Publishers, 2000. 534 p.
24. Pennington D.N., Hansel J., Blair R.B. The conservation value of urban riparian areas for landbirds during spring migration: land cover, scale, and vegetation effects // Biological Conservation. 2008. V. 141. № 5. pp. 1235–1248.
25. Phillips M.J., Swift L.W., Blinn C.R. Best management practices for riparian areas // Boca Raton, US: Lewis Publishers, CRC Press LLC, 2000. 428 p.
26. Pinto U., Maheshwari B.L. River health assessment in peri-urban landscapes: an application of multivariate analysis to identify the key variables // Water Research. 2011. V. 45, № 13. pp. 3915–3924.
27. Qiao J., Wang M., Zhang D., Ding C., Wang J., & Xu D. Synergetic development assessment of urban river system landscapes // Sustainability. 2017. V. 9. № 2145. pp. 1–15.
28. Robinson T.S. Mapping ecologically functional riparian corridors using LiDAR and hydrologic landscape analysis: degree in geographic information science. San Francisco State University, US, 2017. 82 p.

29. Skally C. and Sagor E. Comparing riparian management zones to riparian areas in Minnesota: a pilot study // Minnesota Forest Resources Council, Research Report. 2001.
30. Skentos A. Topographic Position Index based landform analysis of Messaria (Ikaria Island, Greece) // Acta Geobalcanica. 2018. V. 4. № 1. pp. 7–15.
31. Sparovek G., Ranieri S.B.L., Gassner A., Maria I.C., Schnug E., Santos R.F.D., Joubert A. A conceptual framework for the definition of the optimal width of riparian forests // Agriculture, Ecosystems and Environment. 2002. V. 90. pp. 169–175.
32. Verry E.S., Dolloff C.A., Manning M.E. Riparian ecotone: a functional definition and delineation for resource assessment. Water, Air, and Soil Pollution // Focus. 2004. V. 4. pp. 67–94.
33. Yang X. Integrated use of remote sensing and geographic information systems in riparian vegetation delineation and mapping // International Journal of Remote Sensing. 2007. V. 28. № 1–2. pp. 353–370.
34. General'nyj plan g. Nizhnego Novgoroda (razrabotan s raschetnym srokom do 2030 g.). Shema 3. Shema granic funkcional'nyh zon territorii g. Nizhnego Novgoroda s parametrami planiruemogo dlja razvitija i granicami uchastkov dlja razmeshhenija ob'ektov kapital'nogo stroitel'stva federal'nogo, regional'nogo i mestnogo znachenija. Masshtab 1 : 20 000.
35. General'nyj plan gorodskogo okruga Habarovsk (razrabotan s raschjotnym srokom do 2035 g.). Graficheskij material 1. Karta funkcional'nogo zonirovanija. Karta granic naselennogo punkta. Masshtab 1 : 20 000.
36. General'nyj plan gorodskogo okruga gorod-geroj Volgograd (razrabotan s raschjotnym srokom do 2025 g.). Graficheskij material 3. Karta funkcional'nyh zon gorodskogo okruga gorod-geroj Volgograd. Masshtab 1 : 50 000.
37. Razgulova A.M. Jekokoridor v ramkah megapolisa kak jelement preodolenija jekologicheskikh bar'erov // Nauka, obrazovanie i jeksperimental'noe proektirovanie. 2015. S. 228–232.
38. Chung L., Zhang F., & Wu F. Negotiating green space with landed interests: The urban political ecology of greenway in the Pearl River Delta, China // Antipode. 2018, 50 (4), pp. 891–909.
39. Wang Q. et al. Effects of urban agglomeration and expansion on landscape connectivity in the river valley region, Qinghai-Tibet Plateau // Global Ecology and Conservation. 2022. V. 34. pp. 02004.

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ НЕПИЩЕВОГО РИТЕЙЛА В РОССИЙСКОМ ГОРОДЕ

© 2022 г. К. Э. Аксенов*

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

**E-mail: axenov@peterlink.ru*

Поступила в редакцию 19.05.2022 г.

После доработки 21.10.2022 г.

Принята к публикации 22.10.2022 г.

Цель настоящего исследования – выяснить, что изменилось под воздействием цифровой трансформации в “физической” пространственной структуре процесса розничной продажи/покупки в связи с появлением выбора между онлайн и офлайн “пространствами” или средами, а также, как интернет-торговля изменила “физические” пространственные принципы организации непищевого ритейла в российском городе на примере Санкт-Петербурга. Анализ принципов размещения новых объектов интернет-торговли проводился на основе сравнения различных моделей шопинга и формируемых ими пространственно-временных систем, включающих специфические объекты (склады-магазины, склады-распределители, пункты выдачи заказов и постаматы), особенности взаимодействия акторов ритейла и транспортно-логистические потоки в городе. В географии новых типов ритейл-объектов описаны два противонаправленных тренда: к переносу торговой функции в неторговые помещения и переводу неторговой функции розницы в торговые помещения. Они формируют пространственную конкуренцию как с традиционным ритейлом, так и новую иерархическую – с офисно-складскими типами бизнеса. Тенденция стремления торговой инфраструктуры товаров длительного пользования в шаговую доступность означает развертывание нового типа конкуренции за локации – с продавцами товаров повседневного спроса. То, что в доставке логистика “последней мили” переходит от потребителя к продавцу/логисту означает принципиальную смену экономической географии потоков товаров. Она формирует вместо частных спонтанных пешеходных потоков новые регулируемые мелкотоннажные типы коммерческих грузовых перевозок “последней мили” с использованием как альтернативных видов транспорта (средств индивидуальной мобильности, СИМ), так и транспортных путей (тротуары, пешеходные проходы и т.п.). Все это требует выработки новой политики городского регулирования.

Ключевые слова: цифровая трансформация, непищевой ритейл, пространственная организация, пространственная конкуренция, типы шопинга, логистика, городское пространство

DOI: 10.31857/S0869607122040024

В последние годы, как в мире в целом, так и в России, наблюдается экспоненциальный рост различных видов интернет-торговли, ускоренный воздействием стимулирующего влияния пандемии коронавируса (рис. 1). Сравнительно небольшой по сравнению со странами-лидерами этого процесса уровень проникновения интернет-торговли в нашей стране позволяет говорить о высоком потенциале продолжения роста. Так, доля электронной (интернет) торговли в общем обороте розничной торговли в 2020 г.



Рис. 1. Российский рынок интернет-торговли по результатам 2021 г. (млрд. руб.).

Fig. 1. The Russian e-commerce market according to the results of 2021 (billion rubles). * С данного года изменилась методика подсчета. Составлено автором по [14].

в Великобритании достигала 30%, в Китае 25%, а в России – всего 9% или 3.2 трлн руб. [14].

Аналитики отмечают повышение рыночной доли “интернет-гипермаркетов” в лице маркетплейсов по сравнению с отдельными интернет-магазинами: в 2020 году чуть менее половины всех онлайн-заказов РФ покупатели сделали на маркетплейсах, а по данным на первое полугодие 2021, на маркетплейсах было сделано уже 58% заказов [11]. При этом рост российского рынка интернет-торговли пока носит отчетливо экстенсивный характер: он происходит за счет увеличения количества заказов при тенденции к падению их стоимости [14]. Все это отчасти повторяет некоторые тенденции, которые проходил и рынок офлайн-торговли до наступления эры цифровой трансформации [2], о чем будет упомянуто далее.

В литературе неоднократно отмечалась роль технологических (“промышленных”) революций в реорганизации традиционных и создании новых рынков [6, 29]. Характерной особенностью четвертой промышленной революции¹ называют цифровую трансформацию, приведшую, в частности, к генерации рынков в принципиально новом – виртуальном или “кибер” – пространстве [17, 21, 32]. Данное явление породило и трансформацию ритейла², ставшую фокусом данного исследования применительно к городам, которые как в России, так и в мире остаются безоговорочными лидерами рынков электронной коммерции [10]. Принципиальным отличием текущей трансформации ритейла от предыдущих, следовавших за “взрывным воздействием” всех технологических революций, выступает не просто переформатирование старых и по-

¹ Цифровизацию упоминают в качестве признака как третьей, так и, по альтернативной точке зрения, четвертой промышленной революции. Подробнее о дискуссии см. [16].

² Хотя под ритейлом в широком смысле понимается розничная торговля товарами и услугами [24], для целей настоящей статьи мы будем данным термином обозначать только товарную розничную торговлю.

явление новых продуктов и рынков, но возникновение конкурирующих сред или пространств, в которых происходит параллельное (или пересекающееся) развитие каждого из продуктовых ритейл-рынков. Если до цифровой трансформации для розничного продукта А существовал только один физический “офлайн” рынок, и потребитель при покупке А мог делать выбор из представленных на этом рынке конкурирующих **продавцов** 1, 2,...N (у которых могли различаться как каналы продаж, так и маркетинга, включая различные дистанционные), то теперь под воздействием цифровой революции потребитель может выбирать и между конкурирующими ритейловыми **средами**. При этом количество доступных для выбора продавцов увеличивается уже не кратно (как если бы на стандартном “офлайн” рынке добавилось определенное количество продавцов), а экспоненциально и не ограничено ни верхним пределом, ни местом их нахождения. Схематично это представлено на рис. 2.

Применительно к отношениям онлайн-офлайн и смешанных форматов в ритейле чаще всего изучаются³: особенности распространения и рыночного взаимодействия офлайн и онлайн и смешанных (омниканальных) форматов торговли [12, 20, 30–32, 31], в частности, угрозы и эффекты каннибализации/комплиментарности онлайн и офлайн каналов продаж [20, 27]; проблемы оснований для выбора покупателем онлайн или офлайн формата [30], в противовес этому – то же для производителя, посредника и продавца товара [20]; формирование и развитие нового рынка доставки [13] и др.

Поскольку ритейл-потребитель, производитель, логист и большая часть товара по-прежнему существуют в физическом мире, то все конкурирующие среды, даже новый онлайн рынок, неизбежно в большей или меньшей степени оперируют в физическом пространстве. Классификация таких сред/пространств, как реальных, виртуальных, так и смешанных, применительно к коммерции описана, в частности, в работах венгерских географов [32]. В целом за прошедшие 20 лет произошла эволюция представлений от “внепространственности” развития интернет-экономики к резкому усилению внимания к ее пространственной организации [33].

В частности, в интересующей нас предметной области, связанной с эффектами цифровой революции в ритейле для трансформации физического пространства города, анализируются:

– следствия разрыва между потенциальной повсеместной доступностью онлайн покупки и ограничениями физической доставки, связанными с многочисленными географическими факторами, начиная от инфраструктуры (как транспортно-логистической, так и коммуникационной), и заканчивая особенностями расселения и социально-демографическими характеристиками территории [21, 28, 32].

– пространственная конкуренция между онлайн и офлайн форматами (например, эффективности онлайн продаж на территориях с различным развитием традиционных форматов торговли) [22, 33].

– воздействие онлайн-торговли на привязанность/значимость для потребителей конкретных локаций, объектов и находящихся там трейдеров как фактор сохранения пространственной структуры ритейла [23].

Кроме того, исследователи задумываются о концептуализации и практической применимости понятий онлайн места и среды [24], в том числе ритейлового [23].

В качестве одного из важных следствий развития кибер-пространства, появления в нем виртуальных сообществ и перехода потенциальных потребителей на общение в “облаке” отмечается обесценивание для развития маркетинга и торговли в целом географической близости потребителей, возможности их физического контакта как между собой (для обмена коммерчески важной информацией из уст в уста), так и с потенциальным продавцом. Это требует выработки новых механизмов и принципов, в том

³ Самый актуальный обзор исследовательской проблематики в данной сфере см. в [26].

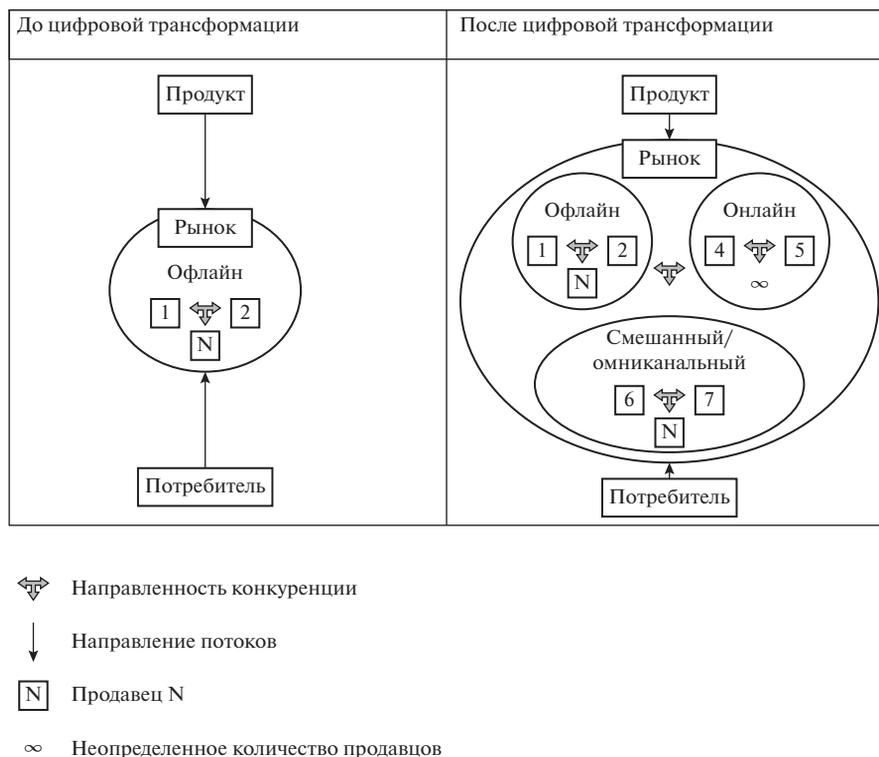


Рис. 2. Принципиальная схема потребительских возможностей розничного приобретения условного продукта А до и после цифровой трансформации ритейла. Составлено автором.

Fig. 2. Schematic diagram of consumer opportunities for retail acquisition of conditional product A before and after the digital transformation of retail. Compiled by the author.

числе пространственных, взаимодействия ритейл-акторов [26, 32]. Однако, если одни особенности перехода торговли в “новое пространство”, казалось бы, снижают зависимость розничной торговли от физического пространства (как, например, для глобальных ритейлеров типа AliExpress и eBay, ведущих торговлю почти повсеместно в мире), другие же ее, напротив, – увеличивают: достаточно упомянуть усиливающееся значение геолокации в маркетинге и доставке [21, 32, 33].

Исходя из всего этого, цель настоящего исследования – выяснить, что изменилось под воздействием цифровой трансформации:

1. В физической пространственной и бизнес-структуре процесса розничной продажи/покупки в связи с появлением выбора между онлайн и офлайн “пространствами” средами.

2. Как интернет-торговля изменила “физические” пространственные принципы организации ритейла в городе.

ДАнные И МЕТОды

Поскольку принципы пространственной организации пищевого и непищевого ритейла существенно различаются [1] и в связи с ограниченностью объема формата статьи, мы остановимся здесь на примере непищевого ритейла, который в 2021 г., по дан-

ным АКИТ и Сбербанка, занимал более 90% российского рынка интернет-торговли⁴ [14]. По данным исследовательской компании Data Insight, первую тройку мест в рейтинге крупнейших интернет-магазинов в России по итогам 2021 г. заняли именно непищевые ритейлеры⁵ Wildberries (онлайн-продажи составили 805 700 млн рублей), Ozon (446 700 млн рублей) и DNS (185 300 млн рублей) российского происхождения. Рост онлайн-продаж в 2021 г. у Wildberries составил 95%, Ozon – 126%, а DNS – 41%. В десятку первых мест рейтинга также вошли маркет-плейсы и непищевые интернет-магазины Citilink, “М.Видео”, “Яндекс Маркет”, Aliexpress, Lamoda, “Петрович” и “ВсеИнструменты.ру”, почти все российского происхождения. Первый пищевой онлайн ритейлер в этом рейтинге появляется лишь на 17-м месте [8].

Санкт-Петербург был выбран в качестве объекта как один из главных инновационных центров развития ритейла в России. Санкт-Петербург менее зависим от фактора столичности, чем Москва, его опыт в большей мере может служить основанием для прогнозирования развития аналогичных процессов и в других крупных городах России [2]. По данным АКИТ и Сбербанка, по итогам 2021 г. доля Санкт-Петербурга составляла 7.1% для локального и 7.5% – для трансграничного рынков интернет торговли РФ, что соответствует третьему месту после Москвы и Московской обл., и в 2 раза превышала долю города в населении России [4].

Если в ходе цифровой трансформации ритейла четыре критических для его выживания в рыночной экономике способности: нужный продукт должен быть доставлен/представлен потребителю в нужном месте, в нужное время и по нужной цене [19] – остались прежними, то дополнительно к этому покупатель и продавец теперь постоянно выбирают между реальным (офлайн), виртуальным (онлайн) и гибридным [32] “пространством”: в каком из них, как, когда, у кого и с какими затратами каждое связанное с покупкой/продажей действие совершить [35]. Причем, как утверждается, основным драйвером развития онлайн – торговли по сравнению с традиционной выступает не ассортимент и объем предложения, а развитие логистики и сервисов, которые в купе обеспечивают удобство совершения покупки [13].

Следуя данной логике и традиционным маркетинговым представлениям, для проведения анализа мы разделили процесс покупки/продажи на отдельные действия: принятие решения о покупке; сравнительный маркетинг (выбор из предложений товара); выбор продавца; оплата; получение товара; возврат. Временную составляющую для проведения сравнений в разных средах мы обобщили до традиционных категорий периодичности спроса: повседневный (характерный в большей степени для пищевого ритейла), периодический и эпизодический.

В связи со всем этим в фокусе нашего внимания окажется пространственная система, формируемая новыми специфическими офлайн объектами, формируемыми/используемыми разными вариантами реализации новых типов шопинга:

А – склады-магазины (с выкладкой/доступом потребителя к сравнительному маркетингу товара)

Б – склады/производства/распределители (без выкладки/доступа потребителя к сравнительному маркетингу товара), dark store

В – пункты выдачи заказа (точки самообслуживания/постаматы и пункты с обслуживанием)

Поскольку наша цель связана с исследованием не просто изменяющейся пространственной структуры традиционного ритейла, но и полной смены принципов взаимодействия всех его акторов, то необходимо использовать методику пространственного

⁴ Термин “непищевой ритейл”, используемый здесь, исключает из рассмотрения категорию “розничная торговля продовольственными товарами и общепит” [14], которым посвящено отдельное исследование автора.

⁵ Мы включаем в данную категорию и маркет-плейсы смешанного типа, основу оборота в которых составляет непищевой сегмент.

анализа, подходящую для описания таких принципов. Максимально обобщенным пространственным уровнем подобного сравнения может выступать структура физического пространства, состоящая из мест пребывания основных “физических участников” непосредственно процесса покупки/продажи: покупателя, продавца и товара⁶ и их пространственного взаимодействия (взаимного расположения, перемещения, контакта и т.п.). Мы включили в наш анализ три основных типа мест по этим параметрам, формирующих необходимый уровень пространственного обобщения, в которых могут совершаться связанные с покупкой/продажей действия:

Место 1 – местонахождение покупателя вне физического/визуального контакта с продавцом или товаром (дома, на работе, в дороге, на отдыхе и пр. местах наступления необходимости приобретения товара). То есть это не просто “дома” и пр., но и без контакта с товаром, следовательно, его нельзя ни получить, ни вернуть в местонахождении 1: **физически там есть покупатель, но нет ни продавца, ни товара. (Покупатель)**

Место 2 – местонахождение продавца с товаром или место продажи с диспозицией товара (торговая точка, их скопление, рынок, ТЦ, торговый район или улица и пр. локация с возможностью выбора и совершения покупки). То есть это специализированные места, где товар можно “потрогать” и купить: **физически там есть/могут быть и продавец, и товар, и покупатель. (Продавец + Покупатель + Товар)**

Место 3 – местонахождение товара вне местонахождения продавца и/или места постоянной экспозиции для продажи (склад, почтовое отделение, пункт выдачи, курьер/логист и пр. места без возможности выбора для покупателя). То есть это места, куда товар перемещается, будучи уже физически “оторванным” от места дислокации продавца: **физически там есть покупатель и товар, но нет продавца, в лучшем случае только посредник-логист или постапат. (Покупатель + Товар +?)**

Из всех подходов и аспектов оценки пространственной структуры ритейла мы выбрали подход, **основанный на типе шопинга**, когда в фокусе рассмотрения оказываются особенности взаимодействия потребителя с продавцом и товаром в пространстве и во времени [25]. Помимо того, что он объединяет в единой оценке комплекс взаимоотношений всех присутствующих на рынке акторов и агентов, он делает акцент на потребителе, как активном соавторе создания пространственно-временной системы ритейла в городе. Это представляется особенно важным, когда происходит активное перераспределение функций в осуществлении перечисленных выше действий в процессе покупки/продажи в ходе цифровой трансформации ритейла.

Сбор исходной информации о представленных в Санкт-Петербурге предприятиях новых типов отраслей осуществлялся по материалам бизнес-аналитики, бизнес-агрегаторов, сайтов компаний: ссылки на конкретные источники – по тексту (данные по состоянию на август–сентябрь 2021 г.)⁸

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В предыдущих работах автором была представлена сквозная пространственно-временная типология стадий трансформации взаимовлияния социально-пространственной модели шопинга и пространственной организации сектора розничной торговли в российском метрополисе в постсоветский период. Были описаны последовательно возникавшие и закреплявшиеся в городе новые (дополнительно к существовавшим с советских времен) модели (типы) шопинга, как специфические трансформационные, так и аналоги международных [2, 3]. Первые четыре из представленных в табл. 1 таких

⁶ Участие возможных «вторичных» физических элементов этого процесса (посредников, инфраструктуры, среды и пр.) может учитываться также, но во вторую очередь.

⁷ Знаком вопроса обозначается потенциальная возможность наличия посредника-логиста или постапата.

⁸ В сборе, экспертной оценке и первичной обработке исходных данных принимала участие магистрант программы Геоурбанистика СПбГУ А. Шаркова.

Таблица 1. Место совершения различных действий, связанных с ритейл-покупкой по типам шоппинга
Цифрами обозначены места, где присутствуют:

1. – Покупатель
2. – Продавец + Покупатель + Товар
3. – Покупатель + Товар + ?

(Подробнее см. в разделе Данные и методы)

Table 1. Location of various actions related to retail purchase by type of shopping

The numbers indicate the places where there are:

1. – Buyer
2. – Seller + Buyer + Product
3. – Buyer + Product + ?

(For more information, see the section Data and methods)

Тип шоппинга	Принятие решения о покупке	Сравнительный маркетинг	Выбор продавца	Оплата	Получение товара	Возврат и пр.	Частота спроса/покупки
“Трансформационный” Киосковый	2	2	2	2	2	2	Ежедневно
Тип шоппинга “новых бедных”	1	1 (или нет)	1	2	2	2	1–2 раза в неделю
“Пост-трансформационный крупноформатный”	1	1, 2	1, 2	2	2	2	Раз в 1–2 недели в крупном формате
“Пост-трансформационный мелкоформатный”	1, 2	1, 2	1, 2	2	2	2	2–5 раз в неделю
Интернет-покупка + доставка	1	1	1	1, 3	1	3	1–5 раз в неделю*
Интернет-покупка + самовывоз	1	1	1	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1–4 раза в месяц

(экспертная оценка автора)

* Преимущественно для пищевого ритейла.

типов развивались в Санкт-Петербурге в период 1989–2016 гг., они сосуществуют в городе по сей день и подробно описаны в указанных работах. Цифровая трансформация ритейла породила два новых типа, активно развивавшихся с середины 2010-х. Эти два типа указаны в последних двух строках табл. 1, и именно о них пойдет речь в нашем исследовании. Для обеспечения сравнимости моделей шоппинга, существующих как в физическом, так и кибер-пространстве, мы последовали изложенным выше методологическим принципам и сопоставили места совершения различных действий при продаже/покупке для всех типов шоппинга (табл. 1).

Важен не только факт различных мест совершения этих действий. Смена одной цифры на другую в полях таблицы при движении по ее строкам в реальности означает физическое перемещение либо покупателя, либо товара, либо того и другого в пространстве города. Содержание этих перемещений, в зависимости от их отражения в конкретных строках и полях таблицы, принципиально различно как для участников

процесса покупки, так и для развития всего города. Один из параметров этих различий описан в последнем столбце, указывающем на разную среднюю примерную частоту совершения таких перемещений, связанную с различиями в частоте спроса. Разумеется, в таблице отражены только модельные для каждого типа шопинга (отличающие его от других) виды потребительского поведения. В реальности потребители сочетают в своем поведении различные типы шопинга, и совокупность этих сочетаний в каждый момент времени формирует особый тип воздействия ритейла на городское пространство.

Так, в 1997 г. 60% всех покупок совершалось в киосках, павильонах и открытых рынках (первый и второй типы шопинга из табл. 1), и только 17% – в супермаркетах [9]. Гипермаркетов как формата не существовало. 10 лет спустя, в 2007 г., эта структура была прямо противоположной: 66% покупок приходилось на сетевые супермаркеты, дискаунтеры и гипермаркеты (третий тип из табл. 1), и только 23% – на рынки, киоски и павильоны [17]. Еще через 7 лет, в 2014 г., в крупных предприятиях, к коим относятся гипермаркеты и сети (третий и четвертый типы⁹), потребители осуществляли 76% своих расходов. На средние и малые форматы, к которым относятся большинство оставшихся магазинов “у дома” (четвертый тип), приходилось 19% расходов. А на форматы, к которым относятся киоски, рынки и т.п., приходилось всего 5% расходов [15]. Эти данные дают представление о динамике востребованности различных торговых форматов в периоды преобладания разных типов шопинга. В поведении отдельного потребителя такие сочетания типов шопинга сильно зависят от достатка семьи и изменяются во времени со сменой периодов в развитии ритейла, предоставляющих принципиально новые возможности выбора локаций, торговых форматов, цен и способа поиска товара [2].

Для последних двух типов шопинга из табл. 1, развитие которых в последние годы мы связываем в первую очередь с цифровой трансформацией, различные торговые форматы, задействованные в них, значительно различаются по признакам, отраженным в табл. 2, равно как и по ряду других пространственно-временных параметров.

Если часть из этих новых форматов формирует только новую систему транспортно-логистических и потребительских потоков (как например онлайн сервисы частных объявлений), то остальные – еще и систему материальных бизнес-объектов нового типа. К ним относятся склады-магазины, склады-распределители (открытые для потребителей и dark store), пункты выдачи заказов. Поскольку, как показывают различия по местам совершения действий для покупки между форматами (табл. 2), последние потенциально формируют разные пространственные требования как к системе физических объектов, связанных с их деятельностью, так и с логистикой (в частности, организацией потоков в городе).

В рыночной аналитике и научной литературе сложились представления о структуре новой системы логистики, сформировавшейся под воздействием цифровой трансформации ритейла. Наиболее часто выделяемые ее категории в России это: собственная доставка интернет –магазина (“до двери” или до ПВЗ¹⁰), самовывоз из ПВЗ/постамата, сторонняя курьерская/почтовая служба [13]. При этом отмечается продолжающаяся тенденция смещения рынка от классической курьерской доставки к самовывозу [13]: прирост 2021/2020 самовывоза в разных каналах интернет-продаж составил от 29 до 237%, везде превывсив темпы роста/падения доставки до двери [11]. Для нас это означает сопутствующий данному процессу **быстрый рост стационарных физических объектов новой торгово-логистической инфраструктуры в пространстве города и более медленный – логистических потоков доставки “последней мили”**¹¹. По дан-

⁹ Некоторые сети заняли нишу магазинов «у дома».

¹⁰ Пункт выдачи заказа. Здесь и далее мы будем отделять данный формат (с обслуживанием в пункте выдачи) от постамата с системой самообслуживания.

Таблица 2. Место совершения различных действий по форматам непродовольственного шоппинга, связанным с интернет-покупкой (цифровые обозначения как в табл. 1)**Table 2.** Location of various actions by non-food shopping formats related to online shopping (digital designations as in Table 1)

Формат интернет-покупки	Принятие решения о покупке	Сравнительный маркетинг	Выбор продавца	Оплата	Получение товара	Возврат
Интернет-магазин + склад-магазин	1	1, 2 (ограниченно)	1, 2	1, 2	2, 3	2, 3
Интернет-магазин + самовывоз со склада*	1	1	1	1, 3	3	3
Интернет-магазин с доставкой до дома или до пункта выдачи	1	1	1	1, 3	3	3
Сервисы частных объявлений	1	1	1	1, 2	2, 3	—
Сервис стационарного магазина по онлайн-покупке и доставке до дома или пункта самовывоза	1	1, 2	1, 2	1, 2, 3	2, 3	2, 3
Сервис агрегатора интернет-магазинов и доставки	1	1	1	1, 2, 3	2, 3	2, 3

(экспертная оценка автора методом тестовых запросов соответствующим сервисам, с участием А. Шарковой)

* В формате склада, в отличие от склада-магазина, не предоставляются возможности оплаты, выбора, сравнения, обслуживания продавцом и пр.

ным АКИТ, площадь логистической инфраструктуры интернет-торговли в России увеличилась с 626 тыс. кв. м в 2018 г. до более 3 млн (по прогнозу) кв. м в 2022 г. Количество курьеров в России в 2021 г. оценивалось в 330 тыс. чел, а складских работников в ритейле — 88 тыс. [14]. Все это либо открывает в городе новые бизнес-локации, либо трансформирует уже имеющиеся, образуя вместе со связанными с ними потоками и обслуживающими функциями новую географию третичного сектора. В таблице 3 представлены примеры бизнесов, соответствующих разным новым типам шоппинга, связанные с онлайн покупками, разбитые по частоте спроса. С каждым из них мы связали формируемые ими особые типы офлайн-объектов. Конкретные предложения (и/или продавцы) товаров в этих форматах могут разбиваться на разные типы частоты спроса: повседневный, предъявляемый практически ежедневно (продукты питания, табачные изделия, и т.д.); периодический, предъявляемый через определенные периоды (обувь, одежда и т.п.) и эпизодический, предъявляемый изредка, (мебель, ювелирные изделия, деликатесы и т.п.). Периодичность спроса для конкретного товара/продавца/отрасли ритейла, как и в случае с классической офлайн торговлей [1], выступает важнейшим фактором и при формировании городской пространственной системы

¹¹ Завершающий этап в цепочке доставки товара конечному потребителю.

Таблица 3. Примерный спектр представленных на рынке Санкт-Петербурга вариантов реализации новых типов непродовольственного шоппинга по частоте спроса

Буквами обозначены новые специфические офлайн объекты, формируемые/используемые представленными вариантами реализации новых типов шоппинга:

А – склады-магазины (с выкладкой/доступом потребителя к сравнительному маркетингу товара)

Б – склады/производства/распределители (без выкладки/доступа потребителя к сравнительному маркетингу товара), dark store

В – пункты выдачи заказа с обслуживанием и без (ПВЗ и постаматы)

Table 3. Approximate range of the implementation types of non-food shopping on the St. Petersburg market by frequency of demand

The letters indicate new specific offline objects formed/used by the presented variants of the implementation of new types of shopping:

А – warehouses-stores (with layout/consumer access to comparative marketing of goods)

В – warehouses-fulfilment centers (without layout/consumer access to comparative marketing of goods), dark store

В – order pick-up points with and without service

Формат интернет-покупки	Пример бизнеса	Специфические офлайн объекты	Частота спроса	Преобладающий тип специфических объектов размещения
Интернет-магазин + склад-магазин	Небольшие магазины по продаже смартфонов	А, В	Периодический	Бизнес-центры класса В, С
	Юлмарт, ВсеИнструменты.ру	А, В	Эпизодический	Магазины с отдельным входом
Интернет-магазин + самовывоз со склада	Продажа смартфонов	Б, В	Периодический	Бизнес-центры класса С
	Небольшие магазины по продаже запчастей для пылесоса, строительной техники, агротрейдинг	Б, В	Эпизодический	Бизнес-центры класса С, помещения в промзонах
Интернет-магазин с доставкой до дома или до пункта выдачи (продают свои товары)	аптека.ру	Б, В	Периодический	ПВЗ “у дома”
	Небольшие магазины по продаже одежды на заказ, цветов, hand-made	В	Эпизодический	Бизнес-центры класса В, С, помещения в жилых домах
Сервисы частных объявлений	Avito, ВК, Юла	–	Периодический	–
	Auto.ru, Avito недвижимость	–	Эпизодический	–
Сервис стационарного магазина по онлайн-покупке и доставке до дома или пункта самовывоза	Петрович, Одежда, Watsons, NYX(Россия)	В	Периодический	Стационарные магазины, ПВЗ
	MediaMarkt, DNS	–	Эпизодический	–
Сервис агрегатора интернет-магазинов и доставки (маркетплейс + свои товары)	Яндекс-маркет, Ozon, Wildberries	А, Б, В	Периодический	См. описание кейса ниже
	Яндекс-маркет, Amazon	А, Б, В	Эпизодический	ПВЗ, постаматы

(экспертная оценка автора методом тестовых запросов соответствующим сервисам, с участием А.Шарковой).

Таблица 4. Типология объектов размещения пунктов выдачи заказов (ПВЗ) и постаматов интернет-сервиса Ozon в Санкт-Петербурге (сентябрь 2021 г.)**Table 4.** Typology of placement of order pick-up points and parcel lockers of the Ozon Internet service in St. Petersburg (September 2021)

Тип объекта размещения	Число	%
<i>Пункты выдачи заказов (ПВЗ)</i>		
Жилой дом	403	73.5
Торговый центр/павильон	53	9.7
Магазин	42	7.7
Офис и административные здания	38	6.9
Бизнес-центр	10	1.8
Апартаменты	2	0.4
<i>Итого ПВЗ</i>	548	100
<i>Постаматы</i>		
Магазин	71	87.7
Торговый центр/павильон	4	4.9
Бизнес-центр	2	2.5
Офис и административные здания	2	2.5
Центральный склад/логистический центр Ozon	2	2.4
<i>Итого постаматов</i>	81	100
<i>Итого ПВЗ и постаматов</i>	629	

Составлено автором по данным, собранным при участии А. Шарковой по [7] и сервису 2ГИС.

офлайн объектов, обслуживающих онлайн операции, определяя плотность и расположение объектов в городе.

Как указывалось выше, самым успешным форматом последнего времени всей интернет-торговли как в России, так и в мире, являются маркетплейсы – сервисы посредника-агрегатора интернет-магазинов и доставки, которые также могут параллельно развивать и торговлю своими товарами. Учитывая значимость данного формата, стоит отдельно остановиться на анализе принципов размещения их офлайн объектов в пространстве города. В качестве примера возьмем одного из лидеров отрасли в России компанию Ozon, находящуюся на 2 месте рейтинга интернет-магазинов 2021 г. в РФ по версии Data Insight [8], в августе – сентябре 2021 г. в Санкт-Петербурге насчитывалось 548 ПВЗ и 81 постамат сервиса (табл. 4). Ни один брендированный офлайн магазин непищевой розницы не обладал такой сетью, такое количество торгово-логистических точек скорее соответствует крупнейшим сетевым форматам преимущественно пищевых розничных сетей магазинов “у дома”, обслуживающих в основном повседневный спрос¹².

Из материалов табл. 4 становятся очевидны различия в приоритетах размещения двух основных типов розничных объектов данного формата: ПВЗ с обслуживанием и постаматов. Ритейлер явно отдает предпочтение ПВЗ, как более универсальному логистическому пункту и предпочитает максимально придвинуть пункты к местам проживания (отдельные помещения в жилых домах, апартаментах) или потокам потребителей (чужие торговые объекты, бизнес-центры). Поскольку постаматы требуют охраны, их размещают по тем же принципам, но за исключением собственных брендированных помещений (в основном субарендуются места в чужих) и неохраняемых объектов (не в жилых домах). Очевидно, что размещение объектов соответствует локальному и центрально-локальному типу отраслей ритейла, тяготеющим к местам размещения розничных потребителей [1]. Можно заключить, что такие принципы размещения заставляют интернет-ритейлера **конкурировать в пространстве города со всеми видами мелкого ритейла** (от стрит-ритейла, магазинов у дома до торговых мест в торговых центрах), **а также с офисным бизнесом**, что выступает новеллой по сравнению с предыдущими моделями шопинга.

Какие **выводы** можно сделать из всех представленных выше данных?

Новые тенденции, связанные с цифровой трансформацией ритейла и формирующие **систему пространственных потребностей объектов возникающих новых непродовольственных торговых форматов** в городе, заключаются, как минимум, в следующем.

1. Происходит масштабный перенос **торговой** функции непищевого ритейла **в некогда неторговые** (не профильные для розницы) помещения, различающиеся по требованиям к размещению, а именно:

а. Помещения с доступом покупателя стремятся размещаться в офисных центрах, почтовых отделениях и пр., вступая в конкуренцию с “профильными” для таких объектов размещения неторговыми типами бизнеса.

б. Помещения без доступа покупателя (склады, распределительные центры, dark stores), из которых осуществляется доставка товара конечному потребителю (либо до дома, либо до ПВЗ/постамата) формируют иерархическую систему потребности ритейла в размещении объектов в зависимости от объема, частоты обслуживаемого спроса и логистических особенностей бизнеса. Поэтому конкуренция у таких форматов за размещение происходит как с традиционными отраслями оптовой торговли (крупные склады, инфраструктура), так и за более приближенные к конечному потребителю меньшие помещения в промзонах, нежилых зданиях и помещениях (цеха, подвалы, заводоуправления, офисы класса С и т.п.) – с прочими неторговыми отраслями.

2. Противонаправленный процесс способствует переводу **неторговой** функции розницы **в торговые** помещения:

а. В традиционные помещения магазинов добавляется новая логистическая функция склада-распределителя. Бурно развивающаяся тенденция к омниканальности розницы добавляет такую функцию в уже существующие магазины, притягивая к ним новые типы логистических потоков, а также формирует новые специализированные локации, где изначально формируются омниканальные форматы (такие как Юлмарт, ВсеИнструменты.ру и др.). Если первые размещались по традиционным для офлайн-розницы принципам [1], то новые комбинируют требования традиционной розницы с удобством транспортной логистики (ИКЕА).

б. К формируемым уже существующими розничными точками потокам потребителей тяготеет новая зачастую конкурирующая с ними логистическая функция выдачи онлайн заказов в виде ПВЗ и постаматов, не подразумевающая самой покупки (оплаты) в данной локации. Они размещаются в арендуемых помещениях торговых центров, отдельных магазинов и т.д. В ряде случаев новая функция даже способна вытеснить

¹²Так в 2021 г., до поглощения активов под брендом Дикси, крупнейший FMCG ритейлер в формате “у дома” Магнит обладал в Петербурге и Ленинградской области сетью из всего 458 торговых точек [5].

изначальную. Так, в США целые торговые центры реформируются под логику ПВЗ крупнейших электронных ритейловых площадок типа Amazon. В Санкт-Петербурге ПВЗ в ряде локаций пока замещают менее крупные торговые площадки отдельных магазинов, аптек и пр.

3. Возникающие форматы непищевого онлайн ритейла формируют свои **новые точки** в местах, либо приближенных к существующим **потокам потребителей**, либо в доступности к **местам проживания потребителей**: во встроенно-пристроенных помещениях жилых зданий, отдельно стоящих сооружениях, которые могли бы использоваться/используются традиционной офлайн розницей. Здесь происходит прямая пространственная конкуренция новых и старых форматов ритейла.

Пожалуй, даже более масштабные сдвиги происходят в **географии логистики** и формируемых ею потоках грузов, людей и транспорта в городе. Происходит перераспределение логистической функции между акторами розничной торговли в разных новых каналах, а именно:

а. Доставка покупки отделяется от задач покупателя и переходит к продавцу (доставка до двери)

б. Доставка покупки отделяется от задач продавца и переходит к покупателю (самовывоз со склада)

с. Происходит и то, и другое – доставка переходит к посреднику-логисту (с возможным участием покупателя в формате самовывоза из ПВЗ/постамата)

Это перераспределение формирует новую транспортно-логистическую инфраструктуру и соответствующие ей пространственные системы в городе:

– На стороне производителя/продавца возникают не только новые склады-распределители с разной плотностью и системой размещения в городе в зависимости от модели торговли, но и новые транспортные мощности.

– На стороне новых логистов-посредников возникают компании с различной специализацией, по-разному влияющей на пространственные системы: комплексные логисты (fulfilment), использующие весь спектр транспортно-логистической инфраструктуры; B2B и B2C перевозчики/доставщики, специализирующиеся только на транспортной инфраструктуре; операторы инфраструктуры выдачи (B2B перевозки, ПВЗ и постаматы).

– На стороне потребителя при передаче ему функции доставки из новых типов объектов формируются новые транспортно-пешеходные потоки.

От качества пространственной организации деятельности (размещения новых типов объектов и оптимизации логистики) компаний-участников нового интернет-ритейла существенным образом зависит и городское развитие в целом. В ежегодном докладе АКИТ за 2021 г. представлен пример бизнес- и в целом урбанистических эффектов от грамотного управления таким качеством: за счет оптимизации пространственной организации деятельности только одной компании-участника нового интернет-ритейла в Москве на 74% было сокращено количество курьеров и на 45% их общего пробега [14]. Подобные эффекты в масштабах всего городского интернет-ритейла означают кардинальные сдвиги на профильных рынках занятости, транспорта, в организации и регулировании потоков и транспортной инфраструктуры.

В дополнение к сказанному, можно заключить, что изменились принципы пространственного раздела территории между конкурирующими бизнесами, когда при интернет-торговле критически важным становится наиболее эффективный охват универсальным сервисом не конкретной, а всей/максимально возможной территории. Существенно возросла значимость логистического зонирования территории города внутри компаний, обеспечивающего максимально универсальное на всей территории обслуживания время и качество доставки. Если до цифровой трансформации ритейла приобретение/возврат товаров длительного пользования требовал перемещения потребителя как правило на транспорте к единичным торговым точкам в городе, то те-

перь вся покупка может осуществляться в шаговой доступности от мест проживания/работы (ПВЗ), либо вообще без перемещения. Это означает, что торговая инфраструктура товаров длительного пользования (периодического и эпизодического спроса) придвинулась в шаговую доступность и стала конкурировать с продавцами товаров повседневного спроса (FMCG) за локацию. То, что в доставке логистика “последней мили” частично перешла от потребителя к продавцу/логисту означает принципиальную смену экономической географии потоков товаров. Она формирует вместо частных спонтанных пешеходных потоков новые регулируемые мелкотоннажные типы коммерческих грузовых перевозок “последней мили” с использованием как альтернативных видов транспорта (СИМ), так и транспортных путей (тротуары, пешеходные проходы и т.п.).

Масштабы проникновения интернет-торговли в России будут возрастать, что потребует выработки и принятия серьезных управленческих решений по адаптации и реорганизации городского пространства под ее новые потребности, данная тематика требует отдельного рассмотрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов К., Брадэ И., Бондарчук Е. Трансформационное и посттрансформационное городское пространство. Ленинград-Санкт-Петербург 1989–2002, Геликон-плюс, 2006.
2. Аксенов К.Э. Эволюция типов шопинга и пространственная организация розничной торговли в постсоветском метрополисе // Известия Русского Географического Общества. 2016. № 6. С. 39–56.
3. Аксенов К.Э. Трансформация городских пространственно-временных систем (на примере влияния ритейла на районы массовой жилой застройки в Санкт-Петербурге, 1989–2016 гг.) // Известия Русского Географического Общества, Т. 151. Вып. 1. 2019 С. 29–44.
4. Ассоциация компаний интернет-торговли: [сайт] URL: <https://akit.ru/analytics/analyt-data/>.
5. Бояркова Г. “Магнит” приобрел столичные амбиции. Что значит поглощение “Дикси” для рынка и покупателей // Ежедневное Петербургское сетевое издание “Фонтанка.ру” 2021. URL: <https://www.fontanka.ru/2021/05/18/69921287/> (дата обращения: 15.05.2022).
6. Грицай О.В., Иоффе Г.В., Трейвиш А.И. Центр и периферия в региональном развитии. М: Наука, 1991. С. 168.
7. Интернет-магазин Ozon: [сайт] URL: <https://www.ozon.ru/geo/sankt-peterburg/> (дата обращения: 10.09.2021).
8. Компания Data Insight составила рейтинг крупнейших интернет-магазинов РФ по итогам 2021 года // Retail.ru: федер. интернет-портал. [2022]. URL: <https://www.retail.ru/news/data-insight-top-100-krupneyshikh-rossiyskikh-internet-magazinov-4-maya-2022-216471/> (дата обращения: 11.05.2022).
9. Комсомольская Правда-С.-Петербург, 11.04.1997.
10. Кочиева А. К. Особенности развития онлайн-торговли в России / А.К. Кочиева, А.Н. Далакова // Экономика устойчивого развития. 2019. № 2(38). С. 54–57.
11. Логистика для электронной торговли 2021. Доклад // datainsight.ru [сайт] URL: https://www.datainsight.ru/sites/default/files/DI_Logistics_for_ecom_2021.pdf (дата обращения: 11.05.2022).
12. Михайлюк М.В. Маркетплейсы как фактор прогрессивной трансформации интернет-торговли в России: логистический аспект / М.В. Михайлюк // Экономические науки. – 2019. № 172. С. 57–61.
13. Михайлюк М.В. Рынок логистики интернет-торговли в 2017–2018 гг.: развитие самовывоза и пространственное расширение географии доставки // Наука в современном обществе: закономерности и тенденции. 2019. С. 96.
14. Рынок Интернет-торговли в России в 2021 г. Доклад // akit.ru [сайт] URL: <https://admin.akit.ru/wp-content/uploads/2022/03/АКИТ-Аналитика-2021-Rev.2.pdf> (дата обращения: 11.05.2022).
15. Социально-экономическое положение Санкт-Петербурга в январе–декабре 2014 года. Петростат, Санкт-Петербург, 2015.
16. Цифровая экономика: глобальные тренды и практика российского бизнеса : Аналитический доклад / Т.К. Оганесян, Е.М. Стырин, Г.И. Абдрахманова [и др.]. Москва: Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, 2017. С. 121.
17. Эксперт-Северо-Запад, 18, 14–20 мая 2007.

18. Adams P.C., Warf B. Introduction Cyberspace and Geographical Space // *The Geographical Review*. 1997. V. 87. № 2. P. 139–145.
19. Christensen C.M., Tedlow R.S. Patterns of Disruption in Retailing // *Harvard Business Review*. 2000. V. 78. № 1. P. 42–45.
20. Fan C., Liu Y., Yang X., Chen X., Hu J. Online and offline cooperation under buy-online, pick-up-in-store: Pricing and inventory decisions // *Journal of Industrial & Management Optimization*. 2019. V. 15. № 3. P. 1455–1472.
21. Fekete E. Online retailing // In: *Barney Warf* (ed.) *Geographies of the Internet*. Routledge. 2020. P. 382.
22. Forman C., Ghose A., Goldfarb A. Competition between local and electronic markets: How the benefit of buying online depends on where you live // *Management Science*. 2009. V. 55. № 1. P. 47–57.
23. Horáková J. et al. Does the digitalization of retailing disrupt consumers' attachment to retail places? // *Journal of Retailing and Consumer Services*. 2022. V. 67. P. 102958.
24. Kellerman A. *Geographic Interpretations of the Internet*. Springer. 2016. 131 P.
25. Kent T., Omar O. *Retailing*. New York, Palgrave Macmillan. 2003. P. 310.
26. Nagy E. New consumption spaces and cross-border mobilities. // In: *Derek Hall* (ed): *Tourism and Geopolitics. Issues and concepts form Eastern and Central Europe*. CAB International. 2017. P. 142–158.
27. Ratchford B., Soysal G., Zentner A., Gauri D.K. Online and offline retailing: What we know and directions for future research // *Journal of Retailing*. 2022. V. 98. № 1. P. 152–177.
28. Ren F., Kwan M.-P. The impact of geographic context on e-shopping behavior. // *Environment and Planning B: Planning and Design*. 2009. V. 36. № 2. P. 262–278.
29. Schwab K. *The Fourth Industrial Revolution*. Crown Business. 2017. P. 172.
30. Setiawan R. et al. References for Shopping Online Versus in Stores What Do Customers Prefer and How Do Offline Retailers Cope with It? // *Productivity management*. 2020. № 1. P. 874–898.
31. Shi M., Zhou J., Jiang Z. Consumer heterogeneity and online vs. offline retail spatial competition // *Frontiers of Business Research in China*. 2019. V. 13. № 1. P. 1–19.
32. Sikos T.T., Kozák T., Kovács A. New retail models in online and offline space // *Deturope—The Central European Journal of Regional Development and Tourism*. 2019. V. 11. № 3. P. 9–28.
33. Warf B. *Global Geographies of the Internet*. Springer. 2013. P. 170.
34. Winters A., Swoboda B. Pathways of Offline-Online and Online-Offline Channel Integration in Omni-channel Retailing. *Proceedings of the European Marketing Academy*. 2019. V. 48. P. 9578
35. Wrigley N., Lowe M. *Reading Retail: A Geographical Perspective on Retailing and Consumption Spaces*. Routledge. 2014. P. 296.

Digital Transformation and the New Geography of Non-food Retail in the Russian City

K. E. Axenov*

St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

**E-mail: axenov@peterlink.ru*

The purpose of this study is to find out what has changed under the influence of digital transformation in the “physical” spatial structure of the retail sale/purchase process due to the emergence of a choice between online and offline “spaces” or environments, as well as how online commerce has changed the “physical” spatial principles of the organization of non-food retail in the Russian city on the example of St. Petersburg. The analysis of the principles of the placement of new e-commerce objects was carried out by comparison of various shopping models and the spatial-temporal systems formed by them, including specific objects (warehouses-shops, warehouses-fulfilment centers, order pick-up points and parcel lockers), features of interaction of retail actors and logistics flows in the city. In the geography of new types of retail facilities, two opposite trends are described: transfer of the trading function to non-trading premises and transfer of the non-trading retail function to retail premises. They form spatial competition with both traditional retail and a new hierarchical one - with office and warehouse types of business. The new trend of the trade infrastructure of durable goods to locate within walking distance from homes means the launch of a new type of competition for locations – with sellers of FMCG. The fact that in delivery the “last mile” logistics passes from the consumer to the seller / logistician means a fundamental change in the economic geography of the flows of goods. Instead of private spontaneous pedestrian flows, it forms new regulated small-tonnage types of “last mile” commercial freight transportation using both alternative (individual) modes of transport and trans-

port routes (sidewalks, pedestrian walkways, etc.). All this requires the development of a new urban regulation policy.

Keywords: digital transformation, non-food retail, spatial organization, spatial competition, types of shopping, logistics, urban space

REFERENCES

1. Aksenov K., Brade I., Bondarchuk E. Transformacionnoe i postransformacionnoe gorodskoe prostranstvo. Leningrad-Sankt-Peterburg 1989–2002, Gelikon-plyus, 2006.
2. Aksenov K.E. Evolyuciya tipov shopinga i prostranstvennaya organizaciya roznicnoj trgovli v postsovetском metropolise // Izvestiya Russkogo Geograficheskogo Obshhestva. 2016. № 6. S. 39–56.
3. Aksenov K.E. Transformaciya gorodskih prostranstvenno-vremennyh sistem (na primere vliyaniya ritejla na rajony massovoj zhiloz zastrojki v Sankt-Peterburge, 1989–2016 gg.) // Izvestiya Russkogo Geograficheskogo Obshhestva, T. 151, Vyp. 1, 2019 S. 29–44.
4. Associaciya kompanij internet-torgovli: [sajt] URL: <https://akit.ru/analytics/analyt-data/>.
5. Boyarkova G. “Magnit” priobrel stolichnye ambicii. Chto znachit pogloshhenie “Diksi” dlya ry'nka i pokupatelej // Ezhednevnoe Peterburgskoe setevoe izdanie “Fontanka.ru” [2021]. URL: <https://www.fontanka.ru/2021/05/18/69921287/> (data obrashheniya: 15.05.2022).
6. Griczaj O.V., Ioffe G.V., Trejvish A.I. Centr i periferiya v regional'nom razvitii. M: Nauka, 1991. 168 s.
7. Internet-magazin Ozon: [sajt] URL: <https://www.ozon.ru/geo/sankt-peterburg/> (data obrashheniya: 10.09.2021).
8. Kompaniya Data Insight sostavila rejting krupnejshix internet-magazinov RF po itogam 2021 goda // Retail.ru: feder. internet-portal. [2022]. URL: <https://www.retail.ru/news/data-insight-top-100-krupneyshikh-rossijskikh-internet-magazinov-4-maya-2022-216471/> (data obrashheniya: 11.05.2022).
9. Komsomol'skaya Pravda-S.-Peterburg, 11.04.1997.
10. Kochieva A.K. Osobennosti razvitiya onlajn-torgovli v Rossii / A.K. Kochieva, A.N. Dalakova // Ekonomika ustojchivogo razvitiya. 2019. № 2(38). S. 54–57.
11. Logistika dlya elektronnoj trgovli 2021. Doklad // datainsight.ru [sajt] URL: https://www.datainsight.ru/sites/default/files/DI_Logistics_for_ecom_2021.pdf (data obrashheniya: 11.05.2022).
12. Mihajlyuk M.V. Marketplejisy kak faktor progressivnoj transformicii internet-torgovli v Rossii: logisticheskij aspekt / M. V. Mixajlyuk // Ekonomicheskie nauki. 2019. № 172. S. 57–61.
13. Mihajlyuk M.V. Rynok logistiki internet-torgovli v 2017–2018 gg.: razvitie samovyvoza i prostranstvennoe rasshirenie geografii dostavki // Nauka v sovremennom obshhestve: zakonomernosti i tendencii. 2019. S. 96.
14. Rynok Internet-torgovli v Rossii v 2021 g. Doklad // akit.ru [sajt] URL: <https://admin.akit.ru/wp-content/uploads/2022/03/AKIT-Analitika-2021-Rev.2.pdf> (data obrashheniya: 11.05.2022).
15. Social'no-ekonomicheskoe polozhenie Sankt-Peterburga v yanvare-dekabre 2014 goda. Petrostat, Sankt-Peterburg, 2015
16. Cifrovaya ekonomika: global'nye trendy i praktika rossijskogo biznesa : Analiticheskij doklad / T.K. Oganessian, E.M. Styrin, G.I. Abdraxmanova [i dr.]. Moskva : Nacional'nyj issledovatel'skij universitet “Vysshaya shkola ekonomiki”, 2017. 121 s.
17. Ekspert-Severo-Zapad, 18, 14–20 maya 2007.
18. Adams P.C., Warp B. Introduction Cyberspace and Geographical Space // The Geographical Review. 1997. V.87. № 2. P. 139–145.
19. Christensen C.M., Tedlow R.S. Patterns of Disruption in Retailing // Harvard Business Review. 2000. V. 78. № 1. P. 42–45.
20. Fan C., Liu Y, Yang X., Chen X., Hu J. Online and offline cooperation under buy-online, pick-up-in-store: Pricing and inventory decisions // Journal of Industrial & Management Optimization. 2019. V. 15. № 3. P. 1455–1472.
21. Fekete E. Online retailing // In: Barney Warf (ed.) Geographies of the Internet. Routledge. 2020. 382 P.
22. Forman C., Ghose A., Goldfarb A. Competition between local and electronic markets: How the benefit of buying online depends on where you live // Management Science. 2009. V. 55. № 1. P. 47–57.
23. Horáková J. et al. Does the digitalization of retailing disrupt consumers' attachment to retail places? // Journal of Retailing and Consumer Services. 2022. V. 67. P. 102958.
24. Kellerman A. Geographic Interpretations of the Internet Springer. 2016. 131 P.
25. Kent T., Omar O. Retailing. New York, Palgrave Macmillan. 2003. P. 310.
26. Nagy E. New consumption spaces and cross-border mobilities. // In: Derek Hall (ed): Tourism and Geopolitics. Issues and concepts form Eastern and Central Europe. CAB International. 2017. P. 142–158.

27. Ratchford B., Soysal G., Zentner A., Gauri D.K. Online and offline retailing: What we know and directions for future research // *Journal of Retailing*. 2022. V. 98. № 1. P. 152–177.
28. Ren F., Kwan M.-P. The impact of geographic context on e-shopping behavior // *Environment and Planning B: Planning and Design*. 2009. V. 36. № 2. P. 262–278.
29. Schwab K. *The Fourth Industrial Revolution*. Crown Business. 2017. P. 172.
30. Setiawan R. et al. References for Shopping Online Versus in Stores What Do Customers Prefer and How Do Offline Retailers Cope with It? // *Productivity management*. 2020. № 1. P. 874–898.
31. Shi M., Zhou J., Jiang Z. Consumer heterogeneity and online vs. offline retail spatial competition // *Frontiers of Business Research in China*. 2019. V. 13. № 1. P. 1–19.
32. Sikos T.T., Kozák T., Kovács A. New retail models in online and offline space // *Deturope—The Central European Journal of Regional Development and Tourism*. 2019. V. 11. № 3. P. 9–28.
33. Warf B. *Global Geographies of the Internet*. Springer. 2013. P. 170.
34. Winters A., Swoboda B. Pathways of Offline-Online and Online-Offline Channel Integration in Omni-channel Retailing. *Proceedings of the European Marketing Academy*. 2019. V. 48. P. 9578.
35. Wrigley N., Lowe M. *Reading Retail: A Geographical Perspective on Retailing and Consumption Spaces*. Routledge. 2014. P. 296.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТОЧНЫХ И РЕЧНЫХ ВОД, ПОСТУПАЮЩИХ С ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА ПЕТРОЗАВОДСКА В ОНЕЖСКОЕ ОЗЕРО

© 2022 г. А. В. Сабылина^{а, *}, Т. А. Ефремова^{а, *}, О. И. Икко^{а, **}

^аИнститут водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ
“Карельский научный центр РАН”, Петрозаводск, Россия

*E-mail: efremova.nwpi@mail.ru

**E-mail: vos-olga-zenia@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.01.2022 г.

После доработки 10.06.2022 г.

Принята к публикации 12.07.2022 г.

Представлены результаты сезонных исследований химического состава вод, поступающих с селитебной территории г. Петрозаводска в Петрозаводскую губу Онежского озера. С ливневыми и дренажными водами с территории города в Петрозаводскую губу поступает минеральных солей 21.1 тыс. т/год, органических веществ (по ХПК) – 8.3 т С/год, биогенных – 657.4 т/год. Со стоком рек Лососинка и Неглинка в Петрозаводскую губу поступает 10.1 тыс. т/год минеральных солей, 678.2 т/год соединений биогенных элементов (P, N, Si, Fe). Летом по сравнению с весной в 70% случаев наблюдается понижение концентрации натрия и хлора, в 80% случаев – повышение концентрации сульфатов. Зимой, по сравнению с осенью, в 40% проб поверхностных сточных вод наблюдается повышение концентрации натрия и хлора, а содержание сульфатов в 85% проб понижается. Учитывая, что Петрозаводская губа служит источником централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения и объектом рекреационной и рыбохозяйственной деятельности, необходима организация систем очистки поверхностных сточных вод.

Ключевые слова: минерализация, ионный состав, органическое вещество, биогенные элементы, загрязняющие вещества, селитебные территории, Петрозаводская губа Онежского озера

DOI: 10.31857/S0869607122040073

ВВЕДЕНИЕ

Актуальной проблемой крупных населенных пунктов является обеспечение экологической безопасности объектов питьевого и хозяйственного водоснабжения. Поверхностный сток с селитебных территорий оказывает негативное воздействие на качество природных вод приемного бассейна. Он формируется из талых, дождевых, поливомоечных и дренажных вод. Химический состав поверхностного стока сильно изменяется по территории города, поскольку его формирование происходит в разных функциональных зонах: промышленных, автотранспортных, строительных площадок, многоэтажных и малоэтажных жилых районов. Различные загрязняющие вещества, смываемые с этих районов города, служат источником токсичных веществ (нефтепродуктов, тяжелых металлов, СПАВ и др.) в принимающем водном объекте. В российских городах экологическому мониторингу поверхностного стока с урбанизированных территорий уделяется недостаточное внимание, что частично может быть объяснено от-

несением поверхностного стока в ранее действующем законодательстве к условно-чистым водам, не требующим очистки перед сбросом в водоем. Это упущение исправлено в 2018 г. нормативным документом [16]. Ливневые канализации, по большей части построенные в советское время, имели одну цель – отведение поверхностного стока. В настоящее время развитие жилой застройки, промышленности и инфраструктуры не всегда сопровождается одновременным созданием ливневой канализации [17].

Петрозаводск – город с населением 280 тыс. чел., расположенный на юго-западном берегу Петрозаводской губы Онежского озера. Поверхностные стоки с его селитебной территории оказывают существенное влияние на экосистему губы и озера в целом [8, 15]. Малые реки – Лососинка и Неглинка, водосборы которых находятся на урбанизированной территории города, также подвержены антропогенному воздействию. Уровень и характер этого воздействия определяется функциональными особенностями прибрежных районов. Ливневый и дренажный сток города поступает по трубам без очистки в Петрозаводскую губу. Выявление особенностей химического состава речного, ливневого и дренажного стока в Петрозаводскую губу Онежского озера имеет важное экологическое значение для Республики Карелия.

Цель исследования – изучение химического состава речных и поверхностных сточных вод с селитебной территории города Петрозаводска, поступающих в Петрозаводскую губу Онежского озера.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Территория г. Петрозаводска (135 км²) располагается в юго-западной части Петрозаводской губы (площадь 72 км²) Онежского озера. Транспортировка поверхностных сточных вод по селитебной территории города осуществляется как по коллекторно-дренажной системе, так и открытым способом.

Сезонный отбор проб осуществлялся в апреле, мае, июле, октябре 2017 г. и марте 2018 г. в восьми коллекторно-дренажных выпусках, трех ручьях и двух реках, протекающих по территории города. Пробы воды в реках отбирались в верховье и устье (рис. 1). Описание станций отбора проб воды представлено в табл. 1.

Химический анализ проводился по показателям, отражающим особенности антропогенного воздействия на поверхностно-сточные и речные воды. При этом рассматривались следующие группы показателей:

1. Минерализация, электропроводность и ионный состав воды (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-).

2. Органическое вещество (ОВ): цветность, перманганатная окисляемость (ПО), химическое потребление кислорода (ХПК), биохимическое потребление кислорода за 5 суток (БПК₅).

3. Биогенные элементы: $\text{P}_{\text{общ}}$, $\text{P}_{\text{мин}}$, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , $\text{N}_{\text{орг}}$, Si, Fe, Mn.

4. pH воды, взвешенное вещество.

5. Загрязняющие вещества: нефтепродукты, тяжелые металлы (Cu, Zn, Pb, Cd).

Определение химического состава природных вод проводили в лаборатории гидрохимии и гидрогеологии Института водных проблем Севера КарНЦ РАН. При выполнении химических анализов использовались методы, описанные в [1]. Щелочность (Alk , мг HCO_3^- /л) определялась потенциометрическим методом с двухточечным титрованием до pH 4.5 и 4.2; Na^+ и K^+ – пламенно-фотометрическим методом; Ca^{2+} и Mg^{2+} – атомно-абсорбционным методом; SO_4^{2-} – фотометрическим методом с хлоридом бария и сульфозаго III; Cl^- – фотометрическим методом с тиоцианатом ртути и нитратом железа (III); NH_4^+ – фотометрическим индофенольным методом; NO_3^- – восстановлением на кад-

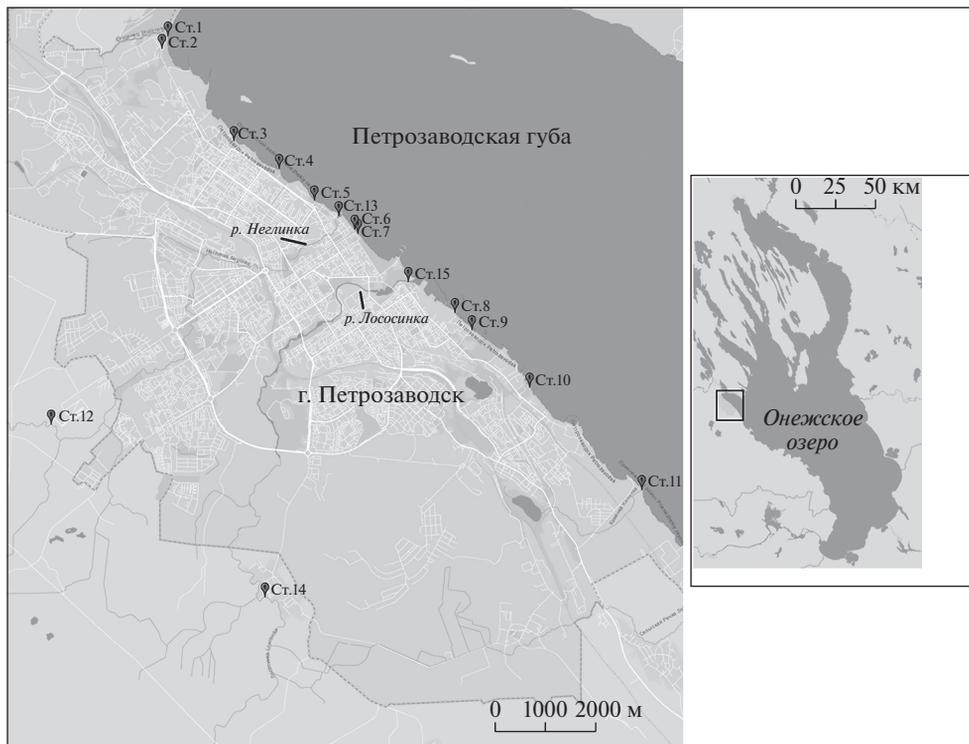


Рис. 1. Карта-схема станций отбора проб воды с селитебной территории г. Петрозаводска в 2017–2018 гг.
Fig. 1. Water sampling stations in the residential area of Petrozavodsk in 2017–2018.

миевом редуторе и с последующим анализом нитритов с сульфаниламидом и N-(1-нафтил)-этилендиамина дигидрохлоридом; $N_{\text{общ}}$ – персульфатным окислением в щелочной среде; $Fe_{\text{общ}}$ – атомно-абсорбционным методом; $P_{\text{общ}}$ – персульфатным окислением и последующим анализом фосфора минерального; $P_{\text{мин}}$ – фотометрическим методом Морфи и Райли; нефтепродукты – экстракционно-хроматографическим ИК-спектрометрическим методом; Cu, Zn, Pb, Cd – атомно-абсорбционным методом; взвешенное вещество – гравиметрическим методом; Si – фотометрическим методом в виде желтой кремниймолибденовой гетерополикислоты.

Оценка загрязненности поверхностных сточных вод и рек, протекающих по селитебной территории, выполнена по РД 52.24.643-2002 [13]. В работе применялись ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения [12].

Объем выноса веществ с селитебной территории г. Петрозаводска определяли по их концентрации в воде и объему стока с этой территории. Объем стока с селитебной территории г. Петрозаводска был рассчитан для теплого и холодного периодов, с учетом застроенных, заасфальтированных и иных “запечатанных” площадей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Поверхностные сточные воды (ПСВ). ПСВ, поступающие в прибрежные районы Петрозаводской губы, характеризуются высокой минерализацией. Солевой состав в ПСВ изменяется в течение года в широких пределах – от 264.7 до 1277.0 мг/л (в сред-

Таблица 1. Описание станций отбора проб воды
Table 1. Description of the water sampling stations

№ станции	Наименование, координаты	Примечание
1	Руч. Студенец 61°49.790' с.ш.; 34°18.318' в.д.	Вытекает из лесного массива, протекает через промышленную зону, по землям бывшего совхоза, жилого малоэтажного комплекса
2	Руч. Вилга 61°49.561' с.ш.; 34°18.181' в.д.	Местность заболоченная, в районе возводится жилой малоэтажный комплекс
3	Труба по ул. Мелентьевой 61°48.694' с.ш.; 34°19.797' в.д.	Заводские стоки ДСК, малых предприятий, промышленная зона “Петрозаводскмаш”
4	Труба по ул. Московская 61°48.403' с.ш.; 34°20.816' в.д.	Рекреационная местность, станция мойки автомобилей
5	Труба по ул. Ленинградской 61°48.068' с.ш.; 34°21.611' в.д.	Многоэтажный жилой массив
6	Труба возле Ротонды 61°47.763' с.ш.; 34°22.517' в.д.	Городская набережная
7	Труба возле городского ЗАГСа 61°47.718' с.ш.; 34°22.584' в.д.	Городская набережная
8	Труба и неорганизованный сток Судостроительного завода и Автоколонны 1126 61°46.886' с.ш.; 34°24.776' в.д.	Коллектор переполнен поверхностными сточными водами
9	Канавы (Морской клуб) 61°46.708' с.ш.; 34°25.154' в.д.	Действует во время паводков и осадков
10	Руч. Большой 61°46.103' с.ш.; 34°26.449' в.д.	Местность заболоченная, с обильными выходами грунтовых вод, на левом берегу расположена вторая очередь молокозавода
11	Руч. Каменный 61°45'01.69'' с.ш.; 34°28'58.8'' в.д.	Протекает в жилых районах Ключевая и Сайнаволок
12	Р. Неглинка (верховье) 61°45.714' с.ш.; 34°15.688' в.д.	Исток из небольшой ламбы. Верховье реки заболоченное. Протекает через микрорайоны Древлянка, Перевалка, Первомайский и Центр
13	Р. Неглинка (устье) 61°47.902' с.ш.; 34°22.156' в.д.	
14	Р. Лососинка (сред. течение) 61°43.910' с.ш.; 34°20.483' в.д.	Вытекает из оз. Лососинное. Верховье реки заболоченное, протекает через микрорайоны Древлянка, Голиковка, территорию бывшего тракторного завода (центр города)
15	Р. Лососинка (устье) 61°47.215' с.ш.; 34°23.718' в.д.	

нем 403.7 мг/л), и в 11 раз превышает минерализацию воды в губе (24.4 мг/л). На 10 станциях отбора проб стоков относительное снижение минерализации (%-экв.) летом по сравнению с весной выявлено в четырех случаях, повышение — в пяти случаях, отсутствие изменений — в одном случае. Понижение концентрации натрия и хлора летом по сравнению с весной наблюдается в 70% случаев, а повышение концентрации сульфатов — в 80% случаев. По-видимому, с одной стороны это обусловлено пылевидными выбросами цемента, с другой — выпадениями серной кислоты, связанным с преобладанием западного переноса воздушных масс со стороны индустриально развитых стран Западной Европы. Таким образом, “импорт” серы превышает “экспорт” и выпадение в результате собственных эмиссий [5, 10]. Зимой 2018 г. наблюдались частые оттепели и с талыми водами в ПСВ поступали химические реагенты, обогащенные хлористым натрием, понижающим обледенение дорожных покрытий города. Поэтому в этот сезон, по сравнению с осенью, наблюдается повышение концентрации

натрия и хлора в ПСВ в 40% проб, а содержание сульфатов в 85% проб понижается (табл. 2).

Одновременное изменение концентрации ионов натрия и хлора указывает на антропогенное загрязнение ПСВ, связанное с хозяйственно-бытовой деятельностью.

Содержание органических веществ в ПСВ по косвенным показателям (ПО и ХПК) сравнительно невысокое для сточных вод и изменяется в течение года соответственно от 2.2 до 58.9 мгО/л (в среднем 13.6 мгО/л) и от 17.3 до 96.4 мгО/л (в среднем 42.4 мгО/л) (табл. 3). Среднегодовое значение БПК₅ по 11 выпускам ПСВ равнялось 5.28 мгО₂/л (2.5 ПДК для рыбохозяйственных водоемов) и составляло 40% от ПО и 8% от ХПК, что указывает на присутствие легкоокисляемых ОВ в ПСВ в течение всего года. Экстремальных значений отношение $\frac{\text{БПК}_5}{\text{ПО}}$ (101.5) достигает в коллекторно-ливневых водах центрального района города (станция 7).

На десяти станциях отбора проб ПСВ снижение концентрации ОВ по ПО и ХПК в летний период по сравнению с весенним выявлено в четырех случаях, повышение – в пяти случаях. Причем снижение содержания от весны к лету выражено более резко (от 30 до 55%, в среднем 39%), чем увеличение (от 2 до 54%, в среднем 24%). Увеличение концентрации ОВ по ПО и ХПК от осени к зиме было отмечено в 5 случаях (56%), уменьшение – в 3 (33%), отсутствие – в 1 (11%).

Среднегодовое содержание взвешенных веществ в ПСВ по 11-ти выпускам равняется 14.0 мг/л (см. табл. 3). Максимальные их концентрации (83.2 мг/л) определены на станции 8, минимальные – на станции 6 (3.9 мг/л). В речных водах наименьшие концентрации взвешенных веществ (0.7–1.3 мг/л) найдены в верховьях в зимний период, наибольшие – 12.3 и 70.0 мг/л в устьевых участках рек Лососинка и Неглинка соответственно.

В ПСВ отмечается высокая вариабельность содержания соединений фосфора и азота (табл. 4). Концентрация общего фосфора изменяется в течение года в широких пределах; среднее значение составляет 250 мкг/л. Максимум его концентрации приурочен к осеннему сезону (среднее за сезон – 453 мкг/л). Среднегодовое содержание общего фосфора в ПСВ в 10 раз превосходит его концентрации в водах губы (25 мкг/л). Содержание минерального фосфора высокое и составляет 60–98% от общего, что явно связано с хозяйственно-бытовыми источниками его поступления в ПСВ. Наиболее высокие концентрации $R_{\text{мин}}$ и $R_{\text{общ}}$, равные 1678 и 2136 мкг/л, отмечены в ливневых выпусках в восточной части побережья губы (станция 8).

Преобладающей формой минеральных форм азота в ПСВ в течение года является нитратная, составляющая 0.2–6.51 мгN/л (в среднем 2.92 мгN/л). Среднегодовая концентрация аммонийного азота в 2 раза меньше нитратного. Концентрация $N_{\text{орг}}$ в ПСВ изменяется от 0.01 до 1.58 мгN/л (в среднем 0.67 мгN/л); эта форма соединений азота не превалирует. Среднегодовая концентрация $N_{\text{орг}}$ в 7 раз меньше, чем среднегодовая сумма минеральных соединений азота (табл. 4).

Источником литофильно-биогенных элементов (Fe, Si) в ПСВ служит в основном поступление их из трансформированных грунтов и горных пород городской территории.

Содержание общего железа в исследованных ПСВ в течение года изменялось от 0.1 до 18.9 мг/л. Его средняя за год концентрация составляла 2.3 мг/л, что в 12 раз выше таковой в водах губы. Содержание кремния во всех выпусках ПСВ находилось в пределах 2.8–6.9 мг/л (в среднем за год 4.8 мг/л). Средние концентрации его в водах губы в 2 раза ниже.

Ранее исследования содержания биогенных элементов в ПСВ были проведены весной 1993 г. и 2003 г. и для сравнения данных в табл. 5 приведены их средние значения по всем выпускам за указанные годы и весну 2017 г. Из таблицы видно, что содержание всех минеральных форм биогенных элементов увеличилось в 2017 г. в 2–4 раза по

Таблица 2. Удельная электропроводность, минерализация, ионный состав и величина pH в поверхностных сточных водах и малых реках в 2017–2018 гг., средние значения

Table 2. Conductivity, mineralization, ionic composition and pH value in surface wastewater and small rivers in 2017–2018 (average values)

Станция	ϰ, мкСм/см	Сумма ионов (Σ _и), мг/л	Сумма катионов (Σ _{кат}), ммоль*экв/л	pH	Ионный состав, %-экв.
1	434	308.8	4.2	7.68	$\frac{\text{Ca}^{2+}49\text{Na}^{+}23\text{Mg}^{2+}23\text{K}^{+}5}{\text{HCO}_3^{-}62\text{Cl}^{-}18\text{SO}_4^{2-}18\text{NO}_3^{-}2}$
2	497	371.5	4.9	7.80	$\frac{\text{Ca}^{2+}50\text{Na}^{+}25\text{Mg}^{2+}21\text{K}^{+}3\text{NH}_4^{+}1}{\text{HCO}_3^{-}72\text{Cl}^{-}14\text{SO}_4^{2-}12\text{NO}_3^{-}2}$
3	590	402.2	5.6	7.53	$\frac{\text{Ca}^{2+}45\text{Na}^{+}28\text{Mg}^{2+}19\text{NH}_4^{+}5\text{K}^{+}3}{\text{HCO}_3^{-}50\text{Cl}^{-}24\text{SO}_4^{2-}20\text{NO}_3^{-}6}$
4	580	404.1	5.5	7.59	$\frac{\text{Ca}^{2+}47\text{Na}^{+}27\text{Mg}^{2+}22\text{K}^{+}3\text{NH}_4^{+}1}{\text{HCO}_3^{-}55\text{Cl}^{-}24\text{SO}_4^{2-}18\text{NO}_3^{-}3}$
5	596	393.8	5.6	8.06	$\frac{\text{Ca}^{2+}45\text{Na}^{+}30\text{Mg}^{2+}22\text{K}^{+}3}{\text{HCO}_3^{-}51\text{Cl}^{-}22\text{SO}_4^{2-}20\text{NO}_3^{-}7}$
6	855	520.8	8.0	7.92	$\frac{\text{Na}^{+}56\text{Ca}^{2+}29\text{Mg}^{2+}11\text{K}^{+}4}{\text{Cl}^{-}50\text{HCO}_3^{-}32\text{SO}_4^{2-}10\text{NO}_3^{-}4\text{Aopr}4}$
7	540	360.2	5.0	7.56	$\frac{\text{Ca}^{2+}45\text{Na}^{+}30\text{Mg}^{2+}17\text{NH}_4^{+}5\text{K}^{+}3}{\text{HCO}_3^{-}54\text{Cl}^{-}24\text{SO}_4^{2-}19\text{NO}_3^{-}3}$
8	1150	734.4	11.0	7.57	$\frac{\text{Na}^{+}51\text{Ca}^{2+}29\text{Mg}^{2+}14\text{NH}_4^{+}4\text{K}^{+}2}{\text{Cl}^{-}49\text{HCO}_3^{-}39\text{SO}_4^{2-}9\text{NO}_3^{-}2\text{Aopr}1}$
9	534	353.4	5.0	7.43	$\frac{\text{Ca}^{2+}42\text{Na}^{+}40\text{Mg}^{2+}15\text{K}^{+}2}{\text{HCO}_3^{-}47\text{Cl}^{-}37\text{SO}_4^{2-}16}$
10	806	487.1	7.3	7.90	$\frac{\text{Na}^{+}52\text{Ca}^{2+}30\text{Mg}^{2+}15\text{K}^{+}2}{\text{Cl}^{-}51\text{HCO}_3^{-}34\text{SO}_4^{2-}11\text{NO}_3^{-}4}$
11	146	104.8	1.6		$\frac{\text{Ca}^{2+}49\text{Mg}^{2+}31\text{Na}^{+}17\text{K}^{+}2\text{NH}_4^{+}1}{\text{HCO}_3^{-}54\text{Aopr}23\text{Cl}^{-}12\text{SO}_4^{2-}9\text{NO}_3^{-}2}$
Среднее*	612	403.7	5.8		
12	33	5.5	0.2	4.31	$\frac{\text{H}^{+}26\text{Ca}^{2+}25\text{Na}^{+}22\text{Mg}^{2+}19\text{K}^{+}5\text{NH}_4^{+}3}{\text{SO}_4^{2-}42\text{Cl}^{-}38\text{Aopr}16\text{NO}_3^{-}4}$
13	414	250.2	3.9	7.35	$\frac{\text{Na}^{+}38\text{Ca}^{2+}35\text{Mg}^{2+}21\text{K}^{+}4\text{NH}_4^{+}2}{\text{HCO}_3^{-}41\text{Cl}^{-}31\text{Aopr}14\text{SO}_4^{2-}11\text{NO}_3^{-}3}$
14	42	28.9	0.5	6.91	$\frac{\text{Ca}^{2+}44\text{Mg}^{2+}36\text{Na}^{+}16\text{K}^{+}4}{\text{HCO}_3^{-}56\text{Aopr}30\text{SO}_4^{2-}7\text{Cl}^{-}7}$
15	93	62.1	0.9	7.24	$\frac{\text{Ca}^{2+}38\text{Na}^{+}33\text{Mg}^{2+}25\text{K}^{+}4}{\text{HCO}_3^{-}52\text{Cl}^{-}30\text{SO}_4^{2-}10\text{Aopr}6\text{NO}_3^{-}2}$

Примечание. * – среднее за год по одиннадцати выпускам ПСВ.

Таблица 3. Косвенные показатели содержания ОВ в поверхностно сточных водах и малых реках в 2017–2018 гг., средние значения**Table 3.** Content of indirect indicators of organic matter in surface wastewater and small rivers in 2017–2018 (average values)

Станция	ЦВ, Град	ПО, мгО/л	ХПК, мгО/л	БПК ₅ , мгО ₂ /л	БПК ₅ /ПО, %	Взвешенное вещество, мг/л
1	75	12.8	39.7	2.09	16.3	4.0
2	66	11.3	38.1	3.62	32.0	9.2
3	35	9.8	49.7	7.49	76.8	16.6
4	33	9.8	51.5	6.73	68.5	5.4
5	21	4.4	23.6	1.24	28.4	2.6
6	50	12.3	29.6	6.72	54.9	1.5
7	37	8.7	39.3	8.80	101.5	8.4
8	37	12.0	41.4	10.94	90.9	83.2
9	27	4.6	21.8	3.79	82.0	5.2
10	27	20.0	33.9	5.03	25.2	16.5
11	401	44.3	97.4	1.67	3.8	13.0
Среднее*	74	13.6	42.4	5.28	52.8	14.0
12	292	44.1	84.9	1.38	3.1	1.3
13	158	22.3	55.0	5.66	25.4	28.4
14	158	21.7	44.3	1.76	8.1	3.0
15	155	20.5	42.6	0.89	4.4	8.4

Примечание. * – среднее за год по одиннадцати выпускам ПСВ.

Таблица 4. Содержание биогенных элементов в поверхностных сточных и речных водах в 2017–2018 гг., средние значения**Table 4.** Content of nutrients in surface wastewater and river waters in 2017–2018 (average values)

Станция	Р _{мин}	Р _{общ}	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	N _{орг}	Fe _{общ}	Si
	мкг/л		мг/л				
1	66	84	0.27	0.80	0.45	1.9	5.0
2	105	142	1.02	1.54	0.50	2.6	5.6
3	252	269	3.68	4.62	0.19	2.5	5.4
4	103	138	0.80	2.75	0.48	1.6	5.5
5	153	161	0.30	4.06	0.62	0.3	5.2
6	95	267	0.48	4.50	2.29	1.5	4.6
7	565	700	3.15	4.10	0.29	0.3	4.1
8	460	688	5.68	3.50	0.59	1.7	5.0
9	67	142	0.18	0.63	0.65	1.2	4.3
10	56	85	0.55	4.70	0.81	1.0	4.7
11	46	78	0.37	0.90	0.45	10.5	3.7
Среднее*	179	250	1.50	2.92	0.67	2.3	4.8
12	15	43	0.09	0.10	0.93	1.2	3.1
13	99	140	0.66	1.80	0.56	2.6	4.1
14	32	61	0.04	0.08	0.93	1.2	2.4
15	39	72	0.09	0.25	0.56	1.7	2.6

Примечание:* – среднее за год по одиннадцати выпускам ПСВ.

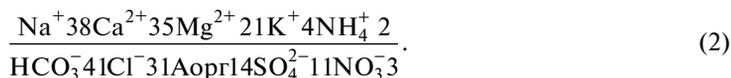
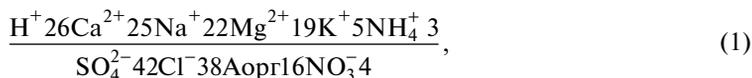
Таблица 5. Средние значения концентрации биогенных элементов по всем водовыпускам в весенние сезоны 1993, 2003 и 2017 гг.

Table 5. Average values of the concentration of nutrients for all water sampling stations in spring seasons in 1993, 2003 and 2017

Год	P _{мин}	P _{общ}	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	N _{орг}
	мкг/л		мгN/л		
1993	88	140	0.14	0.57	0.59
2003	53	80	0.15	1.60	0.99
2017	101	142	0.70	2.72	0.47

сравнению с 1993 и 2003 гг., т.е. антропогенная составляющая в ПСВ неуклонно возрастает.

Водосбор р. Неглинка (станция 12) отличается высокой заболоченностью (15%) [3]. Вода в верховье реки обогащена гумусовыми веществами (цветность 292 град.; ПО 44.1 мгО/л; рН 4.31) (см. табл. 3). При таких низких значениях рН в воде отсутствуют гидрокарбонаты, а преобладающим анионом являются сульфаты, катионом – Н⁺. Такое необычное распределение связано в первую очередь с особенностью кислотно-основного равновесия поверхностных вод гумидной зоны. Такая специфика вод связана с наличием органических веществ, содержание которых сопоставимо с содержанием минеральных веществ, поэтому кислотно-основное равновесие в них обусловлено двумя системами: карбонатной и гумусовой; рН таких вод определяется содержанием их равновесных компонентов [6]. Кислотность поверхностных вод гумидной зоны обусловлена наличием свободных ионов Н⁺, углекислого газа и слабых органических кислот, в первую очередь гумусовых [6]. Степень антропогенного воздействия на химический состав воды рек Лососинка (станции 14, 15) и Неглинка (станции 12, 13) возрастает от верховьев к устьям. В верховьях рек качество воды соответствует их природному состоянию. Следует особо подчеркнуть степень антропогенного воздействия на воды р. Неглинка. В верховьях р. Неглинка и Лососинки общая минерализация воды составляла 5.5 и 28.9 мг/л соответственно, в устье рек она возросла в первой в 46 раз, во второй – в 2 раза (см. табл. 2). Причем возрастание общей минерализации в воде р. Неглинка связано в первую очередь с увеличением содержания хлорида натрия, в особенности в период половодья. Также повышенное содержание хлоридов и сульфатов установлено в устье р. Неглинка, что, по-видимому, связано с интенсивным поступлением минеральных веществ с городской территории вместе с дождевыми и тальными водами. Кардинальное изменение формулы ионного состава воды (в %-экв, среднегодовое) реки Неглинка от верховья (1) к устью (2) служит яркой иллюстрацией антропогенного воздействия на химический состав воды реки:



Перераспределения доли главных катионов и анионов в ионном составе р. Лососинка не происходило, но незначительно повышаются доли Na⁺ и Cl⁻.

Содержание растворенного кислорода в р. Лососинка изменяется от 8.30 до 10.27 (73–89% насыщения). Концентрация растворенного кислорода и процент насыщения

в р. Неглинка низкие летом в истоке (5.91 мг/л и 57% насыщения) и повышаются в замыкающем створе до 8.31 мг/л и 80% насыщения.

Вода в верховье рек, как ранее было отмечено, содержит большое количество аллохтонного ОВ природного происхождения. Так, средние величины цветности в р. Неглинка и р. Лососинка равны 292 и 156 град., ПО – 44.1 и 21.7 мгО/л, ХПК – 84.9 и 44.3 мгО/л, БПК₅ – 1.38 и 1.33 мгО₂/л соответственно. К устью показатели ОВ в воде р. Лососинка практически не изменяются, тогда как в р. Неглинка значения цветности, ПО и ХПК уменьшаются практически вдвое. При этом количество легкоокисляемого ОВ существенно возрастает – среднее значение БПК₅, отражающего лабильную часть ОВ, составляет здесь 5.66 мг О₂/л (см. табл. 3).

Низкое содержание минерального (5–15 мкг/л) и общего фосфора (10–35 мкг/л) характерно для природных вод Карелии и истоков изучаемых рек [5]. К устью среднегодовые концентрации Р_{мин} в воде р. Неглинка возрастают с 15 (верховье) до 99 мкг/л, а Р_{общ} – с 43 до 140 мкг/л (см. табл. 4). Доля Р_{мин} в составе Р_{общ} возрастает с 35 до 71%, что свидетельствует об антропогенном воздействии, вызванном поступлением хозяйственно-бытовых сточных вод с сельтебной территории. Кроме того, на водосборной территории реки имеется ряд неорганизованных свалок бытового и хозяйственного мусора, а значительная часть водосбора реки находится на территории г. Петрозаводска [14]. Максимально высокое содержание общего фосфора (262 мкг/л) было выявлено в р. Неглинка в период осеннего паводка.

Среднегодовое содержание минеральных форм азота NO₃⁻ и NH₄⁺ в р. Неглинка возрастает по течению к устью соответственно с 0.10 до 1.80 мгN/л и с 0.09 до 0.66 мгN/л, тогда как в р. Лососинка концентрации NO₃⁻ и NH₄⁺ соответственно увеличиваются незначительно: с 0.08 до 0.25 мгN/л и с 0.04 до 0.09 мгN/л.

Загрязняющие вещества в ПСВ. Загрязняющие вещества (тяжелые металлы и нефтепродукты) поступают в ПСВ из несанкционированных свалок городских отходов, промышленных предприятий, автотранспорта, автозаправок. Эти загрязняющие вещества попадают в Петрозаводскую губу в больших количествах в периоды весеннего паводка и обильных дождей. Содержание нефтепродуктов было в пределах 0.01–7.54 мг/л. Максимальное их количество зафиксировано в центральной части города (станции 4, 5, 6). В воде всех выпусков содержание Cd (0.01–0.12 мкг/л) и Pb (0.3–4.3 мкг/л) было значительно ниже ПДК (табл. 6). Концентрация Zn варьировала в широких пределах (12.2–154.2 мкг/л), и в среднем составляла 67.4 мкг/л (6.7 ПДК). Максимальное содержание цинка определено в выпуске на станции 3, где протекают заводские стоки ДСК, малых предприятий и промышленной зоны “Петрозаводскмаш”, а также в выпуске на станции 6, стоки которого протекают через центр Петрозаводска. Кроме того, все исследованные ПСВ содержали повышенное количество Cu – от 4.3 до 95.4 мкг/л (в среднем 30 мкг/л, или 30 ПДК). Хочется отметить, что повышенное содержание Cu и Zn характерно для всего региона и, по всей видимости, помимо антропогенного воздействия, их содержание в ПСВ отражает и геохимические особенности территории [7, 9]. При поступлении в Петрозаводскую губу часть металлов, например Fe, будет связана с органическим веществом аллохтонного происхождения, а остальные элементы (Zn, Pb, Cd) будут находиться в ионных, то есть наиболее токсичных формах [11].

Из загрязняющих веществ в воде рек, протекающих по сельтебной территории города, исследовались нефтепродукты и тяжелые металлы (Zn, Cu, Pb, Cd). Среднегодовые концентрации нефтепродуктов в верховьях рек Лососинка и Неглинка равны 0.08 мг/л, к устьям рек они возрастают до 0.17 (3.4 ПДК) и 0.52 мг/л (10.4 ПДК) соответственно. Среди тяжелых металлов превышение ПДК в устьевых участках рек отме-

Таблица 6. Содержание нефтепродуктов и тяжелых металлов в поверхностных сточных водах и малых реках в 2017–2018 гг., средние значения

Table 6. The content of total petroleum hydrocarbons and heavy metals in surface wastewater and small rivers in 2017–2018 (average values)

Станция	Zn	Cu	Pb	Cd	Нефтепродукты
	мкг/л				мг/л
1	27.6	13.6	1.2	0.06	0.12
2	12.2	4.3	0.4	0.04	0.08
3	125.9	37.0	0.6	0.09	0.16
4	73.5	27.2	0.5	0.04	2.13
5	44.4	17.2	0.4	0.06	0.84
6	154.2	95.4	4.3	0.09	0.85
7	80.1	34.4	0.4	0.04	0.39
8	97.2	53.2	2.2	0.12	0.49
9	57.5	16.5	0.6	0.12	0.08
10	45.5	22.9	1.2	0.08	0.60
11	23.7	8.7	0.9	0.03	0.08
Среднее *	67.4	30.0	1.2	0.07	0.53
12	10.9	1.7	0.7	0.05	0.08
13	30.1	48.3	1.9	0.07	0.52
14	9.7	1.5	0.5	0.08	0.08
15	50.4	20.3	1.5	0.05	0.17
ПДК (для водоемов рыбохозяйственного назначения)	10	1	6	5	0.05

Примечание. * – среднее за год по одиннадцати выпускам ПСВ.

чено для Zn (от 3 до 5 ПДК) и Cu (от 20 до 48 ПДК). Максимальные концентрации первого отмечены в р. Лососинка, а второго – в р. Неглинка (см. табл. 6).

Воды р. Лососинка на всем течении по КИЗВ (комплексный индекс загрязненности вод) и УКИЗВ (удельный комбинированный индекс, определяемый по частоте и кратности превышения ПДК) относятся к “слабо загрязненным” водам в истоке, а в замыкающем створе – к “загрязненным”. Вода р. Неглинка в устье по критерию УКИЗВ является “очень загрязненной” (табл. 7). В устье реки наблюдается изменение состава главных ионов, с преобладающим катионом натрия.

Характеристика водного стока с селитебной территории. К основным факторам, определяющим изменение водного баланса на урбанизированных территориях, можно отнести следующее:

- наличие участков водонепроницаемых грунтов;
- преобразование воздушных масс над городом, что сопровождается изменением температуры воздуха, осадков и испарения;
- изменение условий формирования подземных вод и режима их стока.

Определяющую роль в изменении годового стока с больших водосборов играют первые два фактора. В среднем за год на территорию г. Петрозаводска выпадает 620 мм атмосферных осадков [2]. Объем стока каждого из 11 обследованных выпусков ПСВ неизвестен, и они не охватывают всю урбанизированную территорию города, поэтому сток ПСВ с селитебной территории определяли водно-балансовым методом. Принималось, что изменение стока соответствует изменению испарения [8]. Для

Таблица 7. КИЗВ, УКИЗВ поверхностных сточных вод и вод рек Лососинка и Неглинка в 2017–2018 гг., рассчитанные по ПДК**Table 7.** Combinatorial index of water pollution and a specific combinatorial index of surface wastewater and the Lososinka and Neglinka river water pollution in 2017–2018, calculated according to maximum permissible concentration

Станция	КИЗВ	УКИЗВ	Характеристика воды по УКИЗВ
1	42.3	2.7	Загрязненная
2	42.8	2.7	Загрязненная
4	63.1	4.0	Грязная
5	29.6	1.9	Слабо загрязненная
6	88.2	5.5	Грязная
7	63.7	4.0	Грязная
8	83.1	5.2	Грязная
9	40.1	2.5	Загрязненная
10	52.3	3.6	Очень загрязненная
11	43.3	2.7	Загрязненная
12	23.5	1.4	Слабо загрязненная
13	64.3	3.8	Очень загрязненная
14	25.8	1.5	Слабо загрязненная
15	37.1	2.2	Загрязненная

Таблица 8. Испарение с городской территории Петрозаводска (мм)**Table 8.** Evaporation from the urban area of Petrozavodsk (mm)

Показатель	Месяцы												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
E_o	5	5	13	35	73	102	106	68	33	13	7	6	466
E_a	5	5	13	35	14	16	18	21	20	10	7	6	170
E_{pr}	5	5	13	35	62	89	86	59	32	12	7	6	411
E_{gor}	5	5	13	35	54	78	75	53	30	12	7	6	373

Примечание: E_o – испаряемость, E_a – испарение с практически водонепроницаемой (“запечатанной”) части территории города, E_{pr} – испарение с окружающей территории, E_{gor} – испарение с территории города в целом.

г. Петрозаводска было рассчитано испарение отдельно для теплого и холодного периода с учетом площади застроенных и заасфальтированных территорий [4]. Результаты расчета испарения с различных территорий представлены в табл. 8.

Значение стока с окружающей город территории, полученное при осреднении величин стока ближайших рек, составляет 350 мм. Водонепроницаемая территория города, составляющая около 16%, снижает испарение, следовательно, увеличивает сток на 38 мм. В таком случае слой стока с городской территории составляет 388 мм. Площадь селитебной территории города составляет 135 км², тогда объем стока с селитебной территории города будет равен: $135.0 \times 388 \times 10^6 = 52380$ тыс. м³/год. Среднегодовой расход воды р. Лососинки равен 3.21 м³/с, р. Неглинка – 0.48 м³/с. Исходя из сказанного выше, был определен вынос химических веществ с селитебной территории города с поверхностными водами и речным стоком (табл. 9).

Таблица 9. Вынос химических веществ с селитебной территории города Петрозаводска поверхностными сточными водами и реками в 2017–2018 гг.**Table 9.** Removal of chemicals from the residential area of the Petrozavodsk city by surface wastewater and rivers in 2017–2018

Показатель	Селитебная территория	р. Лососинка	р. Неглинка
Сумма ионов ($\Sigma_{и}$), тыс. т/год	21.1	6.3	3.8
Взвешенное вещество, т/год	743.8	852.0	438.0
ПО, т О/год	712.4	2079.4	338.2
ХПК, т О/год	2220.9	4321.2	834.2
БПК ₅ , т О ₂ /год	277.6	90.3	0.09
$P_{мин}$, т/год	9.4	4.0	1.5
$P_{общ}$, т/год	13.1	7.3	2.1
NH_4^+ , т/год	78.6	9.1	10.1
NO_3^- , т/год	151.9	25.4	27.3
NO_2^- , т/год	5.2	0.5	0.7
$N_{орг}$, т/год	36.7	56.8	8.5
$N_{общ}$, т/год	272.4	91.8	46.6
$Fe_{общ}$, т/год	120.5	172.4	39.4
Si, т/год	251.4	263.7	62.2
Cu, т/год	1.6	5.1	0.8
Zn, т/год	3.5	2.9	0.5
Нефтепродукты, т/год	27.8	17.2	7.6

Как видно из табл. 9, наибольшее влияние селитебной территории Петрозаводска отражается на минерализации ПСВ и речных вод. Вынос минеральных веществ с ПСВ в 9.5 раза выше, чем органических (по ХПК). Биогенный сток с селитебной территории невелик ($P_{общ}$ 13.1 т/год, $N_{общ}$ 272.4 т/год). Однако большая часть от $P_{общ}$ приходится на $P_{мин}$ – 72%, а от $N_{общ}$ 56% приходится на NO_3^- и 27% – на NH_4^+ . Доля $N_{орг}$ небольшая – 13%, и совсем низкая доля NO_2^- – 4%. Такое распределение в стоке форм азота закономерно, поскольку дренажные ливневые воды с селитебной территории хорошо насыщены кислородом, и процесс нитрификации в них заканчивается образованием нитратов.

Основная доля в суммарном биогенном стоке (P, N, Fe, Si) в ПСВ приходится на $N_{общ}$ (41%). Второе место занимает Si, затем идут Fe и P. В речном биогенном стоке около половины его приходится на долю кремния. ПСВ и речные воды вносят в Онежское озеро значительное количество нефтепродуктов (около 28 т/год). Высокое количество Cu (5.1 т/год) вносится с речными водами, а Zn (3.5 т/год) – с ПСВ.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ химического состава ПСВ и речных вод, стекающих с селитебной территории города Петрозаводска, показал, что он подвержен значительной внутригодовой изменчивости и пространственно неоднороден. Выявлено, что наибольшие изменения претерпевает минеральный и биогенный состав вод, в особенности в период весеннего половодья, когда талые воды содержат максимальное количе-

ство натрия и хлора. В летний период повышается содержание сульфатов в ПСВ, что связано с их поступлением с атмосферными осадками. В осенний период в ПСВ содержание общего фосфора достигает максимальных величин (в среднем 453 мкг/л). Кроме того, по данным прошлых исследований (в весенний период 1993, 2003 и 2017 гг.) отмечается тенденция роста содержания биогенных веществ в 2–4 раза, что говорит о возрастании антропогенного воздействия на ПСВ.

Проведенные исследования химического состава ПСВ и речных вод позволили оценить их поступление в Петрозаводскую губу Онежского озера. Загрязнение ПСВ нефтепродуктами носит локальный характер. Оно максимально в промышленных зонах города. Речные воды в течение периода открытой воды имеют высокие концентрации нефтепродуктов. Река Лососинка, устьевые и предустьевые части которой расположены на территории бывшего тракторного завода, выносит в Петрозаводскую губу 17.2 т/год нефтепродуктов. Исследованные ПСВ и воды р. Неглинки относятся к классу “грязных” или “очень грязных”.

Химический состав ПСВ и речных вод отражает все негативные процессы хозяйственной деятельности на урбанизированной территории Петрозаводска. Изменение хозяйственной деятельности на селитебной территории сказывается на содержании основных химических компонентов в воде. Петрозаводская губа Онежского озера служит источником централизованного хозяйственного водоснабжения и объектом рекреационной и рыбохозяйственной деятельности, поэтому необходима организация систем очистки ПСВ с урбанизированной территории города и организация круглогодичного мониторинга за качеством ПСВ.

Статья подготовлена при финансовом обеспечении федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (ИВПС КарНЦ РАН). Исследования выполнены на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра “Карельский научный центр Российской академии наук”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике. Под ред. Лозовика П.А., Ефременко Н.А. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.
2. Балаганский А.Ф., Карпечко В.А., Литвиненко А.В., Сало Ю.А. Ресурсы речного стока и водный баланс // Крупнейшие озера-водохранилища Севера-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 31–38.
3. Грицевская Г.Л. Заболоченность и озерность южной Карелии на примере рек Суны и Шуя // Тр. Карельск. Фил.АН СССР. 1964. Вып. 6. С. 8–24.
4. Карпечко Ю.В. Гидрологическая оценка антропогенного воздействия на водосборы в таежной зоне европейского севера России. Диссертация на соискание ученой степени доктора географических наук. Петрозаводск, 2004. 303 с.
5. Лозовик П.А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию. Диссертация на соискание ученой степени доктора химических наук. Петрозаводск, 2006. 481 с.
6. Лозовик П.А. Кислотно-основное равновесие поверхностных вод гумидной зоны // Геохимия. 2007. № 10. С. 1139–1144.
7. Лозовик П.А., Кулик Н.В., Ефременко Н.А. Литофильные элементы и тяжелые металлы в Онежском озере: источники поступления, содержание и трансформация // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 4. С. 62–74. <https://doi.org/10.17076/lim1189>
8. Лозовик П.А., Бородулина Г.С., Карпечко Ю.В., Кондратьев С.А., Литвиненко А.В., Литвинова И.А. Биогенная нагрузка на Онежское озеро по данным натуральных наблюдений // Труды КарНЦ РАН. Серия «Лимнология». 2016. № 5. С. 35–52. <https://doi.org/10.17076/lim303>
9. Лозовик П.А., Шкиперова О.Ф., Зобков М.Б., Платонов А.В. Геохимические особенности поверхностных вод Карелии и их классификация по химическим показателям // Труды КарНЦ РАН. 2006. № 9. С. 130–143.

10. Межрегиональное атмосферное загрязнение территорий. Республика Карелия. СПб.: НИИ охраны атмосферного воздуха, 1998. 93 с.
11. *Никаноров А.М., Жулидов А.В.* Биомониторинг металлов в пресноводных экосистемах. Л., 1991. 312 с.
12. Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (Утв. Приказом Минсельхоза России от 13.12.2016 г. № 552).
13. РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. СПб.: Гидрометеоиздат, 2004. 50 с.
14. *Сабылина А.В.* Химический состав воды притоков Онежского озера // Крупнейшие озера-водохранилища Севера-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 61–68.
15. *Сабылина А.В., Лозовик П.А., Зобков М.Б.* Химический состав воды Онежского озера и его притоков // Водные ресурсы. 2010. Т. 37. № 6. С. 717–729.
16. СП. 32.13330.2018. Свод правил. Канализация. Наружные сети и сооружения. СНИП 2.04.03-85 (Утвержден и введен в действие приказом Минстроя России от 25.12.2018 № 860/пр).
17. *Штаталова О.К., Акименко Н.Ю.* Неорганизованный сброс поверхностных сточных вод в системе водоотведения города // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. 2020. Т. 3. С. 509–514.

Chemical Composition of Surface Drainage and River Waters Coming from the Area of the Petrozavodsk City to the Onego Lake

A. V. Sabylina^{1, *}, T. A. Efremova^{1, *}, and O. I. Ikko^{1, **}

¹*Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia*

*E-mail: efremova.nwpi@mail.ru

***E-mail: vos-olga-zenia@yandex.ru

The results of seasonal studies of chemical composition of water coming from the residential area of Petrozavodsk to the Petrozavodsk Bay of the Onego Lake are presented. From the residential area of the city, 21.1 thousand tons of mineral salts per year, 8.3 tons of organic matter per year (in terms of COD), and 657.4 tons of nutrients per year enter the Petrozavodsk Bay with storm and drainage waters. With the runoff of the rivers Lososinka and Neglinka 10.1 thousand tons of mineral salts per year, 678.2 tons of nutrients (P, N, Si, Fe) per year enter the bay. In summer, compared with spring, the decrease in the concentration of sodium and chlorine in surface wastewater is observed in 70% of the samples, the increase in the concentration of sulfates is observed in 80% of samples. In winter, compared with autumn, an increase in the concentration of sodium and chlorine in surface wastewater is observed in 40% of the samples, and the content of sulfates decreases in 85% of the samples. Considering that the Petrozavodsk Bay serves as a source of centralized drinking water supply and an object of recreational and fishing activities, it is necessary to organize systems for treating surface wastewater.

Keywords: mineralization, ionic composition, organic pollutants, nutrient pollutants, residential areas, Petrozavodsk Bay of the Onego Lake

REFERENCES

1. Analiticheskie, kineticheskie i raschetnye metody v gidrohimicheskoy praktike. Pod red. Lozovika P.A., Efremenko N.A. SPb.: Nestor-Istorija, 2017. 272 s.
2. Balaganskij A.F., Karpechko V.A., Litvinenko A.V., Salo Ju.A. Resursy rechnogo stoka i vodnyj balans // Крупнейшие озера-водохранилища Севера-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения в экосистеме при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 31–38.
3. Gricevskaja G.L. Zabolochnost' i ozernost' juzhnoj Karelii na primere rek Suny i Shuja // Tr. Karel'sk. Fil.AN SSSR. 1964. Vyp. 6. S. 8–24.

4. Karpechko Ju.V. Gidrologicheskaja ocenka antropogennogo vozdejstvija na vodosbory v taezhnoj zone evropejskogo severa Rossii. Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni doktora geograficheskikh nauk. Petrozavodsk, 2004. 303 s.
5. Lozovik P.A. Gidrogeohimicheskie kriterii sostojanija poverhnostnyh vod gumidnoj zony i ih ustojchivosti k antropogennomu vozdejstvu. Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni doktora himicheskikh nauk. Petrozavodsk, 2006. 481 s.
6. Lozovik P.A. Kislотно-osnovnoe ravnovesie poverhnostnyh vod gumidnoj zony // Geohimija. 2007. № 10. S. 1139–1144.
7. Lozovik P.A., Kulik N.V., Efremenko N.A. Litofil'nye jelementy i tjazhelye metally v Onezhskom ozere: istochniki postuplenija, sodержanie i transformacija // Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN. 2020. № 4. S. 62–74.
<https://doi.org/10.17076/lim1189>
8. Lozovik P.A., Borodulina G.S., Karpechko Ju.V., Kondrat'ev S.A., Litvinenko A.V., Litvinova I.A. Biogennaja nagruzka na Onezhskoe ozero po dannym naturnyh nabljudenij // Trudy KarNC RAN. Serija "Limnologija". 2016. № 5. S. 35–52.
<https://doi.org/10.17076/lim303>
9. Lozovik P.A., Shkiperova O.F., Zobkov M.B., Platonov A.V. Geohimicheskie osobennosti poverhnostnyh vod Karelii i ih klassifikacija po himicheskim pokazateljam // Trudy KarNC RAN. 2006. № 9. S. 130–143.
10. Mezhregional'noe atmosfernoje zagrjaznenie territorij. Respublika Karelija. SPb.: NII ohrany atmosfernogo vozduha, 1998. 93 s.
11. Nikanorov A.M., Zhulidov A.V. Biomonitring metallov v presnovodnyh jekosistemah. L., 1991. 312 s.
12. Normativy kachestva vody vodnyh ob'ektov rybohozajstvennogo znachenija, v tom chisle normativov predel'no dopustimyh koncentracij vrednyh veshhestv v vodah vodnyh ob'ektov rybohozajstvennogo znachenija (Utv. Prikazom Minsel'hoza Rossii ot 13.12.2016 g. № 552).
13. RD 52.24.643-2002. Metod kompleksnoj ocenki stepeni zagrjaznenosti poverhnostnyh vod po gidrohimicheskim pokazateljam. SPb.: Gidrometeoizdat, 2004. 50 s.
14. Sabylina A.V. Himicheskij sostav vody pritokov Onezhskogo ozera // Krupnejshie ozera-vodohranilishha Severa-Zapada evropejskoj territorii Rossii: sovremennoe sostojanie i izmenenija jekosistem pri klimaticheskikh i antropogennyh vozdejstvijah. Petrozavodsk: KarNC RAN, 2015. S. 61–68.
15. Sabylina A.V., Lozovik P.A., Zobkov M.B. Himicheskij sostav vody Onezhskogo ozera i ego pritokov // Vodnye resursy. 2010. T. 37. № 6. S. 717–729.
16. SP. 32.13330.2018. Svod pravil. Kanalizacija. Naruzhnye seti i sooruzhenija. SNiP 2.04.03-85 (Utv. verzhdhen i vveden v dejstvie prikazom Ministra Rossii ot 25.12.2018 № 860/pr).
17. Shatalova O.K., Akimenko N.Ju. Neorganizovannyj sbros poverhnostnyh stochnyh vod v sisteme vodootvedenija goroda // Novye idei novogo veka: materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii FAD TOGU. 2020. T. 3. S. 509–514.

ОЦЕНКА ВКЛАДА САНИТАРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ В СНИЖЕНИЕ ПОСТУПЛЕНИЯ ОБЩЕГО ФОСФОРА И АЗОТА В БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ С ВОДОСБОРОВ РЕК ВОЛКОВКИ И ОХТЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

© 2022 г. С. М. Клубов^{a, b, *}, В. Ю. Третьяков^{a, c, **},
В. В. Дмитриев^{c, ***}, Ю. О. Рожкова^{c, ****}

^aРоссийский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

^bГосударственное бюджетное учреждение дополнительного образования Дворец творчества
“У Вознесенского моста”, Санкт-Петербург, Россия

^cСанкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: klubov_stepan@mail.ru

**E-mail: v_yu_tretyakov@mail.ru

***E-mail: vasily-dmitriev@rambler.ru

****E-mail: juliarozhkova21@gmail.com

Поступила в редакцию 14.04.2022 г.

После доработки 25.08.2022 г.

Принята к публикации 30.08.2022 г.

Избыточное поступление общего азота и фосфора в Балтийское море приводит к его антропогенному эвтрофированию. Страны бассейна Балтийского моря, включая Россию, стремятся координировать меры по охране окружающей среды Балтийского моря. Работает комиссия по защите морской среды Балтийского моря (Helscom). С использованием нашей авторской методики нами получены модули стока общего азота и фосфора с водосборных бассейнов рек Волковки и Охты Санкт-Петербурга. Выполнено их сравнение с модулями, рассчитанными на основании численности проживающего на водосборе населения в соответствии с принятой Helscom методикой. Показано, что благодаря работе городских коммунальных служб и ГУП “Водоканал СПб” потенциально возможная биогенная нагрузка на Балтийское море с исследованных водосборов рек Волковки и Охты сокращена в 19–45 раз по общему фосфору и в 7–20 раз по общему азоту. По результатам нашего исследования ГУП “Водоканал СПб” подтвердил статус природоохранного предприятия, ориентированного на защиту окружающей среды Балтийского моря.

Ключевые слова: Балтийское море, эвтрофирование, поступление общего азота и фосфора

DOI: 10.31857/S0869607122040061

ВВЕДЕНИЕ

Через два года после знаменитой Стокгольмской конференции ООН по проблемам окружающей среды 1972 года Балтийскими странами была подписана Хельсинская конвенция по охране морской среды Балтийского моря. Конвенция была подписана СССР, Финляндией, Данией, Германией, Польшей и Швецией. Уже в середине 1970-х годов экологические проблемы Балтийского моря стали обсуждаться на международном уровне. С 1992 года начата работа Хельсинской комиссии по защите морской среды Балтийского моря. В деятельности комиссии участвуют Швеция, Дания, Финляндия, Литва, Латвия, Эстония, Германия, Польша и Россия [18, с. 86].

Главная экологическая проблема Балтийского моря – антропогенное эвтрофирование. Природные особенности и высокий уровень урбанизации этого внутреннего моря Европы увеличивают его риск. В свою очередь из-за эвтрофирования увеличивается биомасса сине-зеленых водорослей, которые выделяют опасные токсины. Токсины, мигрируя по трофической цепи, могут вызывать отравление и даже гибель людей. Например, в августе 2022 года, в Невской губе Финского залива наблюдалось активное цветение сине-зеленых водорослей, по данным СЗМУ Росприроднадзора, одной из них являлась цианобактерия *Microcystis aeruginosa* Kützing [13].

Для регулирования уровня биогенной нагрузки 15 ноября 2007 г. в Кракове (Польша) представителями вышеназванных прибалтийских стран был согласован план действий для Балтийского моря. Одним из пунктов этого плана является установление максимальных норм поступления общего азота и фосфора в Балтийское море. Максимально допустимое поступление в него фосфора составляет 21 060 т/год, а общего азота 601 720 т/год [17, с. 9]. По подсчетам наших коллег, в настоящий момент эти нормы не превышены [6, с. 57; 7, с. 914; 17, с. 9; 15, с. 189; 27, с. 2]. Но ситуация может измениться, поэтому требуется неукоснительное соблюдение существующих норм и снижение биогенной нагрузки на Балтийское море. Наибольшая ответственность за сохранение экологического благополучия морской среды Балтики лежит на странах, на территории которых располагается большая часть водосборного бассейна моря. Так общая площадь водосборного бассейна Балтийского моря составляет 1 740 000 км², наибольшая доля этого водосборного бассейна расположена на территории Швеции – 440 040 км² (26%) и России 314 800 км² (18%) [4, с. 14]. В связи с этим на нашей стране лежит повышенная ответственность за сохранение морской среды Балтийского моря. Основными источниками поступления биогенных элементов в водотоки, и как следствие, в Балтийское море являются сточные воды и рассеянный поверхностный сток. На примере водосборных частных водосборных бассейнов рек Волковки и Охты Санкт-Петербурга рассматривается природоохранная деятельность городских коммунальных служб по уборке территории и деятельность ГУП “Водоканал СПб” по очистке сточных вод.

Цель данного исследования – оценка вклада городских коммунальных служб и ГУП “Водоканал СПб” в снижение поступления общего азота и фосфора в городские реки Волковку и Охту со сточными водами и рассеянным поверхностным стоком с территории их водосборных бассейнов.

КРАТКИЙ ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА СТОКА РЕК УРБАНИЗИРОВАННЫХ ВОДОСБОРОВ

Проблема загрязнения рек урбанизированных территорий актуальна во многих странах. Например, в Европе достаточно подробно исследуется загрязнение рек бассейна реки Дунай [32, с. 11]. По мнению авторов этой работы, выявленная высокая степень загрязнения городских водотоков связана с поступлением канализационного и поверхностного стока с урбанизированных территорий.

Исследование загрязнения рек урбанизированных территорий выполнено учеными Национального автономного университета Мексики. Они пришли к выводу, что: “The river reaches within the urban zone are basically the open-air drainage ditches” (Городские реки представляют из себя сточные каналы под открытым небом, *англ.*) [5, с. 15].

На африканском континенте высокая степень загрязнения рек отмечена в его западной части. Авторы исследования связывают загрязнение водотоков со сбросом неочищенных бытовых вод и с поступлением в реки рассеяно-диффузионного стока с обширных сельскохозяйственных плантаций и городских кварталов [26, с. 9].

В Китае проблема загрязнения городских рек особенно актуальна в связи с высокими темпами развития экономики. Китайские ученые исследовали качество воды в ре-

Таблица 1. Средние концентрации общего азота и фосфора в поверхностном стоке с городских водосборов [29, с. 7]

Table 1. Averaged concentrations of pollutants, nitrogen and phosphorus in surface runoff from urbanized watersheds [29, p. 7]

	США	Германия	Франция	Дания	Финляндия	Малайзия	Иран	Волковка
Общ. азот, мг/л	1.2–1.9	2.4	2.8	1.1	1.8	–	6.7	5.6
Общий фосфор, мг/л	0.3–0.4	0.4	0.8	0.3	0.2	0.4–1.0	0.3	0.4

Таблица 2. Средние концентрации биогенных элементов в поверхностном стоке и сточных водах в США [28, с. 21]

Table 2. Average concentrations of nitrogen and phosphorus in domestic wastewater and storm water in the USA [28, p. 21]

	Поверхностный сток	Бытовые сточные воды
Общ. азот, мг/л	2.6	8.0–12.0
Общий фосфор, мг/л	0.3	2.2–10.0

ке Циньхуай (бассейн р. Янцзы). Установлено увеличение уровня загрязненности вод реки при ее протекании через город Нанкин. Авторы связывают это со сбросом недостаточно очищенных промышленных и коммунально-бытовых вод в реку [33, с. 16].

В Санкт-Петербурге уровень загрязненности реки Волковки был исследован З.Г. Кауровой с соавторами [2, с. 69]. В 2014–2017 гг. по результатам расчетов индекса загрязнения воды (ИЗВ) воды реки Волковки соответствовали IV (“загрязненная”) и V (“грязная”) классам качества. Использование показателя ИЗВ объясняется ограниченным числом определений и усеченной программой исследования. Авторам не удалось установить роль различных факторов в загрязнении реки Волковки.

Широко распространено мнение, что основной вклад в загрязнение городских рек вносит сброс недостаточно очищенных сточных вод и поступающий с водосборной площади загрязненный поверхностный сток. Проблема оценки поступления загрязняющих веществ и биогенных элементов с поверхностным стоком изучена недостаточно в связи с объективными трудностями измерений и расчетов.

В статье ученых из Румынии [29, с. 7] выполнено сравнение результатов собственных исследований концентраций загрязняющих веществ и биогенных элементов в поверхностном стоке на территории Румынии с данными аналогичных исследований в других странах (табл. 1).

Сравнение этих величин со среднегодовыми концентрациями общего азота и фосфора в поверхностном стоке, поступившем в реку Волковку в 2017–2019 гг. по данным ГУП “Водоканал СПб” приведено в табл. 1.

Видно, что среднегодовая концентрация общего азота в поверхностном стоке с водосборного бассейна реки Волковки превышает аналогичные показатели в странах США, Европы и Азии и сопоставима с концентрацией общего азота в поверхностном стоке в Иране.

Среднегодовые концентрации общего фосфора в поверхностном стоке с водосборного бассейна реки Волковки сопоставимы с аналогичными показателями в других странах.

Решение проблемы снижения высокого уровня поступления биогенных элементов (табл. 2) в водные объекты с поверхностным стоком осложняет отсутствие очистки поверхностного рассеянного стока. Это подтверждают отчетные материалы ГУП “Водоканал СПб”.

Несомненно, концентрации загрязняющих веществ и, особенно соединений азота и фосфора в бытовых и промышленных сточных водах на порядок выше, чем в поверхностном рассеянном стоке, поступающем в водные объекты через ливневую канализацию (табл. 2). Но значительно большие объемы поступления поверхностного стока в водные объекты и отсутствие очистки делает этот источник основным в загрязнении водных объектов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Нами разработана и опробована методика определения модулей стока биогенных элементов (общего азота и фосфора) с водосборных бассейнов рек Волковки и Охты Санкт-Петербурга [27, с. 3]. Модуль стока биогенных элементов – это биогенная нагрузка от точечных и неточечных источников загрязнения с единицы площади водосборного бассейна.

Отдельно рассмотрена биогенная нагрузка от:

- 1 – рассредоточенного поверхностного стока;
- 2 – выпусков сточных вод;
- 3 – притоков исследуемых рек.

Для расчетов биогенной нагрузки от рассредоточенного поверхностного стока использована методика ФГУП НИИ “Водгео” для расчетов переноса субстанций с поверхностным стоком [19, с. 27]. С использованием геоинформационной системы ArcGIS и цифровой модели рельефа “ASTER” были определены границы водосборных бассейнов изученных водотоков [31]. Данные ЦМР “ASTER” нами были существенно модифицированы для исключения искажений, вызванных поступлением отраженного радиолокационного сигнала от зданий и сооружений. Для определения соотношения площадей различного хозяйственного использования в границах выделенных водосборных бассейнов нами была выполнена классификация территорий на основании спутниковых снимков Sentinel-2 [31]. Расчеты биогенной нагрузки от рассредоточенного поверхностного стока производились отдельно для следующих компонентов:

- 1 – не собираемого в коллекторы ливневой канализации дождевого стока;
- 2 – не собираемого в коллекторы ливневой канализации талого стока;
- 3 – поливомоечных вод.

Для расчетов использованы данные регулярных гидрохимических наблюдений ГУП “Водоканал СПб” за 2017–2019 гг. о средних концентрациях общего азота и фосфора в поверхностном стоке. Также для расчетов дождевого и талого стока использованы данные ежедневных метеорологических наблюдений за 2017–2019 гг. [11].

Для расчетов поступления общего азота и фосфора с выпусками сточных вод использованы данные отчетов крупнейшего водопользователя Санкт-Петербурга – Государственного унитарного предприятия “Водоканал СПб”. Отчетные документы содержат данные о типе и объемах сбрасываемых сточных вод, концентрациях в них общего азота и фосфора.

Для расчетов поступления общего азота и фосфора с водами притоков использованы данные регулярных гидрохимических наблюдений ГУП “Водоканал СПб” за водными объектами.

В Планах действий по Балтийскому морю (Helcom) приведены нормы среднего поступления азота и фосфора от одного человека, проживающего на урбанизированной территории [6, с. 914; 15, с. 229]. Эти нормы применяются при расчетах производительности проектируемых очистных сооружений. В нашем исследовании эти нормы используются для расчетов поступления азота и фосфора с урбанизированных водосборных бассейнов в предположении отсутствия централизованной системы сбора сточных вод и регулярной уборки территории коммунальными службами. Использо-

Таблица 3. Модули стока общего азота и фосфора с водосборов ряда водных объектов бассейна Балтийского моря
Table 3. The modules of total nitrogen and phosphorus outflow from watersheds of a number of aquatic objects within the Baltic Sea catchment area

Водосбор	Модуль стока		Источник данных
	общего азота	общего фосфора	
	тонн/км ² год	тонн/км ² год	
Река Охта (частный водосбор ниже Ржевского вдхр.)	3.628	0.283	Собственные расчеты
Река Волковка	1.295	0.104	Собственные расчеты
река Ижора	1.100	0.085	[3]
Река Нева (частный водосбор)	0.696	0.144	[6, с. 63]
Малые реки Южного и Северного побережья Финского залива	0.550	0.040	[7, с. 916]
Река Луга	0.349	0.027	[6, с. 63]
Сестрорецкий Разлив	Нет данных	0.020	[8, с. 108]
Максимально допустимые значения для водосбора Финского залива по рекомендации HELCOM	0.236	0.011	[23]
Средние значения по российской части водосбора Финского залива	0.189	0.009	[7, с. 916]
Ладожское озеро	0.143	0.004	[7, с. 916]
река Нарва	0.102	0.004	[7, с. 916]

вание этих норм поступления необходимо для оценки роли ГУП “Водоканал СПб” и коммунальных служб города в сокращении биогенной нагрузки на Балтийское море.

В качестве норм Helcom на одного человека указаны 4.4 кг общего азота и 0.9 кг общего фосфора в год [6, с. 914] (табл. 1). Расчет численности населения водосборных бассейнов выполнен по средней плотности населения и площади водосбора. Средняя плотность населения определена по численностям населения и площадям административных районов Санкт-Петербурга [14]. Если водосборный бассейн расположен на территории нескольких административных районов, то средняя плотность населения рассчитывалась с использованием весовых коэффициентов, отражающих распределение площади водосборного бассейна по административным районам города.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В российской части бассейна Финского залива расположен ряд водосборов. В связи с различиями их площадей для корректного сравнения величин биогенной нагрузки на Финский залив следует использовать модули стока общего азота и фосфора. Модуль стока какого-либо вещества или элемента — это частное от деления его суммарного поступления с водосбора за определенный период времени на площадь водосбора, т.е. удельное поступление вещества/элемента в поверхностные воды с единицы площади водосбора за единицу времени.

Выполнено сравнение модулей стока биогенных элементов (азота и фосфора) с водосборных бассейнов малых городских рек Волковки и Охты с аналогичными модулями, рассчитанными для других водосборов бассейна Финского залива. Модули стока азота и фосфора с водосборов рек Волковки и Охты рассчитаны по результатам собственных исследований, основанных на данных ГУП “Водоканал Санкт-Петербурга” [27, с. 4].

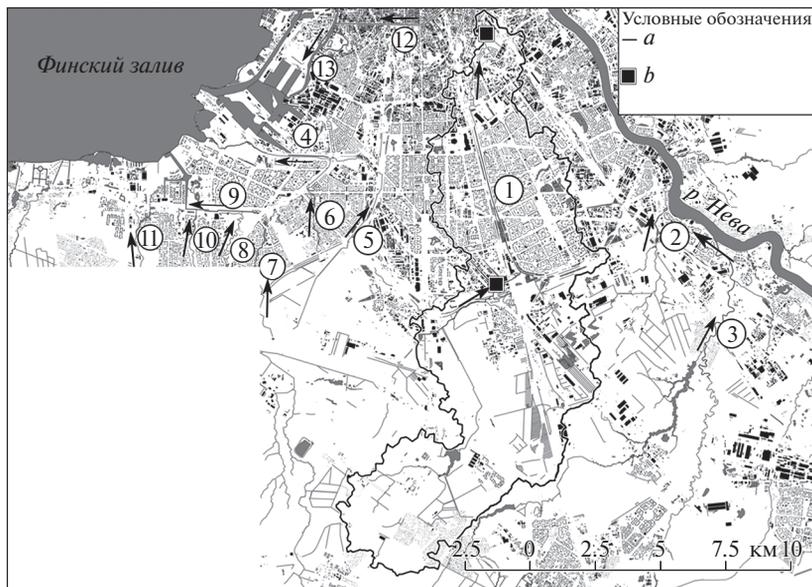


Рис. 1. Граница водосборного бассейна реки Волковки. 1 – р. Волковка; 2 – р. Мурзинка; 3 – р. Славянка; 4 – р. Красненькая; 5 – Лиговский канал; 6 – р. Дачная; 7 – р. Новая; 8 – р. Дудергофка; 9 – Дудергофский канал; 10 – р. Ивановка; 11 – р. Сосновка; 12 – Обводный канал; 13 – р. Екатерингофка; *a* – граница водосборного бассейна р. Волковки; *b* – точки наблюдения за хим. составом р. Волковки ГУП Водоканал СПб.

Fig. 1. Boundaries of the Volkovka River watershed. 1 –Volkovka Riv.; 2 –Murzinka Riv.; 3 –Slavyanka Riv.; 4 –Krasnenkaya Riv.; 5 – Ligovskiy Channel; 6 – Dachnaya Riv.; 7 – Novaya Riv.; 8 – Dudergofka Riv.; 9 – Dudergofskiy Channel; 10 – Ivanovka Riv.; 11 – Sosnovka Riv.; 12 – Obvodny Channel; 13 –Ekateringofka Riv.; *a* –boundaries of the Volkovka River watershed; *b* – observation points.

Поступление общего азота и фосфора с водосборов Ладожского озера, рек Невы, Луги, Нарвы и других водных объектов бассейна Балтийского моря рассчитано в Институте озераедения РАН с помощью модели формирования биогенной нагрузки ILLM [7, с. 917]. Нами рассчитаны модули стока общего азота и фосфора с водосборов ряда водных объектов бассейна Балтийского моря. Результаты представлены в табл. 3.

Во избежание увеличения риска антропогенного эвтрофирования Финского залива средние величины модулей стока биогенных элементов для всего его водосбора не должны превышать 0.011 кг/км^2 в год для общего фосфора и 0.236 кг/км^2 в год для общего азота.

Как видно из табл. 3, модули стока общего азота и фосфора максимальны на частном водосборе реки Охты в ее нижнем течении в пределах Санкт-Петербурга. Здесь модуль стока азота превышает среднее значение этого показателя по всей российской части водосбора Финского залива более чем в 19 раз, а модуль стока фосфора – более чем в 31 раз.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Вероятно, причиной высоких значений модулей стока для водосбора реки Охты (табл. 3) является высокая доля застроенной и заасфальтированной территории водосбора, которая превышает 50% его площади. В реку Охту сбрасываются сточные воды общесплавной канализации.

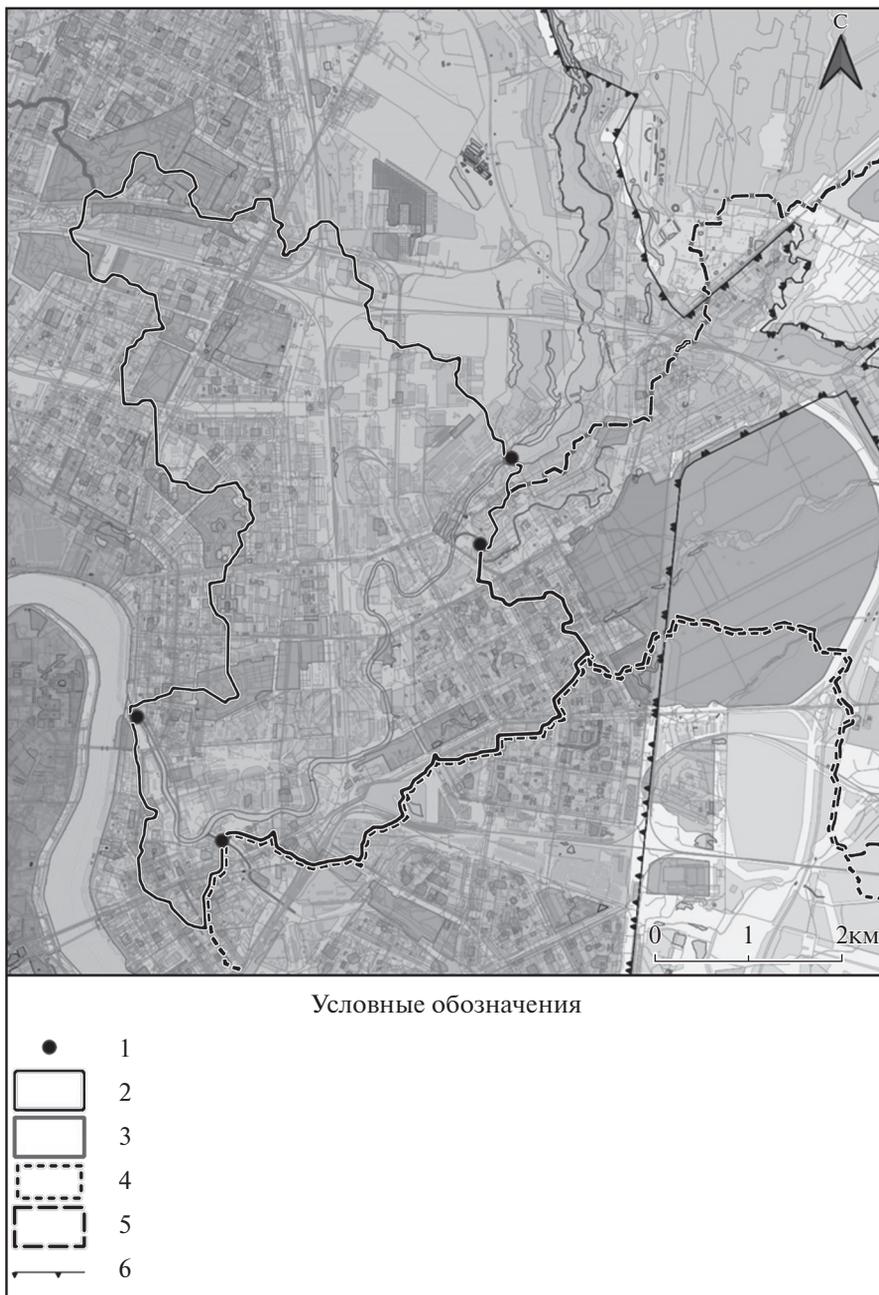


Рис. 2. Граница исследованного частного водосборного бассейна реки Охты. 1 – точки наблюдения за химическим составом р. Охты и ее притоков ГУП Водоканал СПб; 2 – граница изучаемого фрагмента водосборного бассейна р. Охты; 3 – водосборный бассейн р. Охты; 4 – водосборный бассейн р. Оккервиль; 5 – водосборный бассейн р. Лубья; 6 – административная граница Санкт-Петербурга.

Fig. 2. Boundaries of the Okhta River watershed. 1 – observation points; 2 – the considered part of the Okhta River drainage basin; 3 – the Okhta River drainage basin; 4 – the Okkervil River drainage basin; 5 – the Lubiya River drainage basin; 6 – administrative border of Saint Petersburg.

Модуль стока общего азота с водосбора реки Волковки в 6.9 раз превышает аналогичный средний показатель для российской части водосбора Финского залива, а модуль стока общего фосфора – в 11.6 раз. Таким образом, поступление азота и фосфора с городских водосборов является очень серьезной причиной антропогенного эвтрофирования.

Границы исследованных объектов: водосборного бассейна реки Волковки и частного водосбора реки Охты показаны на рис. 1 и 2.

Также необходимо отметить высокие значения модулей стока азота и фосфора с водосборов малых рек южного и северного побережий Финского залива. На этих реках отсутствуют створы регулярных наблюдений Росгидромета. Значения модулей стока для их водосборов были определены в Институте озераведения РАН с использованием модели ILLM [7, с. 913]. Вероятно, причиной высоких значений модулей является высокая доля селитебных территорий, в том числе городского типа.

Сравнимые с водосбором реки Волковки значения модулей стока азота и фосфора выявлены на водосборе реки Ижоры, являющейся левым притоком реки Невы. Ее водосборный бассейн расположен южнее водосборного бассейна реки Волковки. Как и в случае водосбора реки Волковки, значительная часть водосбора реки Ижоры занята открытыми участками, поросшими травянистой растительностью. На берегах реки Ижоры много населенных пунктов, самым крупным из которых является город Колпино. Сходство особенностей строения водосборных бассейнов рек Волковки и Ижоры объясняет близкие значения модулей стока азота и фосфора.

Модули стока азота и фосфора с водосборов, на водотоках которых отсутствуют наблюдения за гидрохимическим составом вод, по результатам расчетов оказались в несколько раз больше, чем средние значения модулей стока азота и фосфора со всего водосбора Финского залива. Необходимо подчеркнуть, что эти водосборные бассейны не учитываются при оценке суммарного поступления азота и фосфора в Финский залив.

В соответствии с исследованиями Института озераведения РАН, с территории Российской Федерации поступает немногим более 60% от общей нагрузки азота и фосфора на Финский залив. При этом территория РФ занимает около 80% водосборного бассейна Финского залива [7, с. 917].

Как видно из табл. 3, значения модулей стока азота и фосфора с водосборов рек Волковки и Охты превышают эти значения, определенные на основании максимально допустимой нагрузки в соответствии с Планом действий по Балтийскому морю (HELCOM). Эти значения также превышают модули стока азота и фосфора с водосборов малых рек, расположенных на южном и северном побережье Финского залива, частично в пределах Санкт-Петербурга. Модули стока азота и фосфора с частного водосбора Невы и водосбора Ижоры также превышают значения модулей, определенных для российской части водосбора Финского залива в соответствии с предельно допустимой биогенной нагрузкой по документам HELCOM. Аналогично модули стока азота и фосфора с водосбора реки Луги превышают величины, соответствующие предельно допустимой биогенной нагрузке на экосистему Финского залива. Водосборный бассейн Луги отличается высокой степенью урбанизации и заселенности, включая дачные поселки и садоводства.

Таким образом, увеличение доли урбанизированных территорий на водосборе Балтийского моря увеличивает риск антропогенного эвтрофирования его экосистемы. При этом необходимо отметить, что средние модули стока азота и фосфора с водосборного бассейна российской части Финского залива не превышают значений, определенных на основании установленных HELCOM максимально допустимых нагрузок.

Разумеется, с водосборных бассейнов рек Волковки и Охты поступает большое количество соединений азота и фосфора. На замыкающем створе Волковки не проводится мониторинг содержания соединений азота и фосфора в речном стоке. Но сток

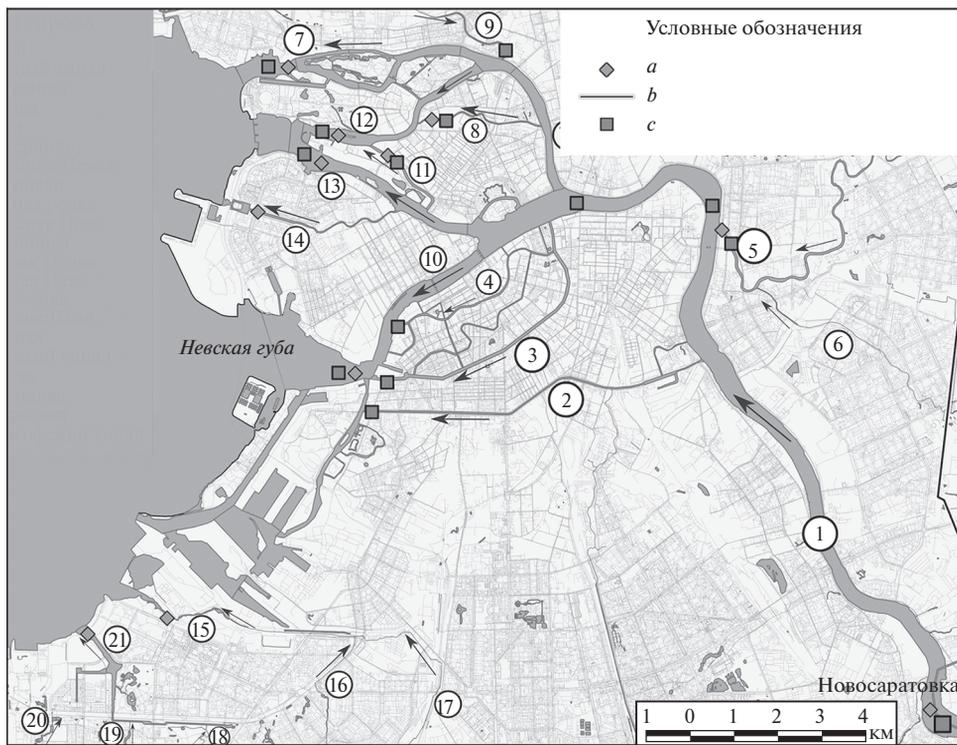


Рис. 3. Створы мониторинга химического состава рек Санкт-Петербурга Северо-Западного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и ГУП “Водоканал СПб”. 1 – р. Нева; 2 – Обводный канал; 3 – р. Фонтанка; 4 – р. Мойка; 5 – р. Охта; 6 – р. Оккервиль; 7 – р. Большая Нева; 8 – р. Карповка; 9 – р. Черная речка; 10 – р. Большая Нева; 11 – р. Ждановка; 12 – р. Малая Нева; 13 – р. Малая Нева; 14 – р. Смоленка; 15 – р. Красненская; 16 – р. Дачная; 17 – Лиговский канал; 18 – р. Новая; 19 – р. Ивановка; 20 – р. Сосновка; 21 – Дудергофский канал; a – станции отбора проб ГУП ЭВодоканал СПбЭ; b – Административная граница Санкт-Петербурга; c – станции отбора проб Северо-Западного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Fig. 3. Monitoring points on the rivers of Saint Petersburg. Observations are carried out by the North-Western Department for Hydrometeorology and Environmental Monitoring and the state unitary enterprise “Vodokanal of Saint Petersburg”. 1 – Neva Riv.; 2 – Obvodny Channel; 3 – Fontanka Riv.; 4 – Moika Riv.; 5 – Okhta Riv.; 6 – Okkervil Riv.; 7 – Bolshaya Nevka Riv.; 8 – Karpovka Riv.; 9 – Chernaya Rechka Riv.; 10 – Bolshaya Neva Riv.; 11 – Zhdanovka Riv.; 12 – Malaya Nevka Riv.; 13 – Malaya Neva Riv.; 14 – Smolenka Riv.; 15 – Krasnenkaya Riv.; 16 – Dachnaya Riv.; 17 – Ligovskiy Channel; 18 – Novaya Riv.; 19 – Ivanovka Riv.; 20 – Sosnovka Riv.; 21 – Dudergofskiy Channel; a – monitoring points of the SUE “Vodokanal of Saint Petersburg”; b – administrative border of Saint Petersburg; c – monitoring points of the North-Western Department for Hydrometeorology and Environmental Monitoring and the SUE “Vodokanal of Saint Petersburg”.

Волковки поступает в Обводный канал, на замыкающем створе которого мониторинг выполняется, поэтому биогенный сток Волковки также учитывается.

Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу (СЗУГМС) проводит оценку поступления биогенных элементов в Финский залив с российской части водосбора. На рис. 3 представлены створы мониторинга. Однако не все впадающие в Невскую губу и Финский залив водотоки Санкт-Петербурга охвачены сетью мониторинга СЗУГМС. В юго-западной части Санкт-Петербурга такими водотоками являются река Красненская и Дудергофский канал. На их замыкающих створах отсут-

Таблица 4. Плотность населения на водосборных бассейнах рек Волковки и Охты
Table 4. Population in the catchment area of Volkovka and Okhta Rivers

	р. Волковка	р. Охта
Численность населения на водосборном бассейне (в тысячах человек)	Около 522.5	Около 140.8
Средняя плотность населения на водосборных бассейнах (человек/км ²)	Около 5360	Около 6260

Таблица 5. Значения модулей стока биогенных элементов с водосборных бассейнов рек Волковки и Охты

Table 5. Values of the runoff modules from the catchment areas of the Volkovka and Okhta Rivers

	р. Волковка		р. Охта	
	общ. азот	общ. фосфор	общ. азот	общ. фосфор
Уровень биогенной нагрузки в расчете на одного жителя (Nelcom), кг/человека	4.4	0.9	4.4	0.9
Расчетные модули стока в соответствии с численностью населения и нормой Nelcom, т/км ²	23.5	4.8	27.5	5.6
Модули стока, основанные на данных “Водоканал СПб”, т/км ²	1.295	0.104	3.628	0.283

ствуют створы мониторинга СЗУГМС, но есть створы мониторинга ГУП “Водоканал СПб”. Однако, данные ГУП “Водоканал СПб” не используются для официальной оценки поступления биогенных элементов с российской территории Балтийского моря. Очевидно, что невозможно проводить гидрохимический мониторинг каждого водотока впадающего в Финский залив.

Следовательно, в российской части водосбора Финского залива есть водосборы, поступление азота и фосфора с которых не учитывается при оценке суммарного поступления этих биогенных элементов. Поэтому определенные для водосборов Волковки и Охты модули стока азота и фосфора позволят учитывать поступление азота и фосфора с таких неучтенных урбанизированных водосборов. Также полученные нами модули стока с водосборных бассейнов р. Волковки и Охты могут быть использованы для совершенствования системы мониторинга поступления азота и фосфора в Балтийское море с урбанизированных территорий Калининградской области.

В соответствии с актуальными данными Росстата численность населения водосборного бассейна реки Волковки приблизительно равна 522.5 тысячам человек, а численность населения, проживающего на исследованном участке водосборного бассейна реки Охты, составляет около 140 тысяч человек [14]. Площадь исследованного участка водосборного бассейна реки Охты в 5 раз меньше, чем водосбор реки Волковки (22.5 и 97.5 км²). Плотность населения на исследованном участке водосбора Охты незначительно выше, чем на водосборе Волковки (табл. 4).

В табл. 5 представлены рассчитанные модули стока азота и фосфора с исследованных водосборов Волковки и Охты. Видно, что значения этих модулей превышают величины, определенные в соответствии с максимально допустимой нагрузкой по “Плану действий по Балтийскому морю (Nelcom)”. Для рек Волковки и Охты нормы превышены в 6 и 15 раз для общего азота и в 10 и 26 раз для общего фосфора, соответственно. Очевидно, что увеличение доли урбанизированных территорий на водосборе Балтийского моря увеличивает риск антропогенного эвтрофирования его экосистемы.

Необходимо отметить, что высокий уровень поступления азота и фосфора в реку Волковку определяется поступлением этих элементов в составе распределенного поверхностного стока с ее водосборного бассейна. Все бытовые и промышленные воды,

Таблица 6. Типы подстилающей поверхности на водосборных бассейнах рек Волковки и Охты
Table 6. Types of underlying surface in the catchment basins of the Volkovka and Okhta Rivers

Тип подстилающей поверхности	Доля водосбора, %		Коэффициент стока (Ψ_d)
	р. Охта	р. Волковка	
Травяная растительность	10	49	0.1
Открытые грунтовые участки	21	20	0.2
Асфальтовые поверхности	45	13	0.7
Крыши зданий	15	8	0.5
Зеленые зоны (парки, скверы)	9	10	0.2
Водные поверхности	2	<1	

образующиеся на водосборном бассейне реки Волковки, поступают в канализационные коллекторы ГУП “Водоканал” и проходят очистку. На водосборе реки Охты модули стока азота и фосфора значительно выше, чем на водосборе реки Волковки. Вероятно, это объясняется двумя основными причинами:

1. В отличие от Волковки в Охту бытовые сточные воды в 2019 году сбрасывались без очистки.

2. На исследованном участке водосборного бассейна Охты по сравнению с водосбором Волковки выше доля заасфальтированных поверхностей и застроенной территории (табл. 6).

Исследованный участок водосбора Охты в ее самом нижнем течении отличается от водосбора Волковки большей степенью застройки, т.к. на водосборе Волковки велика доля бывших территорий сельскохозяйственного назначения, ныне заброшенных (табл. 6).

На основании норм Helsom биогенная нагрузка на реку Волковку при отсутствии природоохранных мероприятий может составлять около 4.8 т/км² общего фосфора и 23.5 т/км² общего азота в год. В реальности биогенная нагрузка на реку Волковку меньше в 18 раз по общему азоту и в 45 раз меньше по общему фосфору. Для реки Охты наблюдается схожая картина. Актуальное поступление общего азота с частного водосбора Охты в 8 раз меньше теоретического при отсутствии природоохранных мер, а по общему фосфору выявлено двадцатикратное снижение потенциально возможной нагрузки.

Таким образом, биогенная нагрузка на эти городские реки хотя и является высокой, но благодаря сбору и обработке бытовых и промышленных сточных вод ГУП “Водоканал СПб”, а также работе коммунальных служб она значительно ниже, чем могла бы быть.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Модули стока общего азота и фосфора с водосборов рек Волковки и Охты в Санкт-Петербурге превышают значения, рассчитанные на основании предельно допустимых нагрузок на экосистему Финского залива в соответствии с решениями Helsom.

2. Средние модули стока азота и фосфора с российской части водосбора Финского залива не превышают значений, рассчитанных на основании предельно допустимых нагрузок на экосистему Финского залива в соответствии с решениями HELCOM.

3. Модули стока азота и фосфора с урбанизированных водосборных бассейнов в несколько раз превышают модули, определенные в соответствии с предельно допустимыми нагрузками по документам HELCOM.

4. Урбанизация водосборного бассейна Балтийского моря, особенно его прибрежной полосы, увеличивает риск антропогенного эвтрофирования его экосистемы.

5. Отсутствие мониторинга экологического состояния ряда малых рек побережья Финского залива затрудняет оценку поступления азота и фосфора в Балтийское море с его водосбора.

6. Благодаря работе ГУП “Водоканал СПб” и коммунальных служб города поступление общего азота и фосфора в реку Волковку сокращено соответственно в 18 и 45 раз по сравнению с потенциально возможным при отсутствии природоохранных мероприятий. Для частного урбанизированного водосбора реки Охты в ее нижнем течении аналогичное сокращение поступления общего азота составляет 8 раз, а общего фосфора – 20.

7. Результаты нашего исследования полностью подтверждают высокий статус природоохранного предприятия ГУП “Водоканал СПб”.

8. Результаты наших исследований могут использоваться для расчетов биогенной нагрузки с урбанизированных водосборов с различной плотностью населения и разным уровнем сбора бытовых сточных вод в общесплавную канализацию.

9. Результаты наших исследований могут быть использованы при составлении Россией отчетов для Хельсинской комиссии по защите морской среды Балтийского моря.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ, номер проекта 19-05-00683.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алябина Г.А., Сорокин И.Н. Особенности формирования биогенной нагрузки на водные объекты с урбанизированных ландшафтов // Известия РГО. 2001. Т. 133. вып. 1. С. 81–87.
2. Бойко Н.А., Каурова З.Г. Гидрохимический состав р. Волковка в 2015–2017 годах // Молодой исследователь: материалы XLVI межд. научно-практич. конференции. 2017. Т. 21. вып. 46. С. 64–69.
3. Ершова А.А. Комплексная оценка поступления биогенных веществ с водосбора реки Невы в восточную часть Финского залива // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук, РГГМУ [2013] URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22342854/> (дата обращения: 8.04.2022).
4. Клемещев А.П., Корнеевец В.С., Пальмовский Т., Студжиницки Т., Фёдоров Г.М. Подходы к определению понятия “Балтийский регион” // Балтийский регион. 2017. Т. 9. вып. 4. С. 7–28.
5. Клубов С.М., Третьяков В.Ю. Оценка загрязненности вод рек Санкт-Петербурга с использованием отчетных материалов ГУП “Водоканал Санкт-Петербурга” // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2019. Т. 5. вып. 3. С. 160–174.
6. Кондратьев С.А. Оценка биогенной нагрузки на Финский залив Балтийского моря с российской части водосбора // Водные ресурсы, 2011. Т. 38. вып. 1. С. 56–64.
7. Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Викторова Н.В., Уличев В.И. Фосфорная нагрузка на Финский залив с прибрежной территории России // Вестник РАН. 2014. Т. 84. вып. 10. С. 913–919.
8. Кондратьев С.А., Брюханов А.Ю., Терехов А.В. Структура поверхности водосбора как определяющий фактор биогенной нагрузки на водоем (по данным математического моделирования) // Вопросы географии РГО. 2018. Т. 145. С. 89–108.
9. Лозовик П.А., Бородулина Г.С., Карпечко Ю.В., Кондратьев С.А., Литвиненко А.В., Литвинова И.А. Биогенная нагрузка на Онежское озеро по данным натурных наблюдений // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. Т. 5. С. 35–52.
10. Михайлов С.А. Диффузное загрязнение водных экосистем. Методы оценки и математические модели: Аналитический обзор. Барнаул: Изд-во День, 2000. 130 с.
11. Погода и климат: Сайт. [2021]. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=26063/> (дата обращения: 15.08.2021).
12. Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А. Формирование биогенной нагрузки на Балтийское море с Российской территории и возможности ее снижения в соответствии с требованиями плана действий Хелком // Региональная экология. 2017. Т. 1. вып. 47. С. 65–73.
13. Сайт Северо-Западного межрегионального управления Росприроднадзора [2022]. URL: <https://rpn.gov.ru/regions/78/intro/> (дата обращения: 17.08.2022).
14. Сайт федеральной службы государственной статистики РФ [2021]. URL: <http://www.gks.ru/> (дата обращения: 27.03.2021).

15. *Серебрицкий И.А., Григорьев И.А.* Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге. СПб: Сезам-принт, 2018. 448 с.
16. *Фёдоров Г.М., Михайлов А.С., Кузнецова Т.Ю.* Влияние моря на развитие экономики и расселения стран Балтийского региона // Балтийский регион. 2017. Т. 9. вып. 2. С. 7–27.
17. *Фрумин Г.Т., Гильдеева И.М.* Эвтрофирование водоемов — глобальная экологическая проблема // Экологическая химия. 2013. Т. 22. вып. 4. С. 191–197.
18. *Фрумин Г.Т., Каретникова Т.И.* Динамика поступления биогенных элементов в Финский залив со стоком российских и трансграничных рек // Региональная экология. 2017. Т. 1. вып. 47. С. 85–92
19. *Швецов В.Н.* Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с селитебных территорий. М.: Издательство ВСТ. 2006. 57 с.
20. *Янин Е.П.* Общие условия и основные факторы формирования водного стока в городских ландшафтах // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2006. Т. 9. С. 73–111.
21. *Butler D., Dignan C., Makropoulos C. and Davies J.W.* Urban Drainage. 4th ed. London: CRC Press. 2018. 592 p.
<https://doi.org/10.1201/9781351174305>
22. *Caro-Borrero A., Carmona Jiménez J. and Mazari Hiriart M.* Evaluation of Ecological Quality in Peri-Urban Rivers in Mexico City // Proceedings of the 6th Nat. Congress of Limnology. 2016. V. 75. № 1. P. 1–16.
<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2015.02.008>
23. Helcom Baltic Sea Action Plan [2022]. URL: <https://helcom.fi/baltic-sea-action-plan/> (дата обращения: 04.04.2022).
24. *Janke B.D., Finlay Jacques C., Hobbie S.E., Baker L.A., Sterner R.W., Nidzgorski D. and Wilson B.N.* Contrasting influences of stormflow and baseflow pathways on nitrogen and phosphorus export from an urban watershed // Biogeochemistry. 2014. V. 121 № 1. P. 209–228.
<https://doi.org/10.1007/s10533-013-9926-1>
25. *Jolankai G.* Modelling of non-point source pollution // Ecological Modelling in Environmental Management. 1986. V. 5. P. 283–285.
26. *Kabore I., Moog O., Oueda A. and Sendzimir J.* Developing reference criteria for the ecological status West-African rivers // Environment Monitoring and Assessment. 2018. V. 190. № 2. P. 1–17.
<https://doi.org/10.1007/s10661-017-6360-1>
27. *Klubov S.M., Tretyakov V.Yu.* Influence of St. Petersburg urban rivers on the inflow of pollutants into the Baltic Sea // E3S Web of Conferences. 2020. V. 163. P. 1–5.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016303006>
28. *Marsalek J.* Evolution of urban drainage from cloaca maxima to environmental sustainability // Proceedings I Nat. conf. of urban sanitary engineering. 2005. P. 1–22.
29. *Radulescu D., Racoviteanu G. and Swamikannu X.* Comparison of urban residential storm water runoff quality in Bucharest with int. data // E3S Web of Conferences. 2018. V. 85. P. 1–9.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20188507019>
30. *Rekolainen S.* Phosphorus and nitrogen load from forest and agricultural areas in Finland // Aqua Fennica. 1989. V. 19. P. 95–107.
31. US Geological Survey website. [2021]. URL: <http://www.Earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 7.04.2021).
32. *Zaharia L., Ioana-Toroimac G., Cocos O., Ghiță F. A. and Mailat E.* Urban. effects on the river systems in the Bucharest City region // Ecosystem Health and Sustainability. 2016. V. 2. P. 1–19.
<https://doi.org/10.1002/ehs2.1247>
33. *Zhiyi L.* (2015), Analysis on Pollution Factors of Urban River // Journal of Geoscience and Environment Protection. 2015. V. 3. P. 9–16.
<https://doi.org/10.4236/gep.2015.310002>

Evaluation of the Sanitary Engineering Activity Contribution in the Decrease of Specific Nutrient Yield into the Baltic Sea from the Volkovka and Okhta Rivers Watersheds of St. Petersburg

S. M. Klubov^{1, 2, *}, V. Yu. Tretyakov^{1, 3, **}, V. V. Dmitriev^{3, ***}, and I. O. Rozhkova^{3, ****}

¹Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia

²State Budgetary Institution of Additional Education, Palace of Child Youth Art “At the Voznesensky Bridge” of the Admiralteyskiy District, Saint-Petersburg, Russia

³Saint Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

*E-mail: klubov_stepan@mail.ru

**E-mail: v_yu_tretyakov@mail.ru

***E-mail: vasilij-dmitriev@rambler.ru

****E-mail: juliarozhkova21@gmail.com

Abstract—Overabundant specific nutrient yield into the Baltic Sea results in its anthropogenic eutrophication. The Baltic Sea watershed countries including Russia aim to coordinate

actions for protection of the sea marine environment. There is the environment protection committee (Helcom). The specific nutrient yields from watersheds of the Volkovka and Okhta Rivers of St. Petersburg were evaluated with usage of our methods. The specific nutrient yields were compared with ones calculated on the base of the numbers of inhabitants within the watersheds according to the Helcom methods. The research demonstrates that activity of the sanitary engineering and the state unitary enterprise (SUE) “Vodokanal of St. Petersburg” reduces nutrient load on the Baltic Sea from the watersheds in 19–45 times for total phosphorus and in 7–20 times for total nitrogen. The SUE “Vodokanal of St. Petersburg” is a conservational enterprise focused on the Baltic Sea environment protection.

Keywords: the Baltic Sea, eutrophication, specific nutrient yield

REFERENCES

1. Alyabina G.A., Sorokin I.N. Osobennosti formirovaniya biogennoj nagruzki na vodnye ob'ekty s urbanizirovannyh landshaftov // *Izvestiya RGO*. 2001. T. 133, vyp. 1. S. 81–87.
2. Bojko N.A., Kaurova Z.G. Gidroximicheskij sostav r. Volkovka v 2015–2017 godax // *Molodoj issledovatel': materialy XLVI mezhd. nauchno-praktich. konferencii*. 2017. T. 21, vyp. 46. S. 64–69.
3. Ershova A.A. Kompleksnaya ocenka postupleniya biogenykh veshhestv s vodosbora reki Nevy v vostochnuyu chast' Finskogo zaliva // *Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata geograficheskix nauk, RGGMU* [2013] URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22342854/> (data obrashheniya: 8.04.2022).
4. Klemeshhev A.P., Korneev V.S., Pal'movskij T., Studzhniczkij T., Fyodorov G.M. Podhody k opredeleniyu ponyatiya “Baltijskij region” // *Baltijskij region*. 2017. T. 9, vyp. 4. S. 7–28.
5. Klubov S.M., Tret'yakov V.Yu. Ocenka zagryaznyonosti vod rek Sankt-Peterburga s ispol'zovaniem otchetnykh materialov GUP “Vodokanal Sankt-Peterburga” // *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. 2019. T. 5, vyp. 3. S. 160–174.
6. Kondrat'ev S.A. Ocenka biogennoj nagruzki na Finskij zaliv Baltijskogo morya s rossijskoj chasti vodosbora // *Vodnye resursy*, 2011. T. 38, vyp. 1. S. 56–64.
7. Kondrat'ev S.A., Shmakova M.V., Viktorova N.V., Ulichev V.I. Fosfornaya nagruzka na Finskij zaliv s pribrezhnoj territorii Rossii // *Vestnik RAN*. 2014. T. 84, vyp. 10. S. 913–919.
8. Kondrat'ev S.A., Bryuxanov A.Yu., Terexov A.V., Struktura poverxnosti vodosbora kak opredelyayushhij faktor biogennoj nagruzki na vodoyom (po dannym matematicheskogo modelirovaniya) // *Voprosy geografii RGO*. 2018. T. 145. S. 89–108.
9. Lozovik P.A., Borodulina G.S., Karpechko Yu.V., Kondrat'ev S.A., Litvinenko A.V., Litvinova I.A., Biogennaya nagruzka na Onezhskoe ozero po dannym naturnykh nablyudenij // *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN*. 2016. T. 5. S. 35–52.
10. Mixajlov S.A. Diffuznoe zagryaznenie vodnykh ekosistem. Metody ocenki i matematicheskie modeli: Analiticheskij obzor. Barnaul: Izd-vo Den', 2000. 130 s.
11. Pogoda i klimat: Sajt. [2021]. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=26063/> (data obrashheniya: 15.08.2021).
12. Pozdnyakov Sh.R., Kondrat'ev S.A. Formirovanie biogennoj nagruzki na Baltijskoe more s Rossijskoj territorii i vozmozhnosti ee snizheniya v sootvetstvii s trebovaniyami plana dejstvij Xelkom // *Regional'naya ekologiya*. 2017. T. 1, vyp. 47. S. 65–73.
13. Sajt Severo-Zapadnogo mezhhregional'nogo upravleniya Rosprirodnadzora [2022]. URL: <https://rpn.gov.ru/regions/78/intro/> (data obrashheniya: 17.08.2022)
14. Sajt federal'noj sluzhby gosudarstvennoj statistiki RF [2021]. URL: <http://www.gks.ru/> (data obrashheniya: 27.03.2021).
15. Serebriczkiy I.A., Grigor'ev I.A. Oхрана okruzhayushhej sredy, prirodopol'zovanie i obespechenie ekologicheskoy bezopasnosti v Sankt-Peterburge. SPb: Sezam-print, 2018. 448 s.
16. Fyodorov G.M., Mixajlov A.S., Kuznecova T.Yu. Vliyanie morya na razvitie ekonomiki i rasseleniya stran Baltijskogo regiona // *Baltijskij region*. 2017. T. 9, vyp. 2. S. 7–27.
17. Frumin G.T., Gil'deeva I.M. E'vtrofirovaniye vodoemov — global'naya ekologicheskaya problema // *Ekologicheskaya ximiya*. 2013. T. 22, vyp. 4. S. 191–197.
18. Frumin G.T., Karetnikova T.I. Dinamika postupleniya biogenykh elementov v Finskij zaliv so stokom rossijskix i transgranichnykh rek // *Regional'naya ekologiya*. 2017. T. 1, vyp. 47. S. 85–92.
19. Shveczov V.N. Rekomendacii po raschetu sistem sbora, otvedeniya i ochistki poverxnostnogo stoka s selitebnykh territorij. M.: Izdatel'stvo VST. 2006. 57 s.
20. Yanin E.P. Obshhie usloviya i osnovnye faktory formirovaniya vodnogo stoka v gorodskih landshaftah // *Problemy okruzhayushhej sredy i prirodnykh resursov*. 2006. T. 9. S. 73–111.

21. Butler D., Digman C., Makropoulos C. and Davies J.W. *Urban Drainage*. 4th ed. London: CRC Press. 2018. 592 p.
<https://doi.org/10.1201/9781351174305>
22. Caro-Borrero A., Carmona Jiménez J. and Mazari Hiriart M. Evaluation of Ecological Quality in Peri-Urban Rivers in Mexico City // *Proceedings of the 6th Nat. Congress of Limnology*. 2016. V. 75. № 1. P. 1 – 16.
<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2015.02.008>
23. Helcom Baltic Sea Action Plan [2022]. URL: <https://helcom.fi/baltic-sea-action-plan/> (дата обращения: 04.04.2022)
24. Janke B.D., Finlay Jacques C., Hobbie S.E., Baker L.A., Sterner R.W., Nidzgorski D. and Wilson B.N. Contrasting influences of stormflow and baseflow pathways on nitrogen and phosphorus export from an urban watershed // *Biogeochemistry*. 2014. V. 121 № 1. P. 209–228.
<https://doi.org/10.1007/s10533-013-9926-1>
25. Jolankai G. Modelling of non-point source pollution // *Ecological Modelling in Environmental Management*. 1986. V. 5. P. 283–285.
26. Kabore I., Moog O., Oueda A. and Sendzimir J. Developing reference criteria for the ecological status West-African rivers // *Environment Monitoring and Assessment*. 2018. V. 190. № 2. P. 1–17.
<https://doi.org/10.1007/s10661-017-6360-1>
27. Klubov S.M., Tretyakov V.Yu. Influence of St. Petersburg urban rivers on the inflow of pollutants into the Baltic Sea // *E3S Web of Conferences*. 2020. V. 163. P. 1–5.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016303006>
28. Marsalek J. Evolution of urban drainage from cloaca maxima to environmental sustainability // *Proceedings I Nat. conf. of urban sanitary engineering*. 2005. P. 1–22.
29. Radulescu D., Racoviteanu G. and Swamikannu X. Comparison of urban residential storm water runoff quality in Bucharest with int. data // *E3S Web of Conferences*. 2018. V. 85. P. 1–9.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198507019>
30. Rekolainen S. Phosphorus and nitrogen load from forest and agricultural areas in Finland // *Aqua Fennica*. 1989. V. 19. P. 95–107.
31. US Geological Survey website. [2021]. URL: <http://www.Earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 7.04.2021)
32. Zaharia L., Ioana-Toroimac G., Cocos O., Ghiță F.A. and Mailat E. Urban. effects on the river systems in the Bucharest City region // *Ecosystem Health and Sustainability*. 2016. V. 2. P. 1–19.
<https://doi.org/10.1002/ehs2.1247>
33. Zhiyi L. (2015), Analysis on Pollution Factors of Urban River // *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 2015. V. 3. P. 9–16.
<http://dx.doi.org/10.4236/gep.2015.310002>

К ОЦЕНКЕ ВОЗМОЖНОГО ВЛИЯНИЯ МАТЕРИКОВОГО СТОКА НА ГИБЕЛЬ ГИДРОБИОНТОВ В АВАЧИНСКОМ ЗАЛИВЕ ТИХОГО ОКЕАНА (КАМЧАТКА)

© 2022 г. С. Р. Чалов^{a, b}, А. С. Цыпленков^{a, *}, Д. И. Школьный^a,
К. Н. Прокопьева^a, Е. И. Бахарева^a

^aМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^bВсероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии,
Москва, Россия

*E-mail: atsyplenkov@geogr.msu.ru

Поступила в редакцию 16.06.2022 г.

После доработки 13.07.2022 г.

Принята к публикации 28.07.2022 г.

В сентябре 2020 года в Авачинском заливе Тихого океана наблюдалась массовая гибель гидробионтов. В данной работе анализируется возможная роль материкового стока в формировании этого явления. По данным реанализа GloFAS-ERA5 проведена оценка водного режима исследуемых рек, для определения путей миграции взвесей использован метод “фингерпринтинга”, методами дешифрирования шлейфов мутности по космическим снимкам Landsat и Sentinel-2 выполнено определение выноса взвесей в Тихий океан со стоком р. Налычева. Выявлена роль эрозийных процессов в формировании стока наносов со склонов вулканов Авачинский, Жупановский и Купол. Особое внимание в работе уделено последствиям схода лахара на склонах Жупановского вулкана, произошедшего в 2015 году. Сделан вывод о кратковременном (в течение одного года) воздействии этого события на сток наносов в устье р. Налычева.

Ключевые слова: Камчатка, сток наносов, сток растворенных веществ, красные приливы, гидробионты, природная катастрофа

DOI: 10.31857/S0869607122040048

1. ВВЕДЕНИЕ

В сентябре 2020 года в Авачинском заливе Тихого океана наблюдалась массовая гибель морских организмов [46, 47]. В целом в научном сообществе основной причиной этого признаны “красные приливы” [20, 40, 41].

Однако в качестве возможных дополнительных воздействий на акваторию океана по-прежнему рассматривались либо загрязнения с каких-либо из объектов Вооруженных Сил РФ, распространенных в этом районе, либо сброс ядохимикатов с Козельского полигона, а также проявления вулканической деятельности. Возможная роль последних связана с тем, что территория водосбора представляет собой обширную геохимическую аномалию. Здесь в результате размыва рыхлых пирокластических отложений, выщелачивания эффузивных пород, растворения тонкодисперсных пеплов, поступления термальных растворов в реки попадают токсичные элементы. В реках ранее повсеместно регистрировались повышенные концентрации нескольких неспецифических токсикантов [2, 3], среди которых медь, цинк, молибден, ванадий (тяжелые металлы), а также алюминий, сера и селен. Кроме того, современные экстремальные

проявления вулканической деятельности, в частности, – обвал стенки конуса Жупановского вулкана [43], произошедший в 2015 году и приведший к формированию серии лахаров, определили актуальность рассмотрения возможного влияния природных и антропогенных процессов на водосборе на состояние экосистемы Авачинского залива.

Учитывая преобладающую роль в миграции химических элементов и соединений речных наносов [6], а также высокую эрозионную опасность территории [44], материковый сток является наиболее вероятным агентом влияния процессов на водосборе на экосистему океана. Целью данной работы является количественная оценка поступления наносов и нерастворенных форм химических соединений в водотоки территории водосбора Авачинского залива и далее в Авачинский залив Тихого океана. Для решения этой цели в работе исследуется водный сток – притоков Авачинского залива (1); дается оценка путей миграции взвешенных наносов в пределах водосбора (2); анализируются масштабы формирования лахара на склонах Жупановского вулкана и его влияние на шлейфы мутности в устье крупнейшего водотока территории – р. Налычева (3). В основу исследования положены подходы, связанные с количественной оценкой доставки наносов [35] и методами оценки их перемещения по русловой сети. Использовано сочетание численных и дистанционных методов анализа [10, 11, 34], методов полевых исследований [9, 25, 26]. Для определения путей миграции взвесей использован метод “отпечатка пальцев” (*fingerprinting*, далее “фингерпринтинг”) [36]. Фактический анализ поступления взвесей и химических элементов и соединений в акваторию Авачинского залива выполнен с использованием данных реанализа, а также методов дешифрирования шлейфов мутности по космическим снимкам Landsat и Sentinel-2 [7].

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЕГО ИЗУЧЕННОСТЬ

Район гибели водных организмов, протяженностью около 40 километров [46], охватил прибрежную зону Авачинского залива от мыса Налычева до Авачинской бухты (рис. 1). В исследуемый участок Авачинского залива впадает шесть рек и ручьев: р. Халатырка, р. Таенка, р. Половинка, р. Котельная и р. Налычева. Здесь отсутствуют действующие гидрологические посты, данные наблюдений на которых позволили бы расчетными путями восстанавливать характеристики стока для водных объектов бассейна. Наблюдения на реках бассейна р. Налычева не производились, на прилегающей территории существовало пять пунктов наблюдений: три на р. Халатырка (Кирпичная) – “свх. Ближний”, “мост” и “пост 3”. “1-я Крутобереговая” на руч. Крутобереговом (единственный функционирующий пост с продолжительностью наблюдений 82 года). Также и на руч. Козельском (действовавший с 1972 по 1978 гг.). На всех постах наблюдения производились только за уровнем, температурой и расходом воды, архивных данных о стоке наносов или растворенных веществ нет. На территории бассейна р. Налычева и водотоков, дренирующих юго-восточные склоны вулканов, метеостанции отсутствуют. Ближайшая действующая метеостанция располагается в пос. Светлый Елизовского района. Также действуют м/с непосредственно в г. Петропавловск-Камчатский и на Петропавловском маяке, в 12 км от Петропавловска-Камчатского, на мысе Маячный. В данной работе использовались наблюдения из пос. Светлый, как наиболее репрезентативные для района исследований. Системных исследований стока наносов, за исключением наблюдений на р. Сухая Елизовская группой Московского Государственного Университета в 2007–2020 гг. [8, 13, 32], не проводилось.



Рис. 1. Обзорная картосхема территории.

Fig. 1. Geographic location of the Nalychevo Watershed and its extent within the Avachinsky Gulf territory.

3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Полевые исследования

На территории водосбора Авачинского залива в 2021–2022 гг. было отобрано 33 образца почвогрунтов и донных отложений временных и постоянных склоновых водотоков (далее – “образцы источников”). Отбор производился 28 июля – 16 августа 2021 года. Отбор проб осуществляется стандартным пробоотборником с внутренним диаметром 8.25 см до известной глубины (30 см). В приустьевых створах р. Нальчева и на р. Левая и Правая Котельная установлены интегральные ловушки взвешенных наносов Филиппса [30], в которых отобраны наносы рассматривались как репрезентативные для характеристики выноса материала с водосбора в океан (далее – “целевые образцы”).

В лабораторных условиях предварительно взвешенные образцы почв и донных отложений были высушены до абсолютно сухого состояния при температуре 105°C, повторно взвешены, затем размолоты и просеяны через сито с диаметром отверстий 63 мкм [14, 18, 23, 28]. Подготовка (просушка, гомогенизация) и анализ проб почвы были проведены в НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Все отобранные грунты, почвы, взвешенные наносы анализировались масс-спектральным и атомно-эмиссионным методами с индуктивно-связанной плазмой на определения содержания Li, Be, B, Na, Mg, Al, Si, P_{общ.}, S, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, Hg, In, Sn, Sb, Te, I, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Iu, Pt, Au, Tl, Pb, Bi, Th, U.

Методы моделирования

Для оценки водного стока выполнен блок гидрологических расчетов на основе базы данных HydroRIVERS, предоставляющей собой слои гидрографических данных на основе радарной интерферометрической съемки поверхности Земли (SRTM) высокого разрешения [22]. Для разграничения речной сети, представленной в HydroRIVERS, среднегодовые расходы рассчитываются с помощью процедуры геопространственного моделирования при помощи модели WaterGAP [21]. В результате с помощью базы

данных HydroRIVERS получены данные о средних расходах воды, площади водосбора и длине исследуемых водотоков.

Для восстановления гидрографов в замыкающих створах использована глобальная гидрологическая модель с суточной дискретностью GloFAS-ERA5, основанная на ре-анализе метеорологических характеристик [19]. Модель GloFAS-ERA5 представляет собой растровые файлы с ячейкой $10^\circ \times 10^\circ$ со среднесуточными расходами за каждый день, начиная с 1979 года. С помощью этой базы данных, имеющей мелкий масштаб, достоверно оценен может быть только сток в устье крупнейшего водотока – р. Нальчева.

Для идентификации долевого вклада различных источников наносов применен метод фингерпринтинга [36] с использованием набора геохимических трассеров на основании программного комплекса FingerPro [24]. Принцип фингерпринтинга в статистической сепарации источников наносов в седиментационной ловушке Филлипса (т.н. целевой образец). FingerPro – это стандартная линейная многомерная модель смешивания с анализом неопределенности Монте-Карло, реализованная в пакете R с открытым исходным кодом на платформе CRAN. Относительный вклад каждого источника наносов определяется по уравнению 1, которое удовлетворяет ограничениям уравнения 2 [18]:

$$\sum_{j=1}^m a_{i,j} \omega_j = b_i, \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^m \omega_j = 1 \quad 0 \leq \omega_j \leq 1, \quad (2)$$

где b_i – концентрация трассера i в целевом образце; $a_{i,j}$ представляет концентрацию трассера i в источнике типа j ; ω_j – неизвестный относительный вклад источника j ; m представляет количество потенциальных источников наносов, а n – количество выбранных трассеров. Процедура направлена на поиск пропорций источников с сохранением баланса массы, где пропорции должны лежать между 0 и 1 и суммой 1, выраженной в % (то есть между 0 и 100, суммой 100). Вклад источника, оцененный моделью FingerPro, был выражен как средний вклад из лучших 3000 решений, предсказанных моделью.

Выбор трассеров для модели фингерпринтинга производился на основе 4-х ступенчатой процедуры отбора в соответствии с рекомендациями [15, 23, 36]. Проверялась мультиколлинеарность в данных трассеров (на основе рангового корреляционного теста Спирмена) для исключения из выборки коллинеарных химических элементов; сравнивались диапазоны трассеров в пробах почвогрунтов (т. е. источники наносов) с соответствующими диапазонами в целевых образцах донных осадков (т. е. мишенях); проводился непараметрический тест Краскала–Уоллиса для удаления тех трассеров, которые не показывают значительной (p -значение > 0.05) разницы между потенциальными источниками и донными отложениями; к списку отобранных консервативных трассеров применялся пошаговый многомерный дискриминантный функциональный анализ для определения окончательной комбинированной сигнатуры дискриминации источника для включения в модель фингерпринтинга [15].

Качество аппроксимации модели определялось критерием согласия GOF (от англ. *goodness of fit*), предложенный Motha et al. [27] для оценки качества моделирования [17, 23, 29, 31]:

$$\text{GOF} = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \left(\frac{b_i - \sum_{j=1}^m x_j a_{i,j}}{\Delta_i} \right)^2 \right\}, \quad (3)$$

где $a_{i,j}$ – это средняя концентрация трассера i в источнике j ($j = 1$ до m); b_i это концентрация трассера i ($i = 1$ до n) в целевом образце; x_j – относительный вклад источника j в целевой образец; m – это количество потенциальных источников наносов; n – это количество трассеров.

Дистанционные методы

Для оценки формирования шлейфов мутности в устье р. Налычевой и приустьевой акватории Авачинского залива проводилось определение отражательной способности изображений водных объектов по ряду космических снимков Landsat и Sentinel-2. Было отобрано 67 спутниковых изображений за период с 2013 по 2021 гг. Выбранный временной интервал охватывает период активности Жупановского вулкана в 2013–2016 гг. и прохождение лахаров.

Обработка снимков проходила в два этапа; первый подготовительный этап заключался в предварительной коррекции изображений, которая позволила минимизировать искажения разного рода (разнозначные яркостные значения, влияние атмосферной дымки на изображения) и включил в себя последовательные радиометрическую и атмосферную коррекции, выполнявшиеся согласно рекомендациям [5, 7]. Второй этап заключался в создании визуализации снимка для снятия пиксельных значений коэффициента отражения ρ . Алгоритм работы включал в себя несколько последовательных этапов, выполненных в среде ArcGIS (рис. 2). Помимо коэффициентов отражения по космическим снимкам Landsat и Sentinel-2 осуществлялось определение площадей речных мутностных шлейфов. Для сопоставления площадных значений необходимо было выбрать пороговое значение контура повышенной мутности; для устья р. Налычева оно составило 0.4 пкс. (рис. 2). Результатом обработки космических снимков стали 58 значений коэффициента отражения ρ и 34 значения площадей шлейфов мутности в период с 2013 по 2021 гг. Пересчет в значения мутности воды осуществлялся по рекам-аналогам Северо-Востока РФ согласно [12] по формуле:

$$SSC = 0.39 \exp(74\rho). \quad (4)$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гидрологический режим рек Авачинской группы вулканов

По данным реанализа GloFAS-ERA5, для рек бассейна Авачинского залива, дренирующих вулканические постройки, характерны формирование растянутой волны половодья в мае во время таяния снежного покрова и многочисленные паводки в летне-осенний период, вызванные таянием отдельных снежников и прохождением ливневых дождей (рис. 3). Азональность бассейнов ярко выражается на примере постов в бассейне р. Халактырка. Модули стока на двух малых реках (руч. Крутобереговый и р. Халактырка), имеющих сопоставимые площади водосбора, отличаются в 4 раза (см. табл. 1). Неравномерный ход расходов по всем постам при их территориальной близости говорит о преобладании локальных факторов на формирования стока воды. Значительно неоднородно внутригодовое распределение стока на территории – так, в бассейне р. Авача и рек южного склона Авачинской группы вулканов таяние снега и основная волна половодья проходит в мае [45], то в бассейне же р. Налычева таяние наблюдается со значительной задержкой (в том числе, обусловленной большой площадью склонов северной экспозиции).

Наибольшей неравномерностью значений из створов наблюдений (см. табл. 1) характеризуется режим стока руч. Козельский, что связано с большей средней высотой его водосбора и его расположением непосредственно на вулканической постройке. Паводье, вызванное снеготаянием, не выражено в связи со значительной проница-

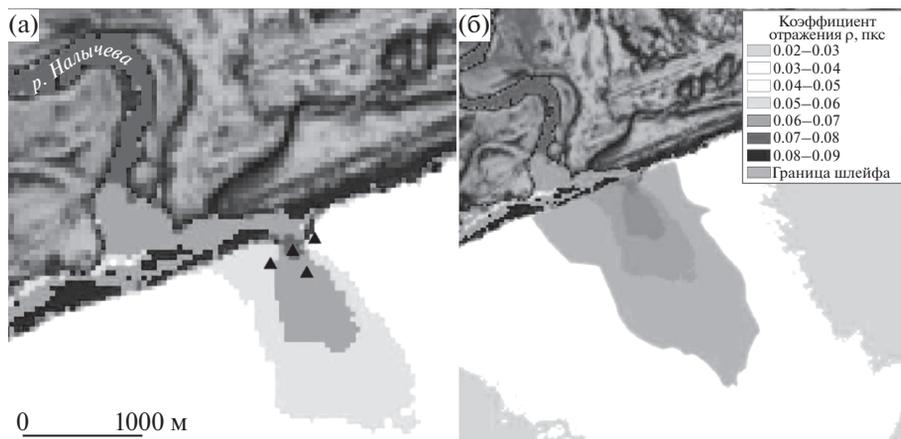


Рис. 2. Определение значений коэффициента отражения ρ в референсных точках приустьевой области р. Нальчева (а) и выделение площади шлейфа по границе 0.4 пкс (б).

Fig. 2. Determining the reflection coefficient ρ in the reference points of the Nalycheva river estuary (left) and delineating the plume area along the 0.4 px boundary (right).

емостью поверхности водосбора. В связи с этим, на ручье (и подобных ему соседних водотоках) формируется специфический водный режим, для которого характерны значительные пульсации расходов воды и непродолжительные, но значительные увеличения расходов воды, вызванные обильными осадками или активным таянием

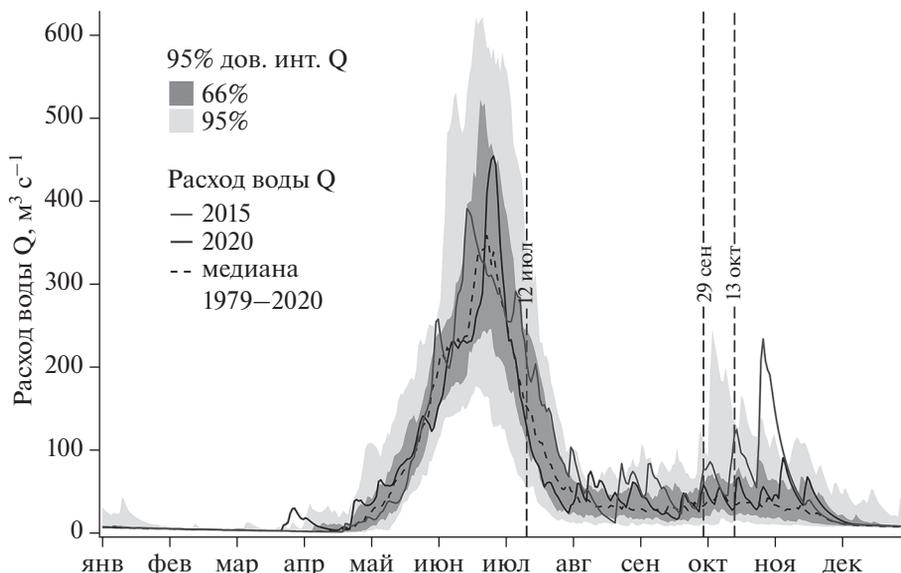


Рис. 3. Гидрограф р. Нальчева в устьевом створе по данным GloFAS-ERA5 [19] за 1979–2020 гг.

Fig. 3. Nalycheva river hydrograph estimated with GloFAS-ERA5 [19] for 1979–2020 period. The 2020th year highlighted in red.

Таблица 1. Среднеголетние значения характеристик стока исследуемых рек
Table 1. Mean annual hydrologic parameters of Avachinsky Gulf rivers

Река	Крутобереговый	Халактырка	Козельский	Налычева
Пост	свх. Дальний	свх. Ближний	ГМС Козельский	Устье
Площадь водосбора, км ²	60.2	17.5	8.8	1439
Q _{ср} , м ³ /с	0.42	0.47	0.25	59.7
Q _{max} , м ³ /с	3.32	2.37	3.1	435
Модуль стока, л/с/км ²	7.0	26.9	28.4	41.5
Период наблюдений	1945–1980	1944–1952	1972–1978	1979–2020
Источник	ГВК		[42]	GloFAS-ERA5 [19]

снежников и ледников при переувлажненном поверхностном слое почвы [42]. В результате этого максимальные расходы воды сопоставимы, а в отдельные годы – могут и превышать максимальные расходы на руч. Крутобереговый, чей водосбор больше в 7 раз (табл. 1).

Оценка среднегодового объема стока воды по данным модели HydroRIVERS [22] указывает на то, что в среднем за год в Авачинский залив с речным стоком поступает около 2.3 км³ воды). Объем литорали и сублиторали, где фиксировалась гибель животных, равен примерно 18 км³ [39]. Таким образом, объемы стока воды и прибрежной зоны отличаются примерно в 8 раз.

Количественная оценка путей миграции взвешенных наносов в пределах водосбора

Обнаружены повышенные концентрации отдельных микроэлементов как во взвешенной, так и растворенной формах. Так, в р. Желтушка-Мутная превышены рыбохозяйственные ПДК по цинку (примерно в 6 раз), а концентрация меди, свинца, молибдена и ванадия была близка к ПДК. С противоположной стороны склона вулканов, в р. Мутная, впадающей в р. Налычево, увеличена природная концентрация меди (в 5–7 раз), свинца (в 3 раза), цинка (в 6–9 раз). Избыточная концентрация этих же элементов отмечалась в р. Мутнушка, стекающей с Козельского вулкана, но в концентрациях, незначительно превышающих ПДК. Среди группы тяжелых металлов повышенные содержания в грунтах и взвесах были характерны для отдельных элементов: ванадия, кобальта и никеля. При этом воды массово обогащены растворенным ванадием – по сравнению с рыбохозяйственными ПДК. Повышенные концентрации высокотоксичного для водных организмов ванадия, содержание которого в речных взвесах в меньшей степени по сравнению с другими тяжелыми металлами связано с антропогенным фактором [4], можно связать с геохимическими аномалиями вулканического генезиса. В частности, ванадий-содержащие минералы были ранее открыты в продуктах извержения вулкана Толбачик на Камчатке, а пентавалентный ванадий установлен в возгонах вулканов [38].

Выделение различных групп источников наносов происходило в несколько этапов. Анализ главных компонент (РСА), определенных методом ICP-MS содержания 64 элементов, сопоставленный с кластеризацией методом К-средних, показал на существование 3 пространственных кластеров однородных геохимических зон. На этой основе было сделано предположение о наличии 3-х источников поступлений наносов:

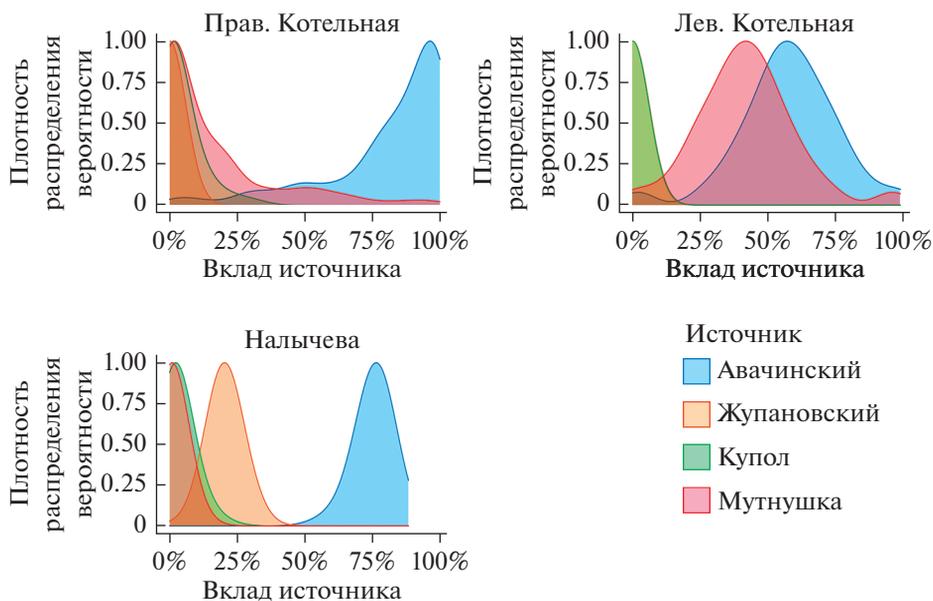


Рис. 4. Диаграммы распределения плотности вероятности 3000 результатов размешивания образцов донных отложений при помощи модели фингерпринтинга FingerPro [24].

Fig. 4. Results of the un-mixing procedure for suspended sediment samples collected using the Phillips Tube (PT) target sediment samples assessed using FingerPro model [24].

склоны вулканов Авачинский, Жупановский и Купол. Дополнительно на водосборе р. Мутнушка отмечено формирование специфических ассоциаций, также выделенных в отдельную группу (“Мутнушка”). Данное деление на группы подтверждается линейным дискриминантным анализом (LDA): 100% всех образцов классифицированы корректно.

Проведенная 4-ступенчатая процедура отбора консервативных трассеров (анализ на коллинеарность, диапазонный тест, тест Краскалла–Уоллиса и анализ дискриминантной функции) позволила выделить набор из шести трассеров, различия по группам между которыми такое же, как и между полным списком элементов (64). Это Литий (Li), Бериллий (Be), Галлий (Ga), Ниобий (Nb), Лютеций (Lu) и Тантал (Ta). В дальнейшем только эти шесть элементов использовались для «размешивания» целевых образцов. В целом, качество моделирования можно считать удовлетворительным, так как критерий качества GOF составил 0.79 для руч. Левая Котельная, 0.92 для руч. Правая Котельная и 0.95 для р. Налычева. Результаты расчетов показали, что взвесь р. Налычева летом–осенью 2021 года формировалась в основном (75%) за счет поступления со склонов Авачинской группы вулканов (рис. 4). Размыв тела лахара на склонах Жупановского вулкана приносит только 20% материала, вероятно за счет существенной аккумуляции на пойме р. Лев. Налычева в среднем течении (до слияния с Прав. Налычева). Здесь методами морфометрического анализа [16, 33] отмечено существование локальных ловушек наносов, потенциально перехватывающих значительную часть химического стока. Анализировался профиль величины K_{sn} , представляющий собой отношение крутизны реки на данном участке к водосборной площади этого участка [37]:

$$K_{sn} = SF^{\theta}, \quad (5)$$

где S – уклон русла (м/м); F – вышележащая водосборная площадь (м^2); θ – индекс выпуклости, принимаемый равным 0.45 для возможности сравнения между собой рек разных порядков. Наличие точек перегиба на указанном участке р. Налычева свидетельствует о чередовании зоны эрозии и аккумуляции. Поступление наносов с водосбора р. Мутнушка составило 1%.

Влияние схода лахара на Жупановском вулкане на сток наносов

В пределах бассейна р. Налычева на склоне Жупановского вулкана (конуса Приемш) в результате его эксплозивной активности в 2015–2016 гг. произошел обвал стенки его активного конуса в юго-западном направлении, что выразилось в формировании значительного по площади чехла из вулканогенных отложений (как обвального генезиса, так и пирокластических потоков), покрывшего прилегающие к склонам вулкана территории. Будучи значительно водонасыщенной (как за счет снежников и погребенного льда, так и за счет предшествующих событию обильных дождей), часть обвального материала трансформировалась в вулканический сель – лахаровый поток, заполнивший прилегающие к склону вулкана эрозионные врезы и долины ручьев. Согласно проведенным ранее исследованиям [1, 43], выделены несколько стадий трансформирования территории: 1) поступление материала от первичного обвала конуса (12 июля 2015 г.), его перекрытие отложениями пирокластических потоков и формирование водонасыщенных лахаровых потоков на поверхности обвального тела и прилегающей территории. Это сформировало две ветви выноса материала – в юго-западном и южном направлении; 2) дополнительное разрушение части конуса (14 июля), увеличившее мощность отложений на юго-западной ветви; 3) взрывные разрушения стенки конуса (27–30 ноября), материал которых был перераспределен по ветвям выноса водными потоками из растопленного при извержении льда и снега; 4) окончательное взрывное разрушение стенки конуса (12 февраля 2016 г.), сформировавшее новое обвальное тело и пирокластические потоки; 5) обвал склонов под конусом и пирокластические потоки, связанные с эксплозивным событием (24 марта). С большой долей вероятности во время каждого из этих событий формировались лахаровые, грязекаменные потоки, распространявшиеся в основном в южном направлении и увеличившие на 18% площадь затронутой территории по отношению к первичному обрушению. После окончания извержения началась эрозионная трансформация покрытой обвальными и лахаровыми отложениями территории за счет переноса мелкодисперсного материала водными потоками, что к 2021 году увеличило площадь затронутой территории еще на 3% – в основном, в крайней южной части, где чехол отложений, заполнивших долину ручья Домашний, практически достиг русла р. Налычева, на август 2021 года остановившись от нее в 800 м.

Проведенные оценки по космическим снимкам в устье р. Налычева свидетельствуют о диапазоне колебаний мутности в интервале от 2.4–506 мг/л. Мутности более 500 мг/л фиксируются в августе, среднее значение за июнь и июль равно 137 мг/л, среднегодовое – 79 мг/л. Для устья р. Налычева преимущественно характерны синхронные колебания стока воды и взвешенных наносов. Значения коэффициента отражения ρ по референсным точками (рис. 2) за 2013–2021 гг., за исключением лета 2016 года, не превышали 0.1 пкс, в среднем составляя 0.05 пкс. В 2016 году в весенне-летний период наблюдалось превышение среднемноголетних значений в среднем в 1.7 раз. Значительные отскоки от фоновых значений свидетельствуют о повышенном поступлении взвесей в период 2016 года, т. е. непосредственно на следующий год после схода лахара на вулкане Жупановский. Повышенные концентрации взвешенных веществ, характерные для августа, наблюдались уже 12 мая 2016 года. Средние значения мутности в

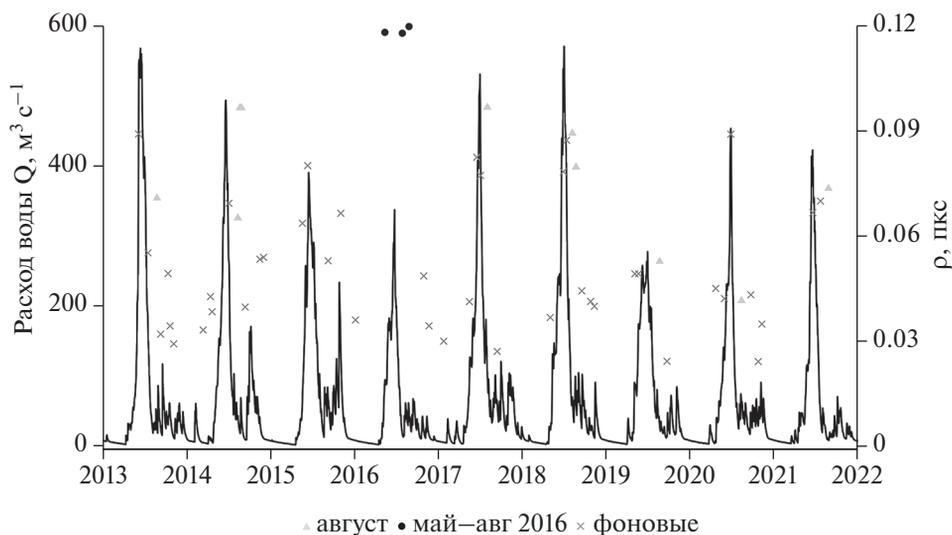


Рис. 5. Изменения расходов воды в устье р. Нальчева (по данным реанализа GloFAS-ERA5 [19]) и коэффициента отражения ρ для устья р. Нальчева в 2013–2021 гг.

Fig. 5. Temporal variability of Nalycheva river discharge (estimated with GloFAS-ERA5 [19]) and reflectance coefficient ρ in the estuary for the 2013–2021 period.

июле 2016 года оказались выше среднееголетних на 162%. В августе 2016 года зафиксирован максимум концентраций взвешенных веществ за весь рассматриваемый период. О вероятной роли специфических воздействий на сток наносов свидетельствуют также данные о пониженных расходах воды р. Нальчева в период половодья 2016 года (рис. 5), когда максимум половодья составил $337.9 \text{ м}^3/\text{с}$ при среднееголетнем значении в $367 \text{ м}^3/\text{с}$.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании впервые получена комплексная оценка материкового стока как важнейшей компоненты возможных воздействий со стороны исследуемого водосбора на океан.

1. Даны оценки водного стока в Авачинский залив, сопоставленные с фактическими концентрациями микроэлементов в составе взвешенных наносов и водах рек-притоков. Сделан вывод, что для формирования экологически значимых (для экосистемы литорали) объемов поступления потенциально опасных загрязняющих веществ необходимы их концентрации в реках, превышающие экологически допустимые концентрации в течение всего года не менее чем в 8–9 раз, или в течение суток – условно примерно не менее чем в 3000 раз. Подобные масштабы загрязнений на исследуемом водосборе отсутствуют.

2. Установлено, что сток наносов в нижнем течении рек формируется в основном за счет разрушения пород на склонах вулканов. Так, в устьевом створе р. Нальчева поток взвесей сформирован преимущественно притоками, берущими начало на восточных склонах Авачинского вулкана. Подавляющее количество наносов на малых реках, дренирующих юго-восточный склон Козельского вулкана (р. Котельная, Таенка, руч. Козельский), не доходит до устья этих рек.

3. Размыв тела обвала на Жупановском вулкане является существенным источником наносов в верхнем течении р. Нальчева, но только малая часть этого материала достигает ее устья. Обрушение стенки вулкана Жупановский в 2015 году и формирование крупного лахара привело к увеличению стока наносов р Нальчева в течение одного 2016 года, т.е. непосредственно на следующий год после извержения. Сход лахара, несмотря на свои масштабы (объем сошедшего материала более чем в тысячу раз превышает годовой сток наносов), мог оказывать активное воздействие на экосистему бассейна только в первый год после повлекшего его возникновение события. По состоянию на 2020–2021 гг. его воздействие на сток наносов ограничено водосборной площадью руч. Домашний.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ имени М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды” и при поддержке гранта Русского Географического Общества “Камчатская экспедиция: комплексная экологическая оценка рек района Авачинской группы вулканов Камчатки”. Исследование выполнено по госзаданию НИ Лаборатории эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ (проект № 121051200166-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбач Н.В., Самойленко С.Б., Плечова А.А., Мельников Д.В., Горбач Н.В., Самойленко С.Б., Плечова А.А., Мельников Д.В. Обвал на вулкане Жупановский (Камчатка) в июле 2015 г.: первые данные и наблюдения // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2015. Т. 27. вып. 3. С. 5–11.
2. Есин Е.В. Обзор токсичности основных элементов-загрязнителей лососевых нерестовых рек камчатки // Известия ТИНРО. 2015. Т. 180. С. 210–225.
3. Есин Е.В., Чалов С.Р. Экологическая классификация рек вулканических территорий Камчатки // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. 2014. Т. 6. С. 220–238.
4. Савенко В.С. Химический состав взвешенных наносов рек мира. М.: ГЕОС, 2006. 175 с.
5. Тарасов М.К., Тутубалина О.В. Методика определения мутности воды в р. Селенге и прилегающей акватории оз. Байкал по данным дистанционного зондирования // Исследования Земли из Космоса. 2018. Т. 1. С. 60–71.
6. Чалов С.Р., Ефимов В.А. Механический состав взвешенных наносов: классификации, характеристики, пространственная изменчивость // Вестник МГУ. Серия 5. География. 2021. Т. 5. С. 91–103.
7. Чалов С.Р., Прокопьева К.Н. Оценка баланса взвешенных наносов в дельте р. Лена по данным дистанционного зондирования земли // Исследования Земли из космоса. 2021. Т. 2021. вып. 3. С. 19–29.
<https://doi.org/10.31857/S0205961421030027>
8. Чалов С.Р., Цыленков А.С. Сток наносов малых рек районов современного вулканизма (р. Сухая Елизовская, Камчатка) // Геоморфология. 2017. Т. 6. вып. 1. С. 104–116.
<https://doi.org/10.15356/0435-4281-2017-1-104-116>
9. Berger C., McArdell B.W., Schlunegger F. Sediment transfer patterns at the Illgraben catchment, Switzerland: Implications for the time scales of debris flow activities // Geomorphology. 2011. V. 125. № 3. P. 421–432.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.10.019>
10. Bracken L.J., Wainwright J., Ali G.A., Tetzlaff D., Smith M.W., Reaney S.M., Roy A.G. Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, pathways and future agendas // Earth-Science Reviews. 2013. V. 119. P. 17–34.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.02.001>
11. Cavalli M., Goldin B., Comiti F., Brardinoni F., Marchi L. Assessment of erosion and deposition in steep mountain basins by differencing sequential digital terrain models // Geomorphology. 2017. V. 291. P. 4–16.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.04.009>
12. Chalov S., Prokopyeva K., Habel M. North to South Variations in the Suspended Sediment Transport Budget within Large Siberian River Deltas Revealed by Remote Sensing Data // Remote Sensing.

2021. V. 13. № 22. P. 4549.
<https://doi.org/10.3390/rs13224549>
13. *Chalov S.R., Tsyplenkov A.S., Pietron J., Chalova A.S., Shkolnyi D.I., Jarsjö J., Maerker M.* Sediment transport in headwaters of a volcanic catchment—Kamchatka Peninsula case study // *Frontiers of Earth Science in China*. 2017. V. 11. № 3. P. 565–578.
<https://doi.org/10.1007/s11707-016-0632-x>
 14. *Collins A.L., Pulley S., Foster I.D.L., Gellis A., Porto P., Horowitz A.J.* Sediment source fingerprinting as an aid to catchment management: A review of the current state of knowledge and a methodological decision-tree for end-users // *Journal of Environmental Management*. 2017. V. 194. P. 86–108.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.075>
 15. *Collins A.L., Walling D., Leeks G.J.L.* Composite fingerprinting of the spatial source of fluvial suspended sediment : a case study of the Exe and Severn river basins, United Kingdom // *Géomorphologie : relief, processus, environnement*. 1996. V. 2. № 2. P. 41–53.
<https://doi.org/10.3406/morfo.1996.877>
 16. *DiBiase R.A., Whipple K.X., Heimsath A.M., Ouimet W.B.* Landscape form and millennial erosion rates in the San Gabriel Mountains, CA // *Earth and Planetary Science Letters*. 2010. V. 289. № 1–2. P. 134–144.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.10.036>
 17. *Evrard O., Navratil O., Ayrault S., Ahmadi M., Némery J., Legout C., Lefèvre I., Poirel A., Bonté P., Esteves M.* Combining suspended sediment monitoring and fingerprinting to determine the spatial origin of fine sediment in a mountainous river catchment // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2011. V. 36. № 8. P. 1072–1089.
<https://doi.org/10.1002/esp.2133>
 18. *Gaspar L., Lizaga I., Blake W.H., Latorre B., Quijano L., Navas A.* Fingerprinting changes in source contribution for evaluating soil response during an exceptional rainfall in Spanish pre-pyrenees // *Journal of Environmental Management*. 2019. V. 240. N November 2018. P. 136–148.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.109>
 19. *Harrigan S., Zsoter E., Alfieri L., Prudhomme C., Salamon P., Wetterhall F., Barnard C., Cloke H., Pappenberger F.* GloFAS-ERA5 operational global river discharge reanalysis 1979–present // *Earth System Science Data*. 2020. V. 12. № 3.
<https://doi.org/10.5194/essd-12-2043-2020>
 20. *Khesina Z.B., Karnaeva A.E., Pytskii I.S., Buryak A.K.* The mysterious mass death of marine organisms on the Kamchatka Peninsula: A consequence of a technogenic impact on the environment or a natural phenomenon? // *Marine Pollution Bulletin*. 2021. V. 166. P. 112175.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112175>
 21. *Lehner B., Grill G.* Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world’s large river systems // *Hydrological Processes*. 2013. V. 27. № 15. P. 2171–2186.
<https://doi.org/10.1002/hyp.9740>
 22. *Linke S., Lehner B., Ouellet Dallaire C., Ariwi J., Grill G., Anand M., Beames P., Burchard-Levine V., Maxwell S., Moideu H., Tan F., Thieme M.* Global hydro-environmental sub-basin and river reach characteristics at high spatial resolution // *Scientific Data*. 2019. V. 6. № 1. P. 283.
<https://doi.org/10.1038/s41597-019-0300-6>
 23. *Lizaga I., Gaspar L., Blake W.H., Latorre B., Navas A.* Fingerprinting changes of source apportionments from mixed land uses in stream sediments before and after an exceptional rainstorm event // *Geomorphology*. 2019. V. 341. P. 216–229.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.05.015>
 24. *Lizaga I., Latorre B., Gaspar L., Navas A.* FingerPro: an R Package for Tracking the Provenance of Sediment // *Water Resources Management*. 2020. V. 34. № 12. P. 3879–3894.
<https://doi.org/10.1007/s11269-020-02650-0>
 25. *Mao L., Cavalli M., Comiti F., Marchi L., Lenzi M.A., Arattano M.* Sediment transfer processes in two Alpine catchments of contrasting morphological settings // *Journal of Hydrology*. 2009. V. 364. № 1–2. P. 88–98.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.10.021>
 26. *Messenzehl K., Hoffmann T., Dikau R.* Sediment connectivity in the high-alpine valley of Val Müschauns, Swiss National Park – linking geomorphic field mapping with geomorphometric modelling // *Geomorphology*. 2014. V. 221. P. 215–229.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.05.033>
 27. *Motha J.A., Wallbrink P.J., Hairsine P.B., Grayson R.B.* Determining the sources of suspended sediment in a forested catchment in southeastern Australia // *Water Resources Research*. 2003. V. 39. № 3.
<https://doi.org/10.1029/2001WR000794>

28. Owens P.N., Blake W.H., Gaspar L., Gateuille D., Koiter A.J., Lobb D.A., Peticrew E.L., Reiffarth D.G., Smith H.G., Woodward J.C. Fingerprinting and tracing the sources of soils and sediments: Earth and ocean science, geoarchaeological, forensic, and human health applications // *Earth-Science Reviews*. 2016. V. 162. P. 1–23.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.012>
29. Palazón L., Latorre B., Gaspar L., Blake W.H., Smith H.G., Navas A. Comparing catchment sediment fingerprinting procedures using an auto-evaluation approach with virtual sample mixtures // *Science of The Total Environment*. 2015. V. 532. P. 456–466.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.003>
30. Phillips J.M., Russell M.A., Walling D.E. Time-integrated sampling of fluvial suspended sediment: a simple methodology for small catchments // *Hydrological Processes*. 2000. V. 14. № 14. P. 2589–2602.
[https://doi.org/10.1002/1099-1085\(20001015\)14:14<2589::AID-HYP94>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/1099-1085(20001015)14:14<2589::AID-HYP94>3.0.CO;2-D)
31. Pulley S., Collins A.L. Tracing catchment fine sediment sources using the new SIFT (Sediment Fingerprinting Tool) open source software // *Science of The Total Environment*. 2018. V. 635. P. 838–858.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.126>
32. Romanescu G., Chalov S., Stoleriu C.C., Miha-Pintilie A., Angileri S.E., Kuznetsova Y., Cama M., Maerker M. Geomorphologic map of the 1st Mutnaya River, Southeastern Kamchatka, Russia // *Journal of Mountain Science*. 2017. V. 14. № 12. P. 2373–2390.
<https://doi.org/10.1007/s11629-017-4358-3>
33. Vanacker V., Blanckenburg F. von, Govers G., Molina A., Campforts B., Kubik P.W. Transient river response, captured by channel steepness and its concavity // *Geomorphology*. 2015. V. 228. P. 234–243.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.09.013>
34. Vigiak O., Borselli L., Newham L.T.H., McInnes J., Roberts A.M. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio // *Geomorphology*. 2012. V. 138. № 1. P. 74–88.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08.026>
35. Walling D.E. The sediment delivery problem // *Journal of Hydrology*. 1983. V. 65. № 1–3. P. 209–237.
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90217-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90217-2)
36. Walling D.E. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems // *Science of The Total Environment*. 2005. V. 344. № 1–3. P. 159–184.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.02.011>
37. Wobus C., Whipple K.X., Kirby E., Snyder N., Johnson J., Spyropoulou K., Crosby B., Sheehan D. Tectonics from topography: Procedures, promise, and pitfalls // *Tectonics, Climate, and Landscape Evolution*. Geological Society of America, 2006.
[https://doi.org/10.1130/2006.2398\(04\)](https://doi.org/10.1130/2006.2398(04))
38. Yakubovich O.V., Yakovleva E.V., Golovanov A.N., Volkov A.S., Volkova O.S., Zvereva E.A., Dimitrova O.V., Vasiliev A.N. The First Vanadate–Carbonate, K₂Mn₃(VO₄)₂(CO₃): Crystal Structure and Physical Properties // *Inorganic Chemistry*. 2013. V. 52. № 3. P. 1538–1543.
<https://doi.org/10.1021/ic302333e>
39. Березовская В.А. Авачинская губа. Гидрохимический режим, антропогенное воздействие. Петропавловск-Камчатский: КГАРФ, 1999.
40. Бондур В.Г., Замшин В.В., Чверткова О.И. Исследование из космоса экологического происхождения у полуострова Камчатка в сентябре–октябре 2020 г., связанного с красным приливом // Доклады Российской Академии Наук. Науки О Земле. 2021. Т. 497. вып. 1.
<https://doi.org/10.31857/S2686739721030014>
41. Бондур В.Г., Замшин В.В., Чверткова О.И., Матросова Е.Р., Ходаева В.Н. Анализ причин экологического происхождения на Камчатке осенью 2020 г., связанного с красным приливом, на основании космических данных // Исследование Земли Из Космоса. 2021. вып. 3.
<https://doi.org/10.31857/S020596142103009X>
42. Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д. Ледник Козельский (Авачинская группа вулканов) Водноледниковый и тепловой баланс горноледниковых бассейнов. СПб: Гидрометеиздат, 1992.
43. Гирина О.А., Лупян Е.А., Сорокин А.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Маневич Т.М. Спутниковые и наземные наблюдения извержений вулкана Жупановский (Камчатка, Россия) в 2013 и 2014–2016 гг // Вулканология и сейсмология. 2018. вып. 1. С. 3–17.
44. Куксина Л.В., Алексеевский Н.И. Эрозионное районирование территории Камчатского края // География И Природные Ресурсы. 2016. Т. 2. С. 132–141.
45. Терский П.Н., Жбаков К.К., Михеева А.И. Связь морфометрических характеристик водосборов и ландшафтных условий в бассейне Р. Авачи (камчатка) с характеристиками среднегодового и максимального стока рек // Исследования водных биологических ресурсов Кам-

- чатки и северо-западной части Тихого океана. 2017. вып. 46. С. 51–65.
<https://doi.org/10.15853/2072-8212.2017.46.51-65>
46. Kamchatka: Pollution killing sea life in Russian far east // BBC News. 2020.
47. 95% of Marine Life on Sea Floor Killed in Kamchatka Eco-Disaster, Scientists Say // The Moscow Times. 2020.

Overland Runoff and its Impact on Hydrobiont Mortality in Avachinsky Gulf (Pacific Ocean, Kamchatka)

S. R. Chalov^{1, 2}, A. S. Tsyplenkov¹, *, D. I. Shkolny¹, K. N. Prokopeva¹, and E. I. Bahareva¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography,
Moscow, Russia

*E-mail: atsyplenkov@geogr.msu.ru

This work discusses the specific features of riverine sediment inflow and its chemical composition to the Avachinsky Gulf of the Pacific Ocean. Based on the GloFAS-ERA5 reanalysis data, we assessed the hydrologic regime of the studied rivers. Further, the fingerprinting method was used to find the sediment transport pathways. In contrast, the sediment delivery to the Pacific Ocean with the Nalycheva River runoff is determined by the interpretation of turbidity plumes on Landsat satellite images. Our findings suggested the leading role of erosion processes on volcanic slopes in forming sediment yield associated with three primary sediment sources: the slopes of Avachinsky, Zhupanovsky and Kupol volcanoes. Our research pays special attention to the lahar consequences on the Zhupanovsky volcano slopes, which occurred in 2015. We supposed that this event had a short-term (within one year) impact on the sediment redistribution of the Nalycheva River estuary.

Keywords: Kamchatka, sediment yield, dissolved solids load, red tides, hydrobionts, natural disaster

REFERENCES

- Gorbach N.V., Samoilenko S.B., Plechova A.A., Melnikov D.V., Gorbach N.V., Samoilenko S.B., Plechova A.A., Melnikov D.V. Obval na vulkane Zhupanovskii (Kamchatka) v iule 2015 g.: pervye dannye i nabludeniia // Vestn. KRAUNTS. Ser. Nauki o Zemle. 2015. V. 27. № 3. P. 5–11.
- Esin E.V. Obzor toksichnosti osnovnykh elementov-zagriznitelei lososevykh nerestovykh rek kamchatki // Izvestiia TINRO. 2015. V. 180. P. 210–225.
- Esin E.V., Chalov S.R. Ekologicheskaiia klassifikatsiia rek vulkanicheskikh territorii Kamchatki // Chteniia pamiati Vladimira Iakovlevicha Levanidova. 2014. V. 6. P. 220–238.
- Savenko V.S. Khimicheskii sostav vzveshennykh nanosov rek mira. M.: GEOS, 2006. 175 s.
- Tarasov M.K., Tutubalina O.V. Water turbidity estimation in the Selenga River and nearby waters of lake Baikal using remote sensing data // Issledovaniia Zemli iz Kosmosa. 2018. V. 1. P. 60–71.
- Chalov S.R., Efimov V.A. Particulate composition of suspended sediments: characteristics, classifications and spatial variability // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya. 2021. № 4. P. 91–103.
- Chalov S.R., Prokopeva K.N. Assessment suspended sediment budget of the Lena river delta based on the remote sensing dataset // Issledovaniia Zemli iz Kosmosa. 2021. № 3. P. 19–29. <https://doi.org/10.31857/S0205961421030027>
- Chalov S.R., Tsyplenkov A.S. Sediment discharge of small rivers in areas of active volcanism (River Sukhaya Elizovskaya, Kamchatka) // Geomorfologiya. 2017. V. 6. № 1. P. 104–116. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2017-1-104-116>
- Berger C., McArdell B.W., Schlunegger F. Sediment transfer patterns at the Illgraben catchment, Switzerland: Implications for the time scales of debris flow activities // Geomorphology. 2011. V. 125. № 3. P. 421–432. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.10.019>
- Bracken L.J., Wainwright J., Ali G.A., Tetzlaff D., Smith M.W., Reaney S.M., Roy A.G. Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, pathways and future agendas // Earth-Science Reviews. 2013. V. 119. P. 17–34. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.02.001>
- Cavalli M., Goldin B., Comiti F., Brardinoni F., Marchi L. Assessment of erosion and deposition in steep mountain basins by differencing sequential digital terrain models // Geomorphology. 2017. V. 291. P. 4–16. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.04.009>

12. Chalov S., Prokopenko K., Habel M. North to South Variations in the Suspended Sediment Transport Budget within Large Siberian River Deltas Revealed by Remote Sensing Data // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. № 22. P. 4549. <https://doi.org/10.3390/rs13224549>
13. Chalov S.R., Tsyplenkov A.S., Pietron J., Chalova A.S., Shkolnyi D.I., Jarsjö J., Maerker M. Sediment transport in headwaters of a volcanic catchment—Kamchatka Peninsula case study // *Frontiers of Earth Science in China*. 2017. V. 11. № 3. P. 565–578. <https://doi.org/10.1007/s11707-016-0632-x>
14. Collins A.L., Pulley S., Foster I.D.L., Gellis A., Porto P., Horowitz A.J. Sediment source fingerprinting as an aid to catchment management: A review of the current state of knowledge and a methodological decision-tree for endusers // *Journal of Environmental Management*. 2017. V. 194. P. 86–108. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.075>
15. Collins A.L., Walling D., Leeks G.J.L. Composite fingerprinting of the spatial source of fluvial suspended sediment: a case study of the Exe and Severn river basins, United Kingdom // *Géomorphologie : relief, processus, environnement*. 1996. V. 2. № 2. P. 41–53. <https://doi.org/10.3406/morfo.1996.877>
16. DiBiase R.A., Whipple K.X., Heimsath A.M., Ouimet W.B. Landscape form and millennial erosion rates in the San Gabriel Mountains, CA // *Earth and Planetary Science Letters*. 2010. V. 289. № 1–2. P. 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.10.036>
17. Evrard O., Navratil O., Ayrault S., Ahmadi M., Legout C., Lefèvre I., Poirel A., Bonté P., Esteves M. Combining suspended sediment monitoring and fingerprinting to determine the spatial origin of fine sediment in a mountainous river catchment // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2011. V. 36. № 8. P. 1072–1089. <https://doi.org/10.1002/esp.2133>
18. Gaspar L., Lizaga I., Blake W.H., Latorre B., Quijano L., Navas A. Fingerprinting changes in source contribution for evaluating soil response during an exceptional rainfall in Spanish pre-Pyrenees // *Journal of Environmental Management*. 2019. V. 240. N November 2018. P. 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.109>
19. Harrigan S., Zsoter E., Alfieri L., Prudhomme C., Salamon P., Wetterhall F., Barnard C., Cloke H., Pappenberger F. GloFAS-ERA5 operational global river discharge reanalysis 1979–present // *Earth System Science Data*. 2020. V. 12. № 3. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2043-2020>
20. Khesina Z.B., Karnaeva A.E., Pytskii I.S., Buryak A.K. The mysterious mass death of marine organisms on the Kamchatka Peninsula: A consequence of a technogenic impact on the environment or.
21. Lehner B., Grill G. Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems // *Hydrological Processes*. 2013. V. 27. № 15. P. 2171–2186. <https://doi.org/10.1002/hyp.9740>
22. Linke S., Lehner B., Ouellet Dallaire C., Ariwi J., Grill G., Anand M., Beames P., Burchard-Levine V., Maxwell S., Moidu H., Tan F., Thieme M. Global hydro-environmental sub-basin and river reach characteristics at high spatial resolution // *Scientific Data*. 2019. V. 6. № 1. P. 283. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0300-6>
23. Lizaga I., Gaspar L., Blake W.H., Latorre B., Navas A. Fingerprinting changes of source apportionments from mixed land uses in stream sediments before and after an exceptional rainstorm event // *Geomorphology*. 2019. V. 341. P. 216–229. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.05.015>
24. Lizaga I., Latorre B., Gaspar L., Navas A. FingerPro: an R Package for Tracking the Provenance of Sediment // *Water Resources Management*. 2020. V. 34. № 12. P. 3879–3894. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02650-0>
25. Mao L., Cavalli M., Comiti F., Marchi L., Lenzi M.A., Arattano M. Sediment transfer processes in two Alpine catchments of contrasting morphological settings // *Journal of Hydrology*. 2009. V. 364. № 1–2. P. 88–98. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.10.021>
26. Messenzehl K., Hoffmann T., Dikau R. Sediment connectivity in the high-alpine valley of Val Mütschans, Swiss National Park – linking geomorphic field mapping with geomorphometric modelling // *Geomorphology*. 2014. V. 221. P. 215–229. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.05.033>
27. Motha J.A., Wallbrink P.J., Hairsine P.B., Grayson R.B. Determining the sources of suspended sediment in a forested catchment in southeastern Australia // *Water Resources Research*. 2003. V. 39. № 3. <https://doi.org/10.1029/2001WR000794>
28. Owens P.N., Blake W.H., Gaspar L., Gateuille D., Koiter A.J., Lobb D.A., Petticrew E.L., Reiffarth D.G., Smith H.G., Woodward J.C. Fingerprinting and tracing the sources of soils and sediments: Earth and ocean science, geoarchaeological, forensic, and human health applications // *Earth-Science Reviews*. 2016. V. 162. P. 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.012>
29. Palazón L., Latorre B., Gaspar L., Blake W.H., Smith H.G., Navas A. Comparing catchment sediment fingerprinting procedures using an auto-evaluation approach with virtual sample mixtures // *Science of The Total Environment*. 2015. V. 532. P. 456–466. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.003>

30. Phillips J.M., Russell M.A., Walling D.E. Time-integrated sampling of fluvial suspended sediment: a simple methodology for small catchments // *Hydrological Processes*. 2000. V. 14. № 14. P. 2589–2602.
[https://doi.org/10.1002/1099-1085\(20001015\)14:14<2589::AID-HYP94>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/1099-1085(20001015)14:14<2589::AID-HYP94>3.0.CO;2-D)
31. Pulley S., Collins A.L. Tracing catchment fine sediment sources using the new SIFT (Sediment Fingerprinting Tool) open source software // *Science of the Total Environment*. 2018. V. 635. P. 838–858.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.126>
32. Romanescu G., Chalov S., Stoleriu C.C., Mihiu-Pintilie A., Angileri S.E., Kuznetsova Y., Cama M., Maerker M. Geomorphologic map of the 1st Mutnaya River, Southeastern Kamchatka, Russia // *Journal of Mountain Science*. 2017. V. 14. № 12. P. 2373–2390.
<https://doi.org/10.1007/s11629-017-4358-3>
33. Vanacker V., Blanckenburg F. von, Govers G., Molina A., Campforts B., Kubik P.W. Transient river response, captured by channel steepness and its concavity // *Geomorphology*. 2015. V. 228. P. 234–243.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.09.013>
34. Vigiak O., Borselli L., Newham L.T.H., McInnes J., Roberts A.M. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio // *Geomorphology*. 2012. V. 138. № 1. P. 74–88.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08.026>
35. Walling D.E. The sediment delivery problem // *Journal of Hydrology*. 1983. V. 65. № 1–3. P. 209–237.
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90217-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90217-2)
36. Walling D.E. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems // *Science of The Total Environment*. 2005. V. 344. № 1–3. P. 159–184.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.02.011>
37. Wobus C., Whipple K.X., Kirby E., Snyder N., Johnson J., Spyropoulou K., Crosby B., Sheehan D. Tectonics from topography: Procedures, promise, and pitfalls // *Tectonics, Climate, and Landscape Evolution*. Geological Society of America, 2006.
[https://doi.org/10.1130/2006.2398\(04\)](https://doi.org/10.1130/2006.2398(04))
38. Yakubovich O.V., Yakovleva E.V., Golovanov A.N., Volkov A.S., Volkova O.S., Zvereva E.A., Dimitrova O.V., Vasiliev A.N. The First Vanadate–Carbonate, $K_2Mn_3(VO_4)_2(CO_3)$: Crystal Structure and Physical Properties // *Inorganic Chemistry*. 2013. V. 52. № 3. P. 1538–1543.
<https://doi.org/10.1021/ic302333c>
39. Berezovskaia V.A. Avachinskaia guba. Gidrokhimicheskii rezhim, antropogennoe vozdeistvie. Petropavlovsk-Kamchatskii: KGARF, 1999.
40. Bondur V.G., Zamshin V.V., Chvertkova O.I. Space study of a red tide-related environmental disaster near Kamchatka peninsula in September–October 2020 // *Doklady Earth Sciences*. 2021. V. 497. № 1. P. 255–260.
<https://doi.org/10.31857/S2686739721030014>
41. Bondur V.G., Zamshin V.V., Chvertkova O.I., Matrosova E.R., Khodaeva V.N. Analysis of the causes of the Kamchatka environmental disaster in autumn 2020 related with a red tide, based on satellite data // *Issledovanie Zemli Iz Kosmosa*. 2021. № 3. P. 3–18
<https://doi.org/10.31857/S020596142103009X>
42. Vinogradov V.N., Muravev Ia.D. Lednik Kozelskii (Avachinskaia gruppa vulkanov) Vodno-lednikovyi i teplovoi balans gornolednikovyykh basseinov. Spb: Gidrometeoizdat, 1992.
43. Girina O.A., Lupian E.A., Sorokin A.A., Melnikov D.V., Manevich A.G., Manevich T.M. Sputnikovye i nazemnye nabludeniia eksplozivnykh izverzhenii vulkana Zhupanovskii (Kamchatka, Rossiia) v 2013 i 2014–2016 gg // *Vulkanologiya i seismologiya*. 2018. № 1. P. 3–17.
44. Kuksina L.V., Alekseevskii N.I. Erozionnoe raionirovanie territorii Kamchatskogo kraia // *Geografiia i Prirodnye Resursy*. 2016. V. 2. P. 132–141.
45. Terskii P.N., Zhabkov K.K., Mikheeva A.I. Sviaz morfometricheskikh kharakteristik vodosborov i landshaftnykh uslovii v basseine R. Avachi (kamchatka) s kharakteristikami srednegodovogo i maksimalnogo stoka rek // *Issledovaniia vodnykh biologicheskikh resursov Kamchatki i severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana*. 2017. № 46. P. 51–65.
<https://doi.org/10.15853/2072-8212.2017.46.51-65>
46. Kamchatka: Pollution killing sea life in Russian far east // *BBC News*. 2020.
47. 95% of Marine Life on Sea Floor Killed in Kamchatka Eco-Disaster, Scientists Say // *The Moscow Times*. 2020.

**НОВЫЕ ВИДЫ ГОЛОЖАБЕРНЫХ МОЛЛЮСКОВ СЕМЕЙСТВА
ONCHIDORIDIDAE ПО МАТЕРИАЛАМ ЭКСПЕДИЦИИ
“ВОСТОЧНЫЙ БАСТИОН-КУРИЛЬСКАЯ ГРЯДА 2021” ИЗ ПРИБРЕЖНЫХ ВОД
ОСТРОВОВ УРУП И ЧИРПОЙ**

© 2022 г. А. В. Мартынов^{a, *}, Т. А. Коршунова^{b, **}

^a*Зоологический Музей МГУ, Москва, Россия*

^b*Институт биологии развития им. Н.К.Кольцова РАН, Москва, Россия*

**E-mail: martynov@zmmu.msu.ru*

***E-mail: t.korshunova@idbras.ru*

Поступила в редакцию 30.06.2022 г.

После доработки 19.08.2022 г.

Принята к публикации 26.08.2022 г.

Статья посвящена описанию трех новых видов голожаберных моллюсков из семейства Onchidorididae, собранных в ходе выполнения гидробиологических работ в прибрежных водах островов Уруп и Чирпой в ходе экспедиции “Восточный бастион – Курильская гряда 2021”. Два новых представителя рода *Adalaria* (*A. sergeii* sp. nov., *A. perturni* sp. nov.) и один новый вид рода *Onchidoris* (*O. pavli* sp. nov.) описаны на основе морфологических данных, включая сканирующую электронную микроскопию. В рамках обсуждения новых таксонов дан краткий обзор предшествующих исследований по голожаберным моллюскам Курильских островов. Обсуждается систематическое положение новых таксонов онхидоридид и подчеркивается их значимость для познания биогеографических паттернов морской биоты Арктики и северной части Тихого океана.

Ключевые слова: голожаберные моллюски, биогеография, биологическое разнообразие, Курильские острова, систематика

DOI: 10.31857/S0869607122040036

ВВЕДЕНИЕ

Познание биологического разнообразия – фундаментальная задача для широкого круга эволюционных, таксономических и экологических исследований, а также важнейшая основа природоохранных стратегий [1, 2]. Благодаря большой протяженности и уникальному сочетанию северных и южных элементов, фауна и флора Курильских островов [3] демонстрируют значительное богатство видов и их эндемизм. Недавно Русским географическим обществом была основана долговременная экспедиция “Восточный Бастион–Курильская гряда” [4]. Результаты данной экспедиции закладывают основу для современных исследований биологического разнообразия Курильских островов. В настоящем исследовании мы показываем, как применение современных подходов к изучению биоразнообразия, приводит к прогрессу в понимании морской фауны. В частности, здесь представлены новые данные по фауне и таксономии одной из малоизученных групп беспозвоночных животных Курильских островов – филогенетически значимых, таксономически разнообразных и очень привлекательных с эстетической точки зрения – голожаберных моллюсков.

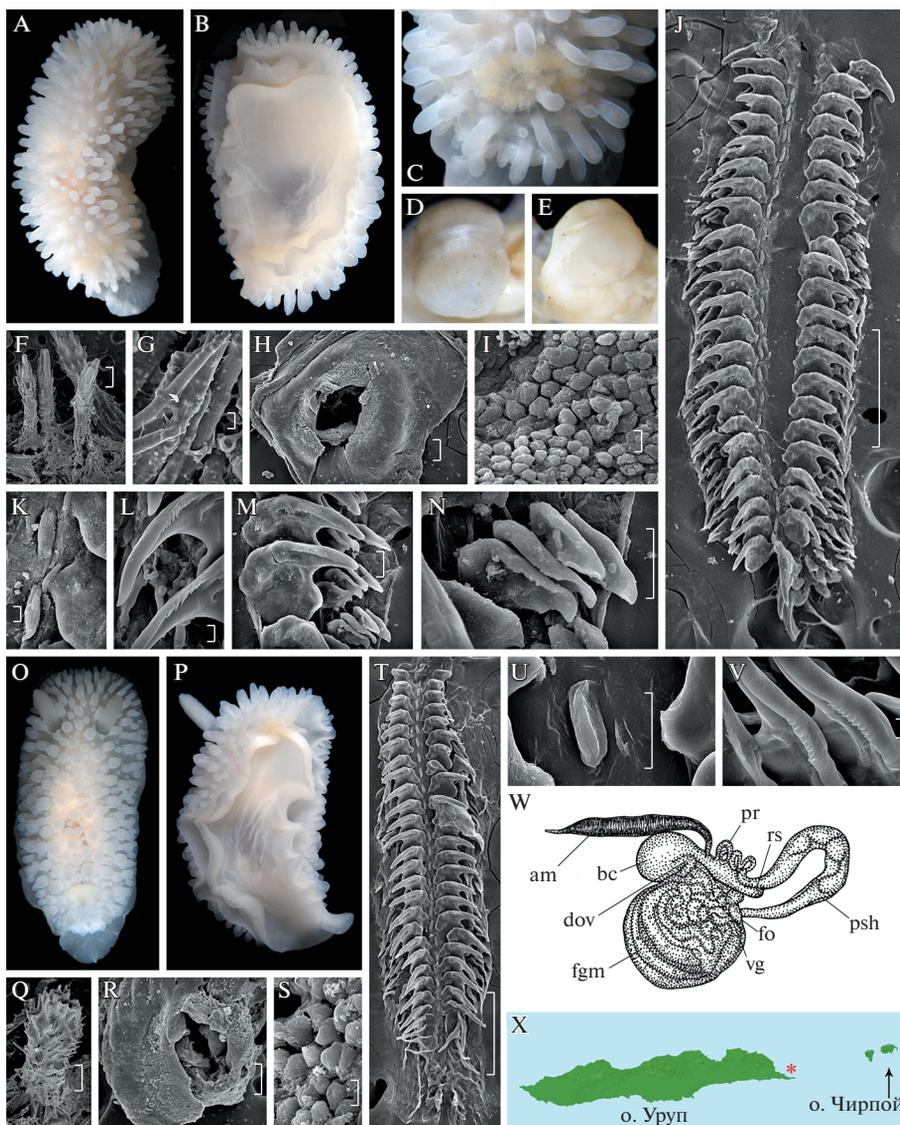
Несмотря на то, что история изучения морской фауны беспозвоночных животных Курильских островов уходит корнями в XVIII век [5], наше предварительное гидробиологическое исследование прибрежных вод островов Уруп и Чирпой в ходе экспедиции “Восточный бастион – Курильская гряда 2021”, выявило существенное, ранее недокументированное биологическое разнообразие различных таксонов беспозвоночных животных, в том числе голожаберных моллюсков. На основе анализа полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа морфологических данных, собранных в ходе экспедиции материалов, было выявлено три новых для науки вида голожаберных моллюсков семейства Onchidorididae.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

В августе–сентябре 2021 года экспедиция Русского географического общества проводилась в акватории одних из самых малоизученных островов Курильской гряды – Уруп и Чирпой. Коллекция морских беспозвоночных животных, в том числе голожаберных моллюсков, была получена авторами статьи при значительной помощи гражданских ученых, техно-дайверов, а также при особой поддержке главного редактора журнала о подводном мире “Нептун”. Исследованные экземпляры были фиксированы этанолом. Внешнюю и внутреннюю морфологию изучали под биноклем с использованием цифровой камеры Nikon D-810 и сканирующих электронных микроскопов. Буккальные структуры были обработаны 10% раствором гипохлорита натрия для извлечения радулы. Радула, лабиальная кутикула и другие структуры были напылены палладиевой смесью, а затем исследованы с помощью сканирующих электронных микроскопов CamScan II, JSM 6380 и QuattroS в Лаборатории электронной микроскопии МГУ. Типовые экземпляры новых видов хранятся в Зоологическом музее

Рис. 1. *Adalaria sergeii* sp. nov. Внешняя и внутренняя морфология голотипа ZMMU Op-810: А– дорсальный вид живой особи; В – вентральный вид живой особи; С – увеличенная область жабр живой особи; D – буккальная помпа (дорсально, световая микроскопия); E – буккальная помпа (латерально, световая микроскопия); F – бугорки нотума (здесь и далее сканирующая электронная микроскопия, масштабная линейка 300 μm); G – спикулы бугорков нотума (30 μm); H – лабиальная кутикула (100 μm); I – элементы лабиальной кутикулы (10 μm); J – радула целиком (300 μm); K – центральный зуб (100 μm); L – первый латеральный зуб, детали, задняя часть радулы (10 μm); M – латеральные зубы, передняя часть радулы (30 μm); N – внешние латеральные зубы (30 μm). Внешняя и внутренняя морфология паратипа ZMMU Op-812: O – дорсальный вид живой особи; P – вентральный вид живой особи; Q – бугорок нотума (300 μm); R – лабиальная кутикула (100 μm); S – элементы лабиальной кутикулы (10 μm); T – радула целиком (100 μm); U – центральный зуб (30 μm); V – первый латеральный зуб, детали, средняя часть радулы (30 μm); W – схема строения половой системы (сокращения: am, ампула; bc, копулятивная бурса; dov, объединенный дистальный овидукт; fgm, железы женской части половой системы; fo, отверстие женской части половой системы; pr, prostate; psh, чехол копулятивного аппарата; rs, семенной рецептакулюм; vg, вагинальный канал); X – карта мест обнаружения данного вида на острове Уруп.

Fig. 1. *Adalaria sergeii* sp. nov. External and internal morphology of the holotype ZMMU Op-810: A – dorsal view (live); B – ventral view (live); C – close up of the gills area; D – buccal pump (dorsal, light microscopy); E – buccal pump (lateral, light microscopy); F – notal tubercles (here scanning electron microscopy, SEM, scale bar 300 μm); G – spicules of the notal tubercles (SEM, 30 μm); H – labial cuticle (SEM, 100 μm); I – elements of the labial cuticle (SEM, 10 μm); J – entire radula (SEM, 300 μm); K – central teeth (SEM, 100 μm); L – first lateral teeth, posterior part of radula (SEM, 10 μm); M – lateral teeth, anterior part of radula (SEM, 30 μm); N – outer lateral teeth (SEM, 30 μm). External and internal morphology of the paratype ZMMU Op-812: O – dorsal view (live); P – ventral view (live); Q – notal tubercle (SEM, 300 μm); R – labial cuticle (100 μm); S – elements of the labial cuticle (SEM, 10 μm); T – entire radula (SEM, 100 μm); U – central teeth (SEM, 30 μm); V – first lateral teeth, middle part of radula (SEM, 30 μm); W – scheme of the reproductive system (am, ampulla; bc, bursa copulatrix; dov, joint distal oviduct and uterine duct; fgm, female glands; fo, female genital opening; pr, prostate; psh, penial sheath; rs, seminal receptacle; vg, vagina); X – map of locations of this species in the coastal waters of the Urup Island.



МГУ (ZMMU). Регистрационный номер статьи в Зообанке (ZooBank): urn:lsid:zoo-bank.org:pub:D962914C-ED31-4514-95D8-3A9835F3FCC4.

СИСТЕМАТИКА

Отряд Doridida

Сем. Onchidorididae Gray, 1827

Род *Adalaria* Bergh, 1879

Adalaria sergeii sp. nov.

Типовой материал. Голотип. ZMMU Op-810, длина 25 мм. Северо-западная часть Тихого океана, Курильские острова, о. Уруп, полуостров Кастрикум, 20–30 м, сборы Татьяны Коршуновой, Сергея Горпинюка и Павла Лапшина, 02.09.2021. **Паратипы.** 2 экз., ZMMU Op-811, длина 13 мм и 15 мм, местонахождение, дата и сборщики те же. 1 экз., ZMMU Op-812, длина 26.7 мм, северо-западная часть Тихого океана, Курильские острова, о. Уруп, полуостров Кастрикум, 20–30 м, сборы Сергея Горпинюка и Павла Лапшина, 27.08.2021. 1 экз. ZMMU Op-813, длина 23 мм, Курильские острова, о. Уруп, полуостров Кастрикум, 20–30 м, сборы Татьяны Коршуновой, Сергея Горпинюка и Павла Лапшина, 02.09.2021. 1 экз., ZMMU Op-814, длина 19 мм, местонахождение то же, сборы Сергея Горпинюка и Павла Лапшина, 27.08.2021.

Этимология. Вид назван в честь Сергея Горпинюка, техно-дайвера, инструктора по дайвингу, который значительно способствовал реализации гидробиологической части экспедиции “Восточный Бастион-Курильская гряда 2021”.

Регистрационный номер вида в Зообанке (ZooBank). urn:lsid:zoobank.org:act:4BCACB64-360F-49C1-823B-D90B756B1149.

Типовое местонахождение. Остров Уруп.

Описание. Внешняя морфология. Длина голотипа 25 мм (рис. 1A).

Длина шести живых экземпляров составляла от 13 до 26.7 мм.

Нотум умеренно широкий, округлый, умеренно мягкий. Пластинки ринофоров в числе 17–19. Нотум густо покрыт удлиненными или более округлыми бугорками. Крупные бугорки регулярно перемежаются с более мелкими. Каждый бугорок содержит плотные пучки обызвествленных спикул, не выступающие через поверхность бугорка у живых особей (рис. 1A, 1C, 1F, 1O, 1Q). Спикулы также образуют сеть под поверхностью нотума. Жаберная полость отсутствует. Двух- и трехперистые жабры в числе до 10 образуют почти полный круг вокруг анального отверстия (рис. 1). Оральный парус крупный, медиально не сращенный с гипонотумом, состоит из двух долей: широкой трапециевидной, с треугольными выступами вверх, и двух уплощенных лопастей ниже (рис. 1B). Нога широкая, спереди закругленная, сзади немного выступает (рис. 1A, 1O).

Окраска. Живые экземпляры молочно-белые, слегка прозрачные, с едва заметным коричневатым кишечником. Белый пигмент на теле почти полностью отсутствует. Красноватая пищеварительная железа просвечивает через дорсальную и вентральную сторону тела.

Анатомия. Пищеварительная система. Буккальная помпа сидячая, полностью опоясана умеренно широкой периферической мышцей (рис. 1D, 1E). Слюнные железы в виде массивных долей. Округлый лабиальный диск покрыт кутикулой с многоугольными элементами (рис. 1H, 1I). Радулярная формула у двух экземпляров (длиной 25 и 26.7 мм): 23–27 × 4–6.1.1.1.6–4 (рис. 1J, 1T). Центральный зуб небольшой, удлиненный, прямоугольный, складчатый (рис. 1K, 1U). Первый латеральный зуб имеет длинное широкое основание и мощный слегка изогнутый клювовидный отросток с 4–9 отчетливыми зубчиками (рис. 1L, 1M, 1V). Внешние латеральные зубы имеют слегка удлиненное основание с изогнутым крючковатым зубцом, в самых передних рядах радуды полностью редуцируются (рис. 1M, 1N).

Репродуктивная система. (рис. 1W). Ампула умеренно длинная и узкая (рис. 1W, am).

Постампулярный канал разделяется на длинный семявыносящий проток и короткий проксимальный овидукт. Мужская часть половой системы состоит из двух отчетливых частей: проксимальной, узкой, извитой простаты (рис. 1W, pr) и дистального более широкого семяпровода, переходящего в чехол копулятивного аппарата, образующей внутри несколько долей (рис. 1W, psh). Овальная бурса среднего размера с короткой широкой ножкой (рис. 1W, bc). Дистальный овидукт широкий, изогнутый (рис. 1W, dov). Вагинальный проток умеренно широкий (рис. 1W, vg), скрыт среди желез (рис. 1W, fgm) женской части половой системы.

Биология. Обитает на каменисто-скалистых грунтах, покрытых несколькими видами корковых мшанок на глубине 20–30 м.

Распространение. В настоящее время известен из типового местонахождения на острове Уруп (рис. 1X), вероятно, распространен более широко на Курильских островах.

Сравнительные замечания. Новый вид наиболее близок к *Adalaria tschuktschica* Krause, 1885 [6–8], от которого отличается более короткой радулой, меньшим количеством внешних латеральных зубов и меньшим числом зубчиков на первом латеральном зубе. Кроме того, подтвержденный ареал *A. tschuktschica* лежит в Арктических морях и прилегающих частях Берингова моря [8], тогда как новый вид пока известен только из района средних Курильских островов (рис. 1X). *Adalaria sergeii* sp. nov. и *Adalaria tschuktschica* внешне отчасти сходны с арктической *A. rossica* Martynov & Korshunova, 2017 и дальневосточной *A. ultima* Martynov & Korshunova, 2017 [9], но существенно отличаются от них радулой с зазубренным изогнутым клювовидным отростком на первых латеральных зубах (в отличие от гладких первых латеральных зубов со спрямленным клювовидным отростком как у *A. rossica* и *A. ultima*), а также меньшим числом внешних латеральных зубов. От других известных видов рода *Adalaria*, новый вид заметно отличается по совокупности внешних и внутренних признаков (см. обзор [8, 9]).

Adalaria neptuni sp. nov.

Типовой материал. Голотип. ZMMU Op-815, длина 21 мм, северо-западная часть Тихого океана, Курильские острова, о. Чирпой, 15–25 м, сборы Татьяны Коршуновой, 24.08.2021. **Паратипы.** 1 экз., ZMMU Op-817, длина 17 мм, северо-западная часть Тихого океана, Курильские острова, о. Чирпой, 15–25 м, сборы Татьяны Коршуновой, 24.08.2021. 1 экз., ZMMU Op-818, длина 15 мм, местонахождение, дата и сборщик тот же.

Этимология. Вид назван в честь журнала о подводном мире “Нептун”, главный редактор которого, Ирина Кочергина, оказала всестороннюю поддержку при подготовке гидробиологических работ для экспедиции “Восточный бастион-Курильская гряда 2021”. Кроме того, гидробиологическая команда экспедиции неформально именовалась “Нептуны”.

Регистрационный номер вида в Зообанке (ZooBank). urn:lsid:zoobank.org:act:27A0D4AF-5E0D-4432-A53A-668D881A1CF6.

Типовое местонахождение. Остров Чирпой.

Описание. Длина трех живых экземпляров составляла от 15 до 21 мм.

Нотум умеренно широкий, округлый, умеренно мягкий (рис. 2A–2C, 2K, 2L). Пластинки ринофоров в числе 12–13. Нотум густо покрыт спинными бугорками особой формы с расширенной дискоидной верхней частью, в которой заметны немного выступающие через поверхность бугорка обызвествленные спикулы (рис. 2A–2C, 2M). Более крупные бугорки регулярно перемежаются с более мелкими. Спикулы также образуют сеть под поверхностью нотума. Жаберная полость отсутствует. Одно- и двухперистые жабры в числе до 15 образуют почти полный круг вокруг анального отверстия (рис. 2A, 2K). Оральный парус крупный, медиально не сращенный с гипонотумом, состоит из двух долей: широкой трапециевидной, с треугольными выступами вверху, и двух уплощенных лопастей ниже (рис. 2B, 2L). Нога широкая, спереди закругленная, сзади немного выступает (рис. 2A).

Окраска. Живые экземпляры желтовато-беловатые, слегка прозрачные. Белый пигмент на теле почти полностью отсутствует. Беловатая гонада и красноватая пищеварительная железа просвечивает через дорсальную и вентральную сторону тела соответственно.

Анатомия. Пищеварительная система. Буккальная помпа сидячая, полностью опоясана умеренно широкой периферической мышцей (рис. 2D, 2E). Слюнные железы в

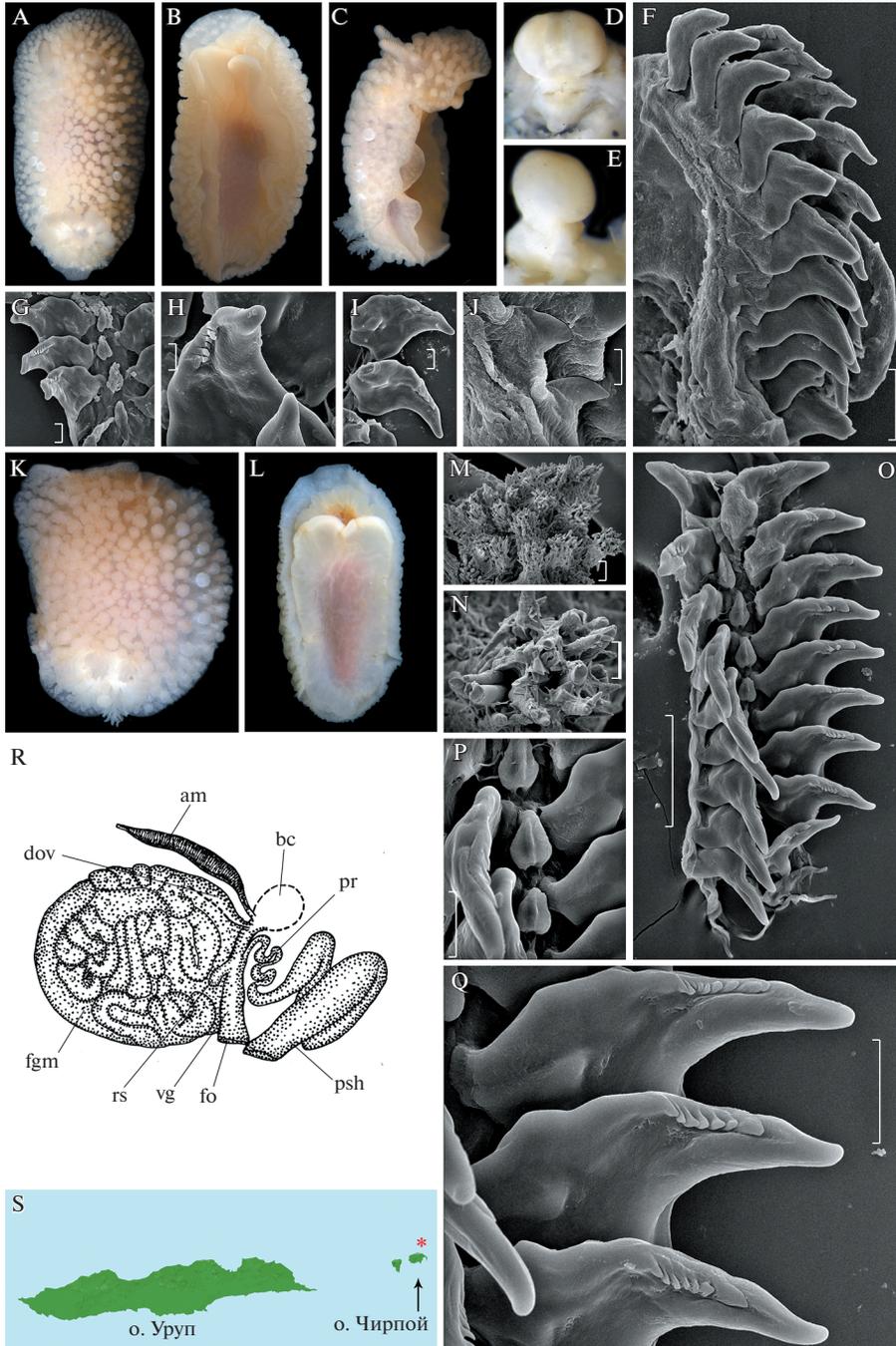


Рис. 2. *Adalaria neptuni* sp. nov. Внешняя и внутренняя морфология голотипа ZMMU Op-815: А – дорсальный вид живой особи; В – вентральный вид живой особи; С – латеральный вид живой особи; D – буккальная помпа (дорсально, световая микроскопия); Е – буккальная помпа (латерально, световая микроскопия); F – радула, передний и средний участки (здесь и далее сканирующая электронная микроскопия, масштабная линейка 50 μm); G – средняя часть радулы с первыми латеральными и крупными центральными зубами (20 μm); H, I – первый латеральный зуб, детали (10 и 20 μm соответственно); J – внешние латеральные зубы: хорошо выраженный второй латеральный и последующие 1–2 рудиментарных латеральных (10 μm). Внешняя и внутренняя морфология паратипа ZMMU Op-818: K – дорсальный вид живой особи; L – вентральный вид живой особи; M – бугорки нотума (300 μm); N – детали спикул в бугорке нотума (100 μm); O – радула, средний и задний участки (100 μm); P – крупные центральные зубы (30 μm); Q – первый латеральный зуб, детали, задняя часть радулы (30 μm); R – схема строения половой системы (сокращения: am, ампула; bc, копулятивная бурса; dov, объединенный дистальный овидукт; fgm, железы женской части половой системы; fo, отверстие женской части половой системы; pr, prostate; psh, чехол копулятивного аппарата; rs, семенной респектакулум; vg, вагинальный канал); S – карта мест обнаружения данного вида на острове Чирпой.

Fig. 2. *Adalaria neptuni* sp. nov. External and internal morphology of the holotype ZMMU Op-815: A—dorsal view of a living individual; B, ventral view of a living individual; C—lateral view of a living individual; D—buccal pump (dorsally, light microscopy); E—buccal pump (lateral, light microscopy); F—radula, anterior and middle regions (herein-after, scanning electron microscopy, scale bar 50 μm); G—middle part of the radula with first lateral and large central teeth (20 μm); H, I—first lateral tooth, details (10 and 20 μm, respectively); J—external lateral teeth: well-pronounced second lateral and subsequent 1–2 rudimentary lateral teeth (10 μm). External and internal morphology of the paratype ZMMU Op-818: K—dorsal view of a living individual; L, ventral view of a living individual; M—tubercles of notum (300 μm); N, details of spicules in tubercle of notum (100 μm); O—radula, middle and building sections (100 μm); P—large central teeth (30 μm); Q—first lateral tooth, details, posterior part of the radula (30 μm); R—scheme of the structure of the reproductive system (abbreviations: am, ampulla; bc, copulatory bursa; dov, joint distal oviduct and uterine duct; fgm, glands of the female part of the reproductive system; fo, opening of the female part of the reproductive system; pr, prostate; psh, penial sheath with ejaculatory duct; rs, seminal receptacle; vg, vaginal canal); S—map of locations of this species in the coastal waters of the Chirpoy Island.

виде массивных долей. Округлый лабиальный диск покрыт кутикулой с многоугольными элементами. Радула (рис. 2F, 2O) имеет формулу 23–28 × 1–3.1.1.1.3–1 у двух экземпляров (длиной 15 и 21 мм). Центральный зуб очень крупный для онхидоридид, необычной овально-треугольной формы, с срединным гребнем (рис. 2P). Первый латеральный зуб имеет длинное широкое основание и очень короткий прямой клювовидный отросток с 2–7 отчетливыми зубчиками, при этом краевой зубчик может быть заметно крупнее остальных (рис. 2O, 2Q). Наружные латеральные зубы имеют слегка удлинненное основание, последующие очень сильно редуцированы, вероятно, не более трех в числе (рис. 2F, 2J).

Репродуктивная система (рис. 2R). Ампула умеренно длинная и узкая (рис. 2R, am).

Постампулярный проток разделяется на семявыносящий проток и проксимальный овидукт. Мужская часть половой системы состоит из двух обособленных частей: проксимальной, узкой, извитой простаты (рис. 2R, pr) и дистального более широкого отдела, переходящего в чехол копулятивного аппарата, доли внутри не заметны (рис. 2R, psh). Овальная бурса среднего размера с короткой широкой ножкой (рис. 2R, bc). Дистальный овидукт заметно обособлен, веретеновидный (рис. 2R, dov). Вагинальный проток умеренно широкий, частично скрыт среди желез женской части половой системы (рис. 2R, vg).

Биология. Обитает на каменисто-скалистых грунтах, покрытых несколькими видами корковых мшанок на глубине 15–25 м.

Распространение. В настоящее время известен только из типового местонахождения на острове Чирпой (рис. 2S), вероятно, распространен более широко в прибрежных водах Курильских островов.

Сравнительные замечания. Новый вид несколько сходен с *Adalaria olgae* Martynov et al., 2009 с побережья Камчатки [8], но существенно отличается от него особым строением бугорков нотума (с заметно расширенной верхней частью у нового вида, рис. 2А–2С, 2М), окраской (беловато-желтоватая у нового вида и яркая лимонно-желтая у *A. olgae*), и, особенно, строением радулы. В частности, внешние латеральные зубы нового вида значительно редуцированы (рис. 2F, 2J) в сравнении с большинством видов рода *Adalaria*, включая *A. olgae*, тогда как мощный центральный зуб нового вида заметно отличается от большинства видов онхидоридид (рис. 2Р). Нет каких-либо других таксонов семейства Onchidorididae (см. обзор [8, 9]), которые были бы сходны по внешним или внутренним признакам с новым видом. *Adalaria evincta* Millen, 2006 известная с побережья Канады [10], характеризуется мощной “короной” выступающих на поверхности бугорков спикул, но в остальном, включая строение радулы, существенно отличается у нового вида. Таким образом, описание вида с таким уникальным сочетанием признаков представляет важную веху в исследовании голожаберных моллюсков Курильских островов.

Род *Onchidoris* Blainville, 1816

Onchidoris pavli sp. nov.

Типовой материал. Голотип. ZMMU Op-819, длина 9 мм, северо-западная часть Тихого океана, Курильские острова, о. Уруп, полуостров Кастрикум, 20–25 м, сборы Татьяны Коршуновой, Александра Мартынова, 02.09.2021. **Паратипы.** 1 экз., ZMMU Op-820, длина 6 мм, местонахождение, дата и сборщики те же.

Этимология. Вид назван в честь Павла Лапшина, техно-дайвера, инструктора по дайвингу, который значительно способствовал реализации гидробиологической части экспедиции “Восточный Бастион-Курильская гряда 2021”.

→

Рис. 3. *Onchidoris pavli* sp. nov. Внешняя морфология голотипа ZMMU Op-819: А – дорсальный вид живой особи; В – вентральный вид живой особи; С – латеральный вид живой особи; D – вентральный вид живой особи, детали орального паруса. Внешняя и внутренняя морфология паратипа ZMMU Op-820: E – дорсальный вид живой особи; F – вентральный вид живой особи; G – буккальная помпа (дорсально, световая микроскопия); H – буккальная помпа (дорсо-латерально, световая микроскопия); I – бугорки нотума (здесь и далее сканирующая электронная микроскопия, масштабная линейка 200 μm); J – лабиальная кутикула (20 μm); K – лабиальная кутикула, детали (10 μm); L – радула, средний и задний участки (50 μm); M – полуряд радулы с деталями центральных, первых латеральных и вторых латеральных зубов (10 μm); N – схема строения половой системы (сокращения: am, ампула; bc, копулятивная бурса; dov, объединенный дистальный овидукт; fgm, железы женской части половой системы; fo, отверстие женской части половой системы; pr, prostate; psh, чехол копулятивного аппарата; rs, семенной рецептакулюм; vg, вагинальный канал); O – карта мест обнаружения данного вида на острове Уруп.

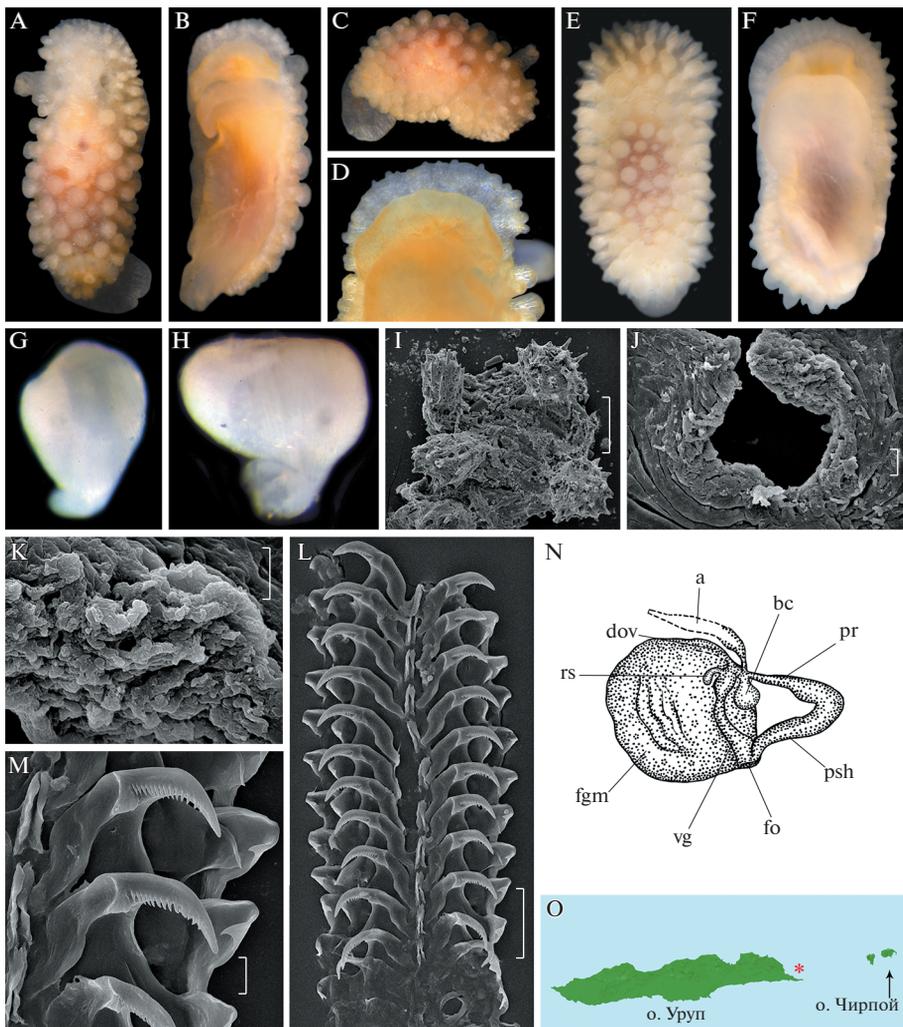
Fig. 3. *Onchidoris pavli* sp. nov. External and internal morphology of the holotype ZMMU Op-819: A, dorsal view of a living individual; B, ventral view of a living individual; C - lateral view of a living individual; D, ventral view of a living individual, details of the oral sail. External and internal morphology of the paratype ZMMU Op-820: E, dorsal view of a living individual; F, ventral view of a living individual; G, buccal pump (dorsally, light microscopy); H – buccal pump (dorso-lateral, light microscopy); I, tubercles of notum (hereinafter, scanning electron microscopy, scale bar 200 μm); J, labial cuticle (20 μm); K, labial cuticle, details (10 μm); L, radula, middle, and building areas (50 μm); M, semi-row of the radula with details of the central, first lateral, and second lateral teeth (10 μm); N - diagram of the structure of the reproductive system (abbreviations: am, ampulla; bc, copulatory bursa; dov, joint distal oviduct and uterine duct; fgm, glands of the female part of the reproductive system; fo, opening of the female part of the reproductive system; pr, prostate; psh, penial sheath with ejaculatory duct; rs, seminal receptacle; vg, vaginal canal); O – map of locations of this species in the coastal waters of the Urup Island.

Регистрационный номер вида в Зообанке (ZooBank). urn:lsid:zoobank.org:act:V34FF248-12A1-44FB-BCA2-8166AC431DCE.

Типовое местонахождение. Остров Уруп.

Описание. Внешняя морфология. Длина голотипа 9 мм (рис. 3А–3Д),

длина паратипа 6 мм. Нотум умеренно широкий, жесткий, округлый спереди и сзади. Около шести ринофоральных пластинок. Нотум густо покрыт крупными округлыми или несколько удлиненными бугорками, обызвествленные спикулы могут немного выступать над поверхностью бугорков (рис. 3С, 3I). Крупные бугорки преобладают на нотуме, среди крупных разбросаны мелкие бугорки. Спикулы образуют очень плотную сеть, просвечивающую сквозь поверхность нотума. Жаберная полость отсутствует. До девяти одно- или двухперистых жабр образуют почти полный круг вокруг



анального отверстия. Оральный парус полукруглый (рис. 3В, 3D, 3F). Нога широкая, спереди закругленная и утолщенная, сзади не выступает (рис. 3А, 3В).

Окраска. Живые экземпляры желтоватые. Постжаберная железа не заметна.

Анатомия. Пищеварительная система. Буккальная помпа полностью опоясана умеренно широкой периферической мышцей (рис. 3G, 3H). Округлый лабиальный диск покрыт кутикулой с гранулированными элементами (рис. 3J, 3K). Радула (рис. 3L) паратипа имеет формулу $31 \times 1.1.1.1.1$. Центральный зуб прямоугольный и складчатый (рис. 3M). Первый латеральный зуб имеет длинное, широкое основание и почти прямой клювовидный отросток с 11–14 зубцами (рис. 3L, 3M). Вторые латеральные зубы представляют собой прямоугольные пластинки с направленным вниз зубчиком (рис. 3M).

Репродуктивная система. (рис. 3N). Амбула узкая (рис. 3N, am). Постампулярный проток разделяется на семявыносящий проток и проксимальный овидукт. Простата относительно широкая (рис. 3N, pr), расширяется в чехол копулятивного аппарата (рис. 3N, psh). Овальная бурса (рис. 3N, bc) переходит в дистальную часть овидукта (рис. 3N, dov). Семенной рецептакулюм небольшой, удлинённый (рис. 3N, rs). Вагинальный канал умеренно узкий и удлинённый (рис. 3N, vg), частично скрыт среди желез женской части половой системы (рис. 3N, fgm).

Биология. Обитает на каменисто-скалистых грунтах, покрытых несколькими видами корковых мшанок на глубине 20–25 м.

Распространение. В настоящее время известен только из типового местонахождения на острове Уруп (рис. 3O).

Сравнительные замечания. Новый вид отчасти сходен с *Onchidoris expectata* Martynov & Korshunova, 2017, недавно описанного из прибрежных вод Камчатки и острова Матуа [9], но отличается от него присутствием более крупных или более удлинённых бугорков нотума, а также меньшим числом зубчиков на первом латеральном зубе. От широко распространенного *Onchidoris muricata* (Müller, 1776) также отличается формой бугорков нотума. От *Onchidoris macropompa* Martynov et al., 2009 [8] новый вид отличается наличием зубчиков на первом латеральном зубе и более крупными бугорками нотума (рис. 3А, 3Е, 3I).

ОБСУЖДЕНИЕ

Курильские острова представляют собой цепь из более чем 50 вулканических островов в северо-западной части Тихого океана с разнообразной фауной и флорой, включая богатую фауну беспозвоночных животных [например, 3, 11–17].

История таксономического изучения голожаберных моллюсков Курильских островов началась еще в 1743 г., когда Георг Вильгельм Стеллер во время короткого исследовательского плавания обнаружил крупного голожаберного моллюска *Tritonia tetraquetra* (Pallas, 1788) [5], таксономическое и филогенетическое положение которого было установлено лишь недавно [18]. Однако, несмотря на столь раннее начало таксономических исследований голожаберных моллюсков Курил, последующее описание нового вида голожаберных моллюсков, обнаруженного на Курильских островах, появилось лишь во второй половине XX века [19]. До 21 века не публиковалось никаких таксономических ревизий или описаний новых видов голожаберных моллюсков с Курильских островов, хотя некоторые экземпляры были собраны во время различных советских экспедиций в период с 1930 по 1980 год. Отчасти это было вызвано тем, что, несмотря на ряд гидробиологических экспедиций, посетивших Курильские острова, особенно в 60–80-е годы [11, 20, 21], их недостаточные технические возможности и ориентация на количественные исследования, не смогли должным образом задокументировать разнообразие голожаберных моллюсков. Помимо этого, в августе 1991 года один из авторов статьи (А.М.) посетил с исследовательскими целями один из самых южных Курильских островов, остров Кунашир, и собрал несколько видов литораль-

ных голожаберных моллюсков. В дальнейшем планировалось продолжить детальное изучение голожаберных моллюсков Курильских островов с помощью судовых экспедиций, но почти полный развал научной инфраструктуры в России в 90-е годы задержал эти исследования на долгие годы. Разрозненная информация по заднежаберным и голожаберным моллюскам ряда музеев и учреждений, была обобщена и включена в ряд фаунистических списков, иллюстрированных каталогов и книг [22–25]. На основе морфологического изучения ранее собранных материалов с Курильских островов, была опубликована первая таксономическая ревизия курильских голожаберных моллюсков [26], а также выделено новое семейство *Akiodorididae* [27].

Таким образом, несмотря на успехи в изучении голожаберных моллюсков Курильских островов по ранее собранным материалам, до самого последнего времени не проводилось специальных детальных исследований по курильским голожаберным моллюскам, и их фауна во многом оставалась загадкой [28]. После пионерных экспедиций на остров Матуа на Средних Курилах в 2016–2017 гг., появились первые данные [29] с использованием подхода многоуровневого разнообразия организмов [30, 31]. На основе морфологических и молекулярных данных было показано, что ранее заявленные амфибореальные виды на Курильских островах, на самом деле являются отдельными видами, например *Borealea sanamyanae* Korshunova et al., 2017 [32]. В 2021 году с небольшого курильского острова Матуа были описаны пять новых видов голожаберных моллюсков рода *Cuthonella* [29]. Также эта работа включает данные для решения давней таксономической проблемы вида *Cuthonella punicea* (Millen, 1986) из канадской части Тихого океана [33]. В 2020 году с о. Матуа были описаны новые виды голожаберных моллюсков родов *Akiodoris* [34] и *Cadlina* [35].

К настоящему времени опубликован ряд обобщающих работ по фауне голожаберных и заднежаберных моллюсков морей России, включая обзоры, аннотированные списки [36–39], иллюстрированный каталог [23] и монографию [25]. Однако в связи с постоянным притоком нового материала, и вовлечением в систематическую работу новых молекулярно-генетических методов исследования, состав фауны голожаберных моллюсков российских морей постоянно пополняется, а уже описанные таксоны подвергаются ревизиям [32, 33, 40–47]. Несколько новых видов из семейства *Onchidorididae*, а также новый род *Onchimira* недавно были описаны из Дальневосточных и Арктических морей России [8, 9]. Все это свидетельствует в пользу необходимости в регулярной публикации обновленных обзоров фауны.

В данной работе, семейство *Onchidorididae* удалось пополнить двумя новыми видами из рода *Adalaria* и одним новым видом рода *Onchidoris* (рис. 1–3). Необходимо отметить, что новые виды демонстрируют таксономические и биогеографические связи с другими арктическими и дальневосточными представителями *Onchidorididae*. Так, описанная в настоящем сообщении *Adalaria sergeii* sp. nov. (рис. 1), сходна с *Adalaria tschuktschica*, ареал которой ограничен арктическими морями и прилегающими частями Берингова моря [6–9], тогда как *Onchidoris pavli* sp. nov. (рис. 3) близок к *Onchidoris expectata*, который известен от Камчатки до Курильского острова Матуа [9]. Наконец, *Adalaria neptuni* sp. nov. (рис. 2) демонстрирует некоторое сходство с *Adalaria olgae* [8], обитающей в прибрежных водах Камчатского полуострова. Новые данные могут быть использованы не только для расширения знаний о фауне голожаберных моллюсков морей России, но и для оценки биогеографических связей морской фауны Арктики и северной части Тихого океана.

БЛАГОДАРНОСТИ

Полевые работы на Курильских островах в 2021 году проводились в рамках экспедиции Русского географического общества. Мы искренне благодарны организаторам и участникам экспедиции, и в первую очередь Антону Юрманову и Анатолию Калембергу. Особая благодарность главному редактору журнала о подводном мире “Нептун” Ирине Кочергиной за всестороннюю

поддержку наших гидробиологических работ и предоставление оборудования. Без профессиональной помощи техно-дайверов и инструкторов по дайвингу Сергея Горпинюка (Москва) и Павла Лапшина (Йошкар-Ола) во время экспедиции, результаты гидробиологических работ на Курильских островах были бы менее эффективными. Лаборатории электронной микроскопии МГУ выражается благодарность за поддержку в области сканирующей электронной микроскопии. Работа выполнена при поддержке проекта ИБР РАН № 0088-2021-0019, исследовательского проекта Зоомузея МГУ 18-1-21 № 121032300105-0 и поддержана Благотворительным фондом В.Потанина, конкурс “Музей 4.0” программы “Музей без границ”, проект “РеДНКарнация музейных коллекций”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Johnson C.N., Balmford A., Brook B.W., Buettel J.C., Galetti M., Guangchun L., Wilmschurst, J.M. Biodiversity losses and conservation responses in the Anthropocene // *Science*. 2021. V. 356. P. 270–275.
<https://doi.org/10.1126/science.aam9317>
2. Heberling J.M., Miller J.T., Noesgaard D., Weingart S.B., Schigel D. Data integration enables global biodiversity synthesis // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017. V. 118. P. e2018093118.
<https://doi.org/10.1073/pnas.201809311>
3. Котляков В.М., Бакланов П.Я., Комедчинов Н.Н. (ред.). Атлас Курильских островов. Владивосток: ДИК, 2009. 516 с.
4. Восточный бастион – Курильская гряда (2021). <https://www.rgo.ru/en/projects/expeditions/eastern-bastion-kuril-ridge>
5. Pallas P.S. *Marina varia nova et rariora* // *Nova Acta Academia Scientiarum Imperialis Petropolitanae*. 1788. V. 2. P. 229–250.
6. Krause A. Ein Beitrag zur Kenntniss der Mollusken-Fauna des Beringsmeeres. II. Gastropoda und Pteropoda // *Archiv für Naturgeschichte*. 1885. V. 51. P. 256–302.
7. Рогинская И.С. *Arctadalaria septentrionalis* gen. n., sp. n. (Onchidorididae) – новый голожаберный моллюск из моря Лаптевых // *Зоологический журнал*. 1971. V. 50. P. 1154–1157.
8. Martynov A.V., Korshunova T.A., Sanamyan N., Sanamyan K. Description of the first cryptobranch onchidoridid *Onchimira cavifera* gen. et sp. nov., and of three new species of the genera *Adalaria* Bergh, 1879 and *Onchidoris* Blainville, 1816 (Nudibranchia: Onchidorididae) from Kamchatka waters // *Zootaxa*. 2009. V. 2159. P. 1–43.
9. Martynov A.V., Korshunova T.A. World’s northernmost and rarely observed Nudibranchs: three new Onchidoridid species (Gastropoda: Doridida) from Russian seas // *Zootaxa*. 2017. V. 4299. P. 391–404.
<https://doi.org/10.11646/zootaxa.4299.3.5>
10. Millen S.V. A new species of *Adalaria* (Nudibranchia: Onchidorididae) from the Northeastern Pacific // *Proceedings of the California Academy of Sciences*. 2006. V. 57. P. 357–364.
11. Kussakin O.G. Isopoda from the coastal zone of the Kurile Islands. I. Janiridae and Jaeropsidae from Urup Island // *Crustaceana. Suppl.* 1972. V. 3. P. 155–165.
12. Кусакин О.Г. Литоральные сообщества дальневосточных морей СССР // *Закономерности распространения и экологии прибрежных морских биоценозов*. Leningrad: Nauka, 1978. P. 181–184.
13. Klovach N., Leman V., Gordeev I. The relative importance of enhancement to the production of salmon on Iturup Island (Kuril Islands, Russia) // *Revue Aquaculture*. 2021. V. 13. P. 664–675.
<https://doi.org/10.1111/raq.12493>
14. Санамян К.Э., Санамян Н.П. (ред). Фауна и флора острова Матуа (средние Курильские острова). Том 1. Море. Череповец: Интрон, 2020. 496 с.
15. Gjesfeld E., Etnier M.A., Takase K., Brown W.A., Fitzhugh, B. Biogeography and adaptation in the Kuril Islands, Northeast Asia // *World Archaeology*. 2020. V. 51. P. 429–453.
16. Iurmanov A., Popov I. A refuge for threatened sea grasses (*Zostera asiatica* Miki and *Phyllospadix iwatensis* Makino) at the islands Iturup and Urup of Kuril archipelago // *Research Square* (preprint). 2022.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-265664/v1>
17. Romanov A.A., Koblik E.A., Red'kin Y.A., Kojemyakina R.V., Yakovlev V.O., Murashev I.A. Landscape and ecological differentiation of the fauna and bird population of Urup Island (Big Kuril Ridge) // *Contemporary Problems of Ecology*. 2021. V. 14. P. 99–111.
<https://doi.org/10.1134/S1995425521020098>
18. Korshunova T.A., Martynov A.V. Consolidated data on the phylogeny and evolution of the family Tritoniidae (Gastropoda: Nudibranchia) contribute to genera reassessment and clarify the taxonomic status of the neuroscience models *Tritonia* and *Tochuina* // *PLoS ONE*. 2020. V. 15: e0242103.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242103>

19. *Рогинская И.С.* Новый глубоководный вид Tritoniidae (Opisthobranchia, Nudibranchia, Dendronotacea) с континентального склона Курильских островов // Труды Института океанологии им. Ширшова. 1984. Т. 119. С. 99–105.
20. *Шитиков А.М., Лукин В.И.* Макробентос сублиторали некоторых островов Большой Курильской гряды как источник кормовой базы калана. Труды ВНИРО. 1971. С. 217–238.
21. *Kussakin O.G., Chavtur V.G.* Hydrobiological investigations of the Russian Academy of Sciences in the Far-Eastern Seas after the Second World War. 2. Investigations of Far-Eastern Institutes // Russian Journal of Marine Biology. 2000. V. 26. P. 137–150.
22. *Martynov A.V.* “Group” Acochliidae, clades Sacoglossa and Nudipleura // Y.I. Kantor, A.V. Sysoev (Eds.), Catalogue of Molluscs of Russia and Adjacent Countries. Moscow: KMK Scientific Press Ltd, 2005. P. 175–192.
23. *Martynov A.V.* Nudipleura // Y.I. Kantor, A.V. Sysoev (Eds.), Marine and brackish water Gastropoda of Russia and adjacent countries: an illustrated catalogue. Moscow: KMK Scientific Press Ltd., 2006. P. 267–294.
24. *Martynov A.V.* Clade Nudipleura. Explorations of the fauna of the seas // Check-list of species of free-living invertebrates of the Russian Far Eastern seas. 2013. V. 83. P. 167–169.
25. *Мартынов А.В., Коришунова Т.А.* Заднежаберные моллюски морей России. Иллюстрированный атлас с обзором биологии. Москва: Фитон, 2011. 231 с.
26. *Мартынов А.В., Баранец О.М.* Ревизия рода *Colga* Bergh (Opisthobranchia, Polyceridae), с описанием нового вида из северной части Тихого океана // Ruthenica. 2002. V. 12. P. 23–43.
27. *Millen S.V., Martynov A.V.* Redescriptions of the nudibranch genera *Akiodoris* Bergh, 1879 and *Armodoris* Minichev, 1972 with description of a new species of *Akiodoris* and description of new family Akiodorididae // Proceedings California Academy Science. 2005. V. 56. P. 1–22.
28. *Korshunova T.A., Martynov A.V.* Increased information on biodiversity from the neglected part of the North Pacific contributes to the understanding of phylogeny and taxonomy of nudibranch molluscs. Canadian Journal of Zoology. 2022. V. 100. P. 428–443.
29. *Korshunova T.A., Sanamyan N.P., Sanamyan K.E., Bakken T., Lundin K., Fletcher K., Martynov A.V.* Biodiversity hotspot in cold waters: a review of the genus *Tuthonella* with descriptions of seven new species (Mollusca, Nudibranchia) // Contribution to Zoology. 2021. 90. P. 216–283. <https://doi.org/10.1163/18759866-bja10017>
30. *Korshunova T.A., Picton B., Furfaro G., Mariottini P., Pontes M., Prkić J., Fletcher K., Malmberg K., Lundin K., Martynov A.V.* Multilevel fine-scale diversity challenges the ‘cryptic species’ concept // Scientific Reports. 2019. V. 9. P. 1–23. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42297-5>
31. *Korshunova T., Driessen F., Picton B., Martynov A.* The multilevel organismal diversity approach decipherers difficult to distinguish nudibranch species complex // Scientific Reports. 2021. V. 11. P. 18323. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242103>
32. *Korshunova T.A., Martynov A.V., Bakken T., Evertsen J., Fletcher K., Mudianta I.W., Saito H., Lundin K., Schrödl M., Picton B.* Polyphyly of the traditional family Flabellinidae affects a major group of Nudibranchia: aeolidacean taxonomic reassessment with descriptions of several new families, genera, and species (Mollusca, Gastropoda) // ZooKeys. 2017. V. 717. P. 1–139. <https://doi.org/10.3897/zookeys.717.21885>
33. *Millen S.V.* Northern, primitive tergipedid nudibranchs, with a description of a new species from the Canadian Pacific // Canadian Journal of Zoology. 1986. V. 64. P. 1356–1362.
34. *Мартынов А.В., Коришунова Т.А.* Голожаберные моллюски отрядов Doridida и Nudibranchia // Санамян К.Э., Санамян Н.П. (ред.) Фауна и флора острова Матуа (средние Курильские острова). Том 1. Море. Череповец: Интрон, 2020. С. 172–195.
35. *Korshunova T.A., Fletcher K., Picton B., Lundin K., Kashio S., Sanamyan N., Sanamyan K., Padula V., Schrödl M., Martynov A.V.* The Emperor *Cadlina*, hidden diversity and gill cavity evolution: new insights for taxonomy and phylogeny of dorid nudibranchs (Mollusca: Gastropoda) // Zoological Journal Linnean Society. 2020. V. 189. P. 762–827. <https://doi.org/10.1093/zoolinnean/zlz126>
36. *Мартынов А.В.* Заднежаберные моллюски Командорских островов с замечаниями о фауне в дальневосточных морях России // Ржавский А. (ред.) Донная фауна и флора шельфа Командорских островов. Владивосток: Дальнаука, 1997. С. 230–241.
37. *Мартынов А.В.* Подкласс Opisthobranchia // Адрианов А.В., Кусакин О.Г. (ред.), Таксономический каталог биоты залива Петра Великого. Владивосток: Дальнаука, 1998. С. 204–209.
38. *Мартынов А.В.* Заднежаберные моллюски северо-западной части Японского моря с замечаниями по систематике отряда Nudibranchia. Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук. С-Петербург: Зоологический институт РАН, 1999. 424 с.
39. *Мартынов А.В.* Nudibranchia // Сиренко Б.И. (ред.), Список видов свободноживущих беспозвоночных морей Евразийский морей Арктики и сопредельных акваторий. С-Петербург: Зоологический институт РАН, 2001. С. 109–110.

40. Millen S.V. The nudibranch genera *Onchidoris* and *Diaphorodoris* (Mollusca, Opisthobranchia) in the northeastern Pacific // *The Veliger*. 1985. V. 28. P. 80–93.
41. Martynov A., Fujiwara Y., Tsuchida S., Nakano R., Sanamyan N., Sanamyan K., Fletcher K. & Korshunova T. Three new species of the genus *Dendronotus* from Japan and Russia (Mollusca, Nudibranchia). *Zootaxa*. 2020. V. 4747. P. 495–513.
<https://doi.org/10.11646/zootaxa.4747.3.4>
42. Millen S.V. The nudibranch genus *Adalaria*, with a description of a new species from the Northeastern Pacific // *Canadian Journal of Zoology*. 1987. V. 65. P. 2696–2702.
43. Мартынов А.В., Санамян Н.П., Коршунова Т.А. Обзор фауны заднежаберных моллюсков дальневосточных морей России Review: Pleurobranchomorpha, Doridida and Nudibranchia. Бюллетень Камчатского Государственного Технологического Университета. 2015. V. 34. P. 62–87.
44. Мартынов А.В. Заднежаберные моллюски (Gastropoda, Opisthobranchia) семейства Eubranchidae: таксономическая структура и два новых вида из Японского моря // Зоологический журнал. 1998. V. 77. P. 763–777.
45. Korshunova T.A., Martynov A.V., Picton B.E. Ontogeny as an important part of integrative taxonomy in tergipedid aeolidaceans (Gastropoda: Nudibranchia) with a description of a new genus and species from the Barents Sea. *Zootaxa*. 2017. V. 4324. P. 1–22.
<https://doi.org/10.11646/zootaxa.4324.1.1>
46. Hallas J.M., Gosliner T.M. Family matters: the first molecular phylogeny of the Onchidorididae Gray, 1827 (Mollusca, Gastropoda, Nudibranchia). *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 2015. V. 88. P. 16–27.
47. Korshunova T.A., Bakken T., Grøtan, V., Johnson K., Lundin K., Martynov A.V. A synoptic review of the family Dendronotidae (Mollusca: Nudibranchia): a multilevel organismal diversity approach. *Contribution to Zoology*. 2020. V. 90. P. 93–153.
<https://doi.org/10.1163/18759866-bja10014>

New Species of Nudibranch Molluscs of the Family Onchidorididae Collected During Expedition “Eastern Bastion-Kurile Ridge 2021” from Coastal Waters of the Islands Urup and Chirpoy

A. V. Martynov^{1, *} and T. A. Korshunova^{2, **}

¹*Zoological Museum of the Moscow State University, Moscow, Russia*

²*N.K. Koltzov Institute of the Developmental Biology RAS, Moscow, Russia*

*E-mail: martynov@zmmu.msu.ru

**E-mail: t.korshunova@idbras.ru

Abstract—Three new species of the nudibranch family Onchidorididae are described applying the materials collected during expedition of the Russian Geographic Society “Eastern Bastion-Kurile Ridge 2021” from the coastal waters of the islands Urup and Chirpoy. *Adalaria sergeii* sp. nov., *Adalaria neptuni* sp. nov. и *Onchidoris pavli* sp. nov. are described on the basis of morphological data, including scanning electron microscopy. History of studies the nudibranch molluscs of Kurile Islands is briefly reviewed. The systematic position of new taxa is discussed and their importance for understanding the biogeographic patterns of the marine biota of the Arctic and North Pacific is highlighted.

Keywords: nudibranch molluscs, biological diversity, the Kuril Islands, biogeography, taxonomy

REFERENCES

1. Johnson C.N., Balmford A., Brook B.W., Buettel J.C., Galetti M., Guangchun L., Wilmschurst, J.M. Biodiversity losses and conservation responses in the Anthropocene // *Science*. 2021. V. 356. P. 270–275.
<https://doi.org/10.1126/science.aam9317>
2. Heberling J.M., Miller J.T., Noesgaard D., Weingart S.B., Schigel D. Data integration enables global biodiversity synthesis // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017. V. 118. P. e2018093118.
<https://doi.org/10.1073/pnas.201809311>
3. Kotlyakov V.M., Baklanov P.Ya. and Komedchinov N.N. (eds). Atlas Kuril'skikh ostrovov (Atlas of the Kuril Islands), Vladivostok: DIK, 2009. 516 p.

4. Eastern Bastion – Kuril Ridge expedition. Accessed through. <https://www.rgo.ru/en/projects/expeditions/eastern-bastion-kuril-ridge>.
5. Pallas P.S. *Marina varia nova et rariora* // *Nova Acta Academia Scientiarum Imperialis Petropolitanae*. 1788. V. 2. P. 229–250.
6. Krause A. Ein Beitrag zur Kenntniss der Mollusken-Fauna des Beringsmeeres. II. Gastropoda und Pteropoda // *Archiv für Naturgeschichte*. 1885. V. 51. P. 256–302.
7. Roginskaya I.S. *Arctadalaria septemtrionalis* gen. n., sp. n. (Onchidorididae) – a new nudibranch mollusc from the the Laptev Sea // *Zoologicheskyy Zhurnal*. 1971. V. 50. P. 1154–1157.
8. Martynov A.V., Korshunova T.A., Sanamyan N., Sanamyan K. Description of the first cryptobranch onchidoridid *Onchimiria cavifera* gen. et sp. nov., and of three new species of the genera *Adalaria* Bergh, 1879 and *Onchidoris* Blainville, 1816 (Nudibranchia: Onchidorididae) from Kamchatka waters // *Zootaxa*. 2009. V. 2159. P. 1–43.
9. Martynov A.V., Korshunova T.A. World’s northernmost and rarely observed Nudibranchs: three new Onchidoridid species (Gastropoda: Doridida) from Russian seas // *Zootaxa*. 2017. V. 4299. P. 391–404. doi: 10.11646/zootaxa.4299.3.5
10. Millen S.V. A new species of *Adalaria* (Nudibranchia: Onchidorididae) from the Northeastern Pacific // *Proceedings of the California Academy of Sciences*. 2006. V. 57. P. 357–364.
11. Kussakin O.G. Isopoda from the coastal zone of the Kurile Islands. I. Janiridae and Jaeropsidae from Urup Island // *Crustaceana. Suppl.* 1972. V. 3. P. 155–165.
12. Kussakin O.G. Intertidal communities of the Far-Eastern Seas of the USSR. In: Regularities of distribution and ecology of coastal marine biocenosis. Leningrad: Nauka, 1978. P. 181–184.
13. Klovach N., Leman V., Gordeev I. The relative importance of enhancement to the production of salmon on Iturup Island (Kuril Islands, Russia) // *Revue Aquaculture*. 2021. V. 13. P. 664–675. <https://doi.org/10.1111/raq.12493>
14. Sanamyan K.E., Sanamyan N.P. (eds). *Fauna and flora of Matua Island (middle Kuril Islands)*. V. 1. Sea. Cherepovetz: Intron, 2020. 496 c.
15. Gjesfjeld E., Etnier M.A., Takase K., Brown W.A., Fitzhugh, B. Biogeography and adaptation in the Kuril Islands, Northeast Asia // *World Archaeology*. 2020. V. 51. P. 429–453.
16. Iurmanov A., Popov I. A refuge for threatened sea grasses (*Zostera asiatica* Miki and *Phyllospadix iwatensis* Makino) at the islands Iturup and Urup of Kuril archipelago // *Research Square* (preprint). 2022. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-265664/v1>
17. Romanov A.A., Koblik E.A., Red’kin Y.A., Kojemyakina R.V., Yakovlev V.O., Murashev I.A. Landscape and ecological differentiation of the fauna and bird population of Urup Island (Big Kuril Ridge) // *Contemporary Problems of Ecology*. 2021. V. 14. P. 99–111. <https://doi.org/10.1134/S1995425521020098>
18. Korshunova T.A., Martynov A.V. Consolidated data on the phylogeny and evolution of the family Tritoniidae (Gastropoda: Nudibranchia) contribute to genera reassessment and clarify the taxonomic status of the neuroscience models *Tritonia* and *Tochuina* // *PLoS ONE*. 2020. V. 15: e0242103. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242103>
19. Roginskaya I.S. A new species of deep-sea Tritoniidae (Opisthobranchia, Nudibranchia, Dendro-notacea) from the slope of Kurile Islands. *Transactions Shirshov Institute of Oceanology Academy of Science USSR*. 1984. V. 119. P. 99–105.
20. Shitikov A.M., Lukin V.I. Macrobenthos of the subtidal zone of some islands in the Great Kuril Ridge as a source base for sea otter. *Trudy VNIRO*. 1971. P. 217–238.
21. Kussakin O.G., Chavtur V.G. Hydrobiological investigations of the Russian Academy of Sciences in the Far-Eastern Seas after the Second World War. 2. Investigations of Far-Eastern Institutes // *Russian Journal of Marine Biology*. 2000. V. 26. P. 137–150.
22. Martynov A.V. “Group” Acochliidae, clades Sacoglossa and Nudipleura // Yu.I. Kantor, A.V. Sysoev (Eds.), *Catalogue of Molluscs of Russia and Adjacent Countries*. Moscow: KMK Scientific Press Ltd, 2005. P. 175–192.
23. Martynov A.V. Nudipleura // Yu.I. Kantor, A.V. Sysoev (eds), *Marine and brackish water Gastropoda of Russia and adjacent countries: an illustrated catalogue*. Moscow: KMK Scientific Press Ltd., 2006. P. 267–294.
24. Martynov A.V. Clade Nudipleura. Explorations of the fauna of the seas // *Check-list of species of free-living invertebrates of the Russian Far Eastern seas*. 2013. V. 83. P. 167–169.
25. Martynov A.V., Korshunova T.A. Opisthobranch molluscs of the seas of Russia. A colour guide to their taxonomy and biology. Moscow: Fiton, 2011. 231 p.
26. Martynov A.V., Baranets O.N. A revision of the genus *Colga* Bergh (Opisthobranchia, Polyceridae), with description of a new species from the North Pacific // *Ruthenica*. 2002. V. 12. P. 23–43.
27. Millen S.V., Martynov A.V. Redescriptions of the nudibranch genera *Akiodoris* Bergh, 1879 and *Armodoris* Minichev, 1972 with description of a new species of *Akiodoris* and description of new family Akiodorididae // *Proceedings California Academy Science*. 2005. V. 56. P. 1–22.
28. Korshunova T.A., Martynov A.V. Increased information on biodiversity from the neglected part of the North Pacific contributes to the understanding of phylogeny and taxonomy of nudibranch molluscs. *Canadian Journal of Zoology*. 2022. V. 100. P. 428–443.
29. Korshunova T.A., Sanamyan N.P., Sanamyan K.E., Bakken T., Lundin, K., Fletcher K., Martynov A.V. Biodiversity hotspot in cold waters: a review of the genus *Cuthonella* with descriptions of seven new

- species (Mollusca, Nudibranchia) // Contribution to Zoology. 2021. 90. P. 216–283.
<https://doi.org/10.1163/18759866-bja10017>
30. Korshunova T.A., Picton B., Furfaro G., Mariottini P., Pontes M., Prkić J., Fletcher K., Malmberg K., Lundin K., Martynov A.V. Multilevel fine-scale diversity challenges the 'cryptic species' concept // Scientific Reports. 2019. V. 9. P. 1–23.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-42297-5>
 31. Korshunova T., Driessen F., Picton B., Martynov A. The multilevel organismal diversity approach deciphers difficult to distinguish nudibranch species complex // Scientific Reports. 2021. V. 11. P. 18323.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242103>
 32. Korshunova T.A., Martynov A., Bakken T., Evertsen J., Fletcher, K., Mudianta I.W., Saito H., Lundin K., Schrödl M., Picton B. Polyphyly of the traditional family Flabellinidae affects a major group of Nudibranchia: aeolidacean taxonomic reassessment with descriptions of several new families, genera, and species (Mollusca, Gastropoda) // ZooKeys. 2017. V. 717. P. 1–139.
<https://doi.org/10.3897/zookeys.717.21885>
 33. Millen S.V. Northern, primitive tergipedid nudibranchs, with a description of a new species from the Canadian Pacific // Canadian Journal of Zoology. 1986. V. 64. P. 1356–1362.
 34. Мартынов А.В., Коршунова Т.А. Голожаберные моллюски отрядов Doridida и Nudibranchia // Санамян К.Э., Санамян Н.П. (ред.). Фауна и флора острова Матуа (средние Курильские острова). Том 1. Море. Череповец: Интрон, 2020. С. 172–195.
 35. Korshunova T.A., Fletcher K., Picton B., Lundin K., Kashio S., Sanamyan N., Sanamyan K., Padula V., Schrödl M., Martynov A.V. The Emperor *Cadlina*, hidden diversity and gill cavity evolution: new insights for taxonomy and phylogeny of dorid nudibranchs (Mollusca: Gastropoda) // Zoological Journal Linnean Society. 2020. V. 189. P. 762–827.
<https://doi.org/10.1093/zoolinnean/zlzl26>
 36. Мартынов А.В. Opisthobranch gastropods at the Commander Islands with remark on their fauna of the Russian Far Eastern Seas // Rzhavsky A.V. (ed.), Benthic flora and fauna of the shelf zone of the Commander Islands. Vladivostok: Dalnauka Press, 1997. P. 230–241.
 37. Martynov A.V. Subclassis Opisthobranchia // Adrianov A.V., Kussakin O.G. (ed.), Taxonomic catalogue of biota of Peter the Great Bay. Vladivostok: Dalnauka, 1998. С. 204–209.
 38. Martynov A.V. Nudibranch molluscs of North-West part of the Sea of Japan with discussion on taxonomy and phylogeny of the order Nudibranchia. Ph.D. thesis. St. Petersburg: Zoological Institute RAS, 1999. 424 p.
 39. Martynov A.V. Nudibranchia. // Sirenko B.I. (ed.), List of species of free-living invertebrates of Eurasian Arctic Seas and adjacent. St. Petersburg: Zoological Institute RAS, 2001. P. 109–110.
 40. Millen S.V. The nudibranch genera *Onchidoris* and *Diaphorodoris* (Mollusca, Opisthobranchia) in the northeastern Pacific // The Veliger. 1985. V. 28. P. 80–93.
 41. Martynov A., Fujiwara Y., Tsuchida S., Nakano R., Sanamyan N., Sanamyan K., Fletcher K. & Korshunova T. Three new species of the genus *Dendronotus* from Japan and Russia (Mollusca, Nudibranchia). Zootaxa. 2020. V. 4747. P. 495–513.
<https://doi.org/10.11646/zootaxa.4747.3.4>
 42. Millen S.V. The nudibranch genus *Adalaria*, with a description of a new species from the Northeastern Pacific // Canadian Journal of Zoology. 1987. V. 65. P. 2696–2702.
 43. Martynov A.V., Sanamyan N.P., Korshunova T.A. Review of the opisthobranch mollusc fauna of Russian Far Eastern seas: Pleurobranchomorpha, Doridida and Nudibranchia // Bulletin Kamchatka Technical University. 2015. V. 34. P. 62–87.
 44. Martynov A.V. Opisthobranch molluscs (Gastropoda, Opisthobranchia) of the family Eubranchidae: the taxonomic composition and two new species from the Sea of Japan // Zoologicheskyy Zhurnal. 1998. V. 77. P. 763–777.
 45. Korshunova T.A., Martynov A.V., Picton B.E. Ontogeny as an important part of integrative taxonomy in tergipedid aeolidaceans (Gastropoda: Nudibranchia) with a description of a new genus and species from the Barents Sea. Zootaxa. 2017. V. 4324. P. 1–22.
<https://doi.org/10.11646/zootaxa.4324.1.1>
 46. Hallas J.M., Gosliner T.M. Family matters: the first molecular phylogeny of the Onchidorididae Gray, 1827 (Mollusca, Gastropoda, Nudibranchia). Molecular Phylogenetics and Evolution. 2015. V. 88. P. 16–27.
 47. Korshunova T.A., Bakken T., Grøtan V., Johnson K., Lundin K., Martynov A.V. A synoptic review of the family Dendronotidae (Mollusca: Nudibranchia): a multilevel organismal diversity approach. Contribution to Zoology. 2020. V. 90. P. 93–153.
<https://doi.org/10.1163/18759866-bja10014>