



ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ

Журнал освещает теоретические и прикладные проблемы изучения природных вод: формирование водных ресурсов и управление ими, динамику водной среды, качество и охрану вод, гидрохимические и гидроэкологические процессы в водных объектах.



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Том 51, номер 2, 2024

Водные ресурсы и режим водных объектов

Приливное устье реки Варзуги (Российская Субарктика): первые сведения о зимнем гидрологическом режиме

П. Н. Терский, С. Л. Горин, Е. Д. Панченко, А. М. Алабян, Н. Д. Ахмерова, А. Н. Василенко, В. А. Иванов, Е. А. Крастьинь, Ж. М. Куликова, Д. А. Мигунов, А. А. Попрядухин, М. О. Фатхи, М. А. Харламов

145

Использование дистанционных методов подводных исследований для выявления элементов и моделирования структуры донных ландшафтов залива Хаукайсенлахти (остров Кухка, Ладожское озеро)

Д. С. Дудакова, В. М. Анохин, М. О. Дудаков, М. И. Орлова

157

Гидрохимия, гидробиология, экологические аспекты

Изменчивость изотопно-кислородного состава реки Яузы в пределах города Москвы в 2019–2021 гг. под влиянием снеготаяния и сильных дождей

Ю. К. Васильчук, Н. А. Буданцева

170

Иркутское водохранилище: история создания и гидрохимические исследования водотоков и заливов

И. Б. Воробьева, Н. В. Власова, И. А. Белозерцева, А. Н. Воробьев

179

Биологическая индикация загрязнения реки Урал по результатам исследования зообентоса летом 2022 г.

А. В. Гончаров, Д. М. Палатов, Н. Л. Фролова, В. О. Полянин, В. А. Исаев, Э. Х. Кудяков

191

Фтор в водах гиперсоленых водоемов (Мертвое море, озеро Урмия)

А. В. Савенко, В. С. Савенко

208

Гидрохимическая характеристика разнотипных озер Большого Соловецкого острова

К. В. Титова, Н. М. Кокрятская, С. С. Попов, О. Ю. Морева, А. А. Слобода, С. И. Климов, В. М. Быков, Н. С. Прилуцкая

214

Вертикальное распределение микропластика в водной толще Ладожского озера

Д. А. Тихонова, С. Г. Каретников, Е. В. Иванова, Е. П. Шалунова

225

УДК 556.51

ПРИЛИВНОЕ УСТЬЕ РЕКИ ВАРЗУГИ (РОССИЙСКАЯ СУБАРКТИКА): ПЕРВЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЗИМНЕМ ГИДРОЛОГИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ¹

© 2024 г. П. Н. Терский^{a, c, *}, С. Л. Горин^b, Е. Д. Панченко^{a, d}, А. М. Алабян^d,
Н. Д. Ахмерова^d, А. Н. Василенко^d, В. А. Иванов^d, Е. А. Крастынь^d, Ж. М. Куликова^{c, d},
Д. А. Мигунов^{c, d}, А. А. Попрядухин^d, М. О. Фатхи^c, М. А. Харламов^a

^aИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

^bВсероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Москва, 105187 Россия

^cГосударственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва, 119034 Россия

^dМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, 119991 Россия

*e-mail: pavel_tersky@mail.ru

Поступила в редакцию 17.08.2023 г.

После доработки 19.10.2023 г.

Принята к публикации 25.10.2023 г.

На основе данных экспедиции, проведенной зимой 2020 г. в устье р. Варзуги (Терский берег Белого моря), а также с использованием сведений, полученных авторами в устьях других рек Белого моря (Мезень, Онега, Умба, Кянда, Тамиза и Кузрека), — показано, что для нижнего течения Варзуги характерно сильное влияние морских приливов, которое выражается в соответствующих колебаниях уровня, а также в периодическом возникновении обратных (приливных) течений и интрузии осолоненных вод. В связи с этим представлены характеристики перечисленных явлений и обсуждаются влияющие на них факторы (рельеф русла, речной сток, приливы и лед).

Ключевые слова: приливное устье, Варзуга, зимний гидрологический режим, смешение речных и морских вод, Белое море, экспедиционные исследования.

DOI: 10.31857/S0321059624020019 **EDN:** CISZQN

ВВЕДЕНИЕ

Варзуга — вторая по размеру река, протекающая в южной части Кольского п-ова, имеющая большое значение для региона Белого и Баренцева морей. С одной стороны, в ее бассейне воспроизводится одна из крупнейших и наиболее сохранных естественных популяций атлантических лососей. С другой стороны, в непосредственной близости от ее устья находится д. Кузомень, имеющая большую историческую и культурную ценность.

Первые гидрологические исследования на р. Варзуге были проведены еще в XIX в. [12]. Спустя сто лет (в 1933 г.) Ленинградское отделение Гидроэнергопроекта выполнило рекогносцировку реки на всем ее протяжении от устья до верховьев [2, 15]. В 1936 г. совместная экспедиция Всесоюз-

ного института озерного и речного рыбного хозяйства (ВНИОРХ) и Зоологического института АН СССР описала геологическое строение берегов, химический состав, характер донных отложений и донную фауну Варзуги и ее притоков [2, 15]. В 1960 г. Мурманское УГМС провело гидрологическое обследование устьевых участков 27 водотоков между д. Кузомень и пос. Умба, включая устье Варзуги. В 1980–1990-х гг. в нижнем течении Варзуги (д. Кузомень) выполнялась серия изысканий, посвященных вопросам берегоукрепления и лесомелиорации по закреплению нестабильных песков [7]. В 2000-х гг. в районе устья Варзуги проводились работы, посвященные динамике морского побережья Терского берега [3, 14], а также русловым процессам в нижнем течении реки [7]. С 1930-х гг. до настоящего времени в бассейне реки проводятся биологические исследования, в первую очередь направленные на изучение местной популяции семги (например, [11]).

Несмотря на относительно большое количество и разнообразие экспедиций, проводимых

¹ Экспедиция проведена при финансовой поддержке и в рамках госзадания кафедры Гидрологии суши и при поддержке НСО Географического факультета и за счет спонсорских средств частных лиц.

в бассейне Варзуги за почти два века исследований, гидрологический режим ее нижнего течения, подверженного влиянию приливов и сгонно-нагонных явлений, до недавнего времени оставался неизученным. Лишь в работе [7] есть некоторые сведения о таковом для летнего периода. Сведения о зимнем режиме приливного устья р. Варзуги отсутствовали.

Настоящая статья посвящена результатам экспедиции в устье Варзуги, которая проходила 28.01.2020–02.02.2020. Ее цель заключалась в исследовании основных закономерностей гидрологического режима устьевой области реки в зимний период. В это же время исследовались устья рек Умбы и Кузреки, и некоторая часть этих результатов вошла в эту статью. Данная работа продолжила цикл зимних исследований в устьевых областях рек Белого моря, проводимых сотрудниками и студентами кафедры гидрологии суши Географического факультета МГУ, а также сотрудниками ГОИН и ВНИРО. Ранее авторами были исследованы устья больших рек Онеги и Мезени, а также малых рек Тамицы и Кянды [5, 16].

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Общие сведения

Варзуга берет начало в центральной части Кольского п-ова, течет в южном направлении и впадает в Белое море. Длина реки составляет 254 км, площадь водосбора — 9840 км². Крупнейшие притоки: Пана, Пятка, Серга и Кица. Река Кица впадает в Варзугу в пределах ее устьевой области, в 4.5 км от устьевого створа. Бассейн Варзуги заболочен, на его поверхности находится ряд небольших озер.

Единственный действующий гидрологический пост (г.п.) на реке расположен в 27 км от ее устьевого створа (в с. Варзуга). Он действует с 1935 г., замыкает водосбор площадью 7940 км². По данным наблюдений, на нем среднегодовой расход воды Варзуги за период 1936–2020 гг. составил 84.5 м³/с, при этом с 1981 г. наблюдается многоводный период со среднегодовым расхо-

дом воды 91.9 м³/с. Внутригодовое распределение стока соответствует Восточно-Европейскому типу водного режима рек по классификации Б.Д. Зайкова: для Варзуги характерны низкая устойчивая зимняя межень, высокое весеннее половодье и низкая летне-осенняя межень, прерываемая относительно небольшими дождевыми паводками [7]. Зимняя межень продолжается 120–130 дней. Минимальный сток воды приходится на февраль–март и составляет 24–25 м³/с. Период ледостава в среднем начинается во второй половине октября — начале ноября, заканчивается в конце апреля — начале мая. Толщина льда в русле реки ко второй половине зимы в среднем достигает 60–70 см (на г.п. Варзуга). Торосы, трещины и полыньи встречаются только на протяжении нескольких километров в нижней части устьевого участка реки, наиболее активно подверженных влиянию приливов. Выше устьевой области ледяной покров сплошной.

Зимние исследования в 2020 г. охватили нижнее течение Варзуги и ее устье на 27-километровом участке от устьевого створа до с. Варзуга. На участке 27–21 км от устьевого створа в русле реки находится каскад порогов, препятствующих распространению приливных и нагонных колебаний уровня воды. Речное русло здесь однорукавное, шириной от 100 до 300 м. На участке 21–8 км русло реки разветвлено цепью островов, его ширина постепенно увеличивается сверху вниз по течению от 300 до ≥800 м. Ниже, на участке 8–0 км, находится воронкообразный эстуарий, ширина которого в нижней части достигает 1 км. Русло здесь однорукавное, образовано затопленной слабоизвилистой русловой ложбиной и обширными песчано-илистыми мелководьями, часть которых в малую воду обсыхает. Летом на фарватере реки на участке 15–8 км глубины меняются от 0.9 до 2.7 м в отлив и от 1.2 до 3.7 м в прилив; на участке 8–0 км — от 1.6 до 4.7 м в отлив и от 2.7 до 5.8 м в прилив [7]. Устье реки частично блокировано от моря обширной косой. В этом месте русло резко сужается, образуя горловину шириной ~200 м с глубинами >6 м. Устьевое взморье Варзуги прикрыто от моря затапливаемыми в приливную фазу песчаными косами, которые выступают от устьевой горловины в сторону моря на 500–700 м.

Варзуга впадает в Белое море. Раньше в непосредственной близости от ее устья работали морские посты “Кашкаранцы” и “Чаваньга” (~40 км соответственно к западу и востоку от устья). В настоящее время ближайший действующий пост находится в губе Умбе (~120 км к западу от устья Варзуги). Помимо прочего, на нем проводятся ежечасные наблюдения за уровнем воды по мареографу. В прилегающей части моря наибольшие колебания уровня связаны с приливами, максимальные величины которых на взморье Варзуги достигают 2.0 м [1, 4]. В Белом море значительный вклад в суммарные колебания уровня воды вносят сгоны и нагоны, величины которых в Кандалакшском заливе в среднем за многолетний период оцениваются в 0.3 и 0.5 м соответственно [1, 4]. Максимальные измеренные величины сгонов и нагонов в Кандалакшском заливе составили 0.7 и 1.1 м соответственно [1, 4]. Для пунктов “Кашкаранцы” и “Чаваньга” диапазон колебаний уровня моря за многолетний период составляет 3.7 и 2.8 м соответственно [4].

Гидрометеорологические условия в период экспедиции

По данным метеостанции в с. Варзуга, во время экспедиции температура воздуха менялась от -25.5°C до -9.4°C (при норме в январе и феврале $\sim -8^{\circ}\text{C}$), высота снежного покрова составляла 71–75 см. Ветер был слабым (до 2 м/с), преимущественно с северных румбов.

По данным г.п. Варзуга, расположенном в с. Варзуга, в январе 2020 г. расходы воды в реке находились в пределах $50\text{--}55\text{ м}^3/\text{с}$ и были значительно выше своей среднеемноголетней нормы для января ($31.9\text{ м}^3/\text{с}$ в 1981–2020 гг.). 30.01.2020 расход воды составил $42.8\text{ м}^3/\text{с}$. Поскольку зима в 2019–2020 гг. в северных районах Европейской части России началась позже своих климатических сроков, ледостав на р. Варзуге установился лишь в конце декабря – начале января, т. е. более чем на месяц позже нормы. В результате этого толщина речного льда к моменту начала экспедиции не достигла своих среднеемноголетних величин.

По данным Мурманского УГМС, в январе 2020 г. неустойчивый характер погоды затянул

процесс установления ледостава и нарастания толщины льда на реках Мурманской области. Установление ледостава на реках завершилось в последних числах декабря – начале января, т. е. примерно на месяц позже среднеемноголетних дат. Нижний участок эстуария (0–2 км от устьевого створа) покрылся льдом только после сильного похолодания 02.02.2020. В море в период работ был плавучий лед. В непосредственной близости от устья р. Варзуги отмечались припай и навалы льда на подводных отмелях устьевого бара.

Прибрежная часть Белого моря была свободна ото льда: лишь в непосредственной близости от устья реки периодически появлялись скопления плавучего льда. Приливы на устьевом взморье в период экспедиции составляли 1.1–1.5 м.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В течение полевых работ измерялись следующие гидрологические характеристики (рис. 1):

– уровень и температура воды на пяти автономных постах (0, 4, 9.5, 15, 19.5 км от устья реки с геодезической привязкой к условной системе высот);



Рис. 1. Нижнее течение р. Варзуги на космоснимке (Google Earth): H, T, S – места установки автоматических приборов, измеряющих уровень, температуру и соленость воды соответственно; T, S, V – полусуточная станция с измерением скорости, температуры и солености воды (рейдовая вертикаль); Q – места измерения расходов воды; 1–8 – пункты экспедиционных наблюдений от устьевого створа; 9 – гидрологический пост р. Варзуга – с. Варзуга.

- соленость и температура воды на четырех автономных постах (0, 2, 4, 7 км от устья реки);
- глубина русла и толщина льда по фарватеру реки на участке от 2 до 15 км от устья (через каждые 0.5 км);
- температура и соленость воды через каждые 0.5 км вдоль фарватера реки в пределах зоны проникновения осолоненных вод (гидрологические съемки);
- скорость и направление течения, температура и соленость воды по глубине в течение одного приливного цикла в 4.5 км от устья (рейдовая станция);
- расход воды в р. Кице.

Наблюдения за уровнем воды. В пределах устьевой области р. Варзуги было организовано 5 уровневых постов (в 0, 4, 9.5, 15 и 19.5 км от устьевого створа). Они были оборудованы автономными регистраторами гидростатического давления и температуры воды “StarOddi” и “Keller”, установленными на дне (рис. 1). Интервал записи составлял 5 мин, точность измерения давления — 1–2 см водяного столба. Результаты измерений самописца (суммарное давление столба воды и атмосферного давления) корректировались по данным об атмосферном давлении с метеостанции “Кашкаранцы” путем вычитания из ряда суммарного давления ряда атмосферного давления, полученного по данным [17].

Геодезические работы проводились для привязки регистраторов уровня воды к единой (условной) системе высот. Для этого были использованы приемники глобальной навигационной спутниковой системы “Javad” и EFT в режиме “статика”.

Стационарные наблюдения за соленостью и температурой воды выполнялись с помощью четырех автономных регистраторов температуры и солености воды “StarOddi”, установленных на расстояниях 0, 2, 4 и 7 км от устьевого створа (рис. 1). Приборы устанавливались таким образом, что их измерениями была охвачена вся зона смешения.

Гидрологические съемки проводились для исследования зоны смешения в полную и малую воду. Для этого использовался зонд “YSI 600” с датчиками глубины, температуры и солености

воды. В реке и эстуарии съемки проводились по фарватеру с продольным шагом 500 м. Съемки проводились два дня с частичным захватом циклов полной и малой воды. Участок начала съемки был задан в районе устьевого створа (~400 м в сторону моря в малую воду и 500 м во время полной воды). Движение было направлено от устья вверх по течению приблизительно по линии фарватера. В полную воду съемка велась до момента достижения участка границы вод с соленостью <1 епс, которая принималась за границу зоны смешения. На устьевом взморье измерения выполнялись с берега. Шаг зондирования по вертикали составлял 0.5–1 м. Всего состоялось 3 съемки — одна в низкие малые и две в высокие полные воды.

Измерение скоростей и направлений течений проводилось на полусуточной станции в центре эстуария (рис. 1). При этом использовался акустик-доплеровский профилограф течений “Teledyne RiverRay ADCP” с применением программного обеспечения WinRiver II и SxS Pro. Общая продолжительность измерений составила ~12 ч (от низких малых до высоких полных вод) с интервалом 30–60 мин. Измерениями была охвачена вся толща воды от поверхности до дна.

Расход воды р. Кицы измерен гидрометрическим способом (скорость—площадь) с использованием гидрологической вертушки “Valeport”. Створ измерений был выбран выше области влияния приливов. Расходы воды р. Варзуги (г.п. Варзуга) предоставлены Росгидрометом (ГМС “Умба”).

Ледомерная съемка проводилась на участке 0–15 км от устьевого створа реки по поперечным створам, размещенным через каждые 500 м вдоль оси потока. На створах измерения толщины льда выполнялись в трех-четыре точки, одна из которых была на фарватере, а другие — справа и слева от него на расстоянии ~50 м друг от друга.

Таблицы предвычисленных приливов, содержащие данные о ежечасных уровнях воды для устья р. Варзуги, предоставлены ГОИНОм.

Положение линии фарватера определено по данным о промерах глубин, выполненным И.В. Крыленко летом 2016 г. [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Приток речной воды

По данным Мурманского УГМС, расход воды р. Варзуги на г.п. Варзуга 30.01.2020 составил $42.8 \text{ м}^3/\text{с}$ [16]. Согласно измерениям в настоящем исследовании, расход воды в р. Кице в тот же день составил $8.3 \text{ м}^3/\text{с}$. Таким образом, суммарный приток речной воды в устьевую область р. Варзуги 30.01.2020 составил $51.1 \text{ м}^3/\text{с}$.

Ледяной покров

Согласно данным спутниковых снимков с ресурса Planet.com [18], 28.01.2020 на устьевом взморье р. Варзуги образовался припай льда, при этом в море наблюдались дрейфующие льдины. 02.02.2020 после сильного похолодания устьевая область полностью покрылась льдом.

Ледомерная съемка показала следующее. На участке 0–2 км от устьевого створа лед либо отсутствовал, либо имел настолько малую толщину, что работать на нем было невозможно. На участке 0–6 км лед был толщиной 15–30 см, на 7–12 км – от 40 до 60 см; на 13–15 км – 35–55 см (в отдельных местах <30 см – скорее всего, над гребнем речного переката).

Керн льда, выпиленный в районе д. Кузоmeni (4.5 км от устьевого створа), имел четырехслойную структуру. Верхний слой, 2–3 см – мутный снеговой лед; 3–10 см – непрозрачный лед с большим количеством пузырьков воздуха; 10–16 см – мутный кристаллический лед без включений; внизу, 16–23 см – прозрачный кристаллический лед.

Трансформация приливной волны

В январе 2020 г. приливные колебания распространялись по р. Варзуге до 19.5 км от ее устья (рис. 2). Выше этого места находятся пороги, которые служат естественным пределом проникновения приливов. Приливная волна при своем движении по эстуарию и устьевому участку реки взаимодействует с встречным речным потоком, льдом, а также русловым рельефом. В резуль-

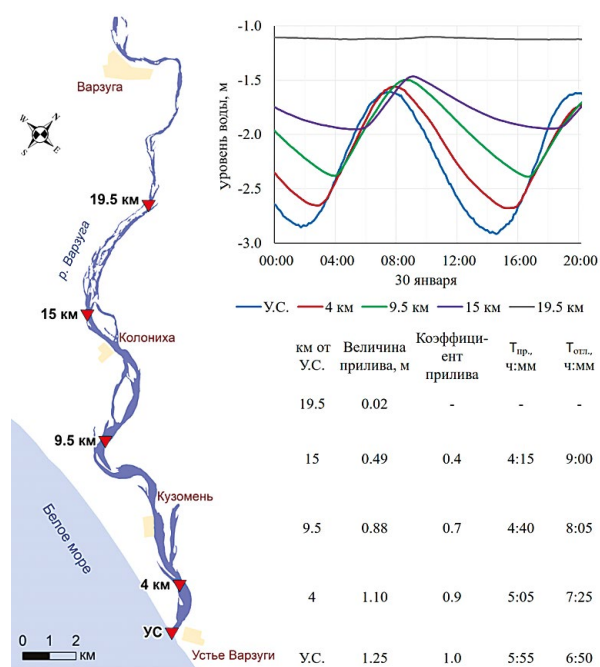


Рис. 2. Трансформация приливной волны в нижнем течении р. Варзуги 30.01.2020: УС – устьевой створ р. Варзуги; $T_{пр}$ – продолжительность приливной фазы; $T_{отл}$ – продолжительность отливной фазы.

тате этого величина приливов последовательно уменьшалась (рис. 2). При этом нарастала асимметрия волны (время приливной фазы уменьшалось, а время отливной фазы увеличивалось) и происходил ее сдвиг вправо (рис. 2). В 15 км от устья полные воды (ПВ) наступали на 1.5 ч позже, а малые воды (МВ) – почти на 4 ч позже таковых в устье (рис. 2).

Проникновение осолоненных вод

Наблюдения показали, что морская вода проникала в эстуарий р. Варзуги с каждым приливом (дважды в сутки). Наибольшая дальность проникновения осолоненных вод, определенная по предельному положению изогалины 1 епс, составила ~7.5 км (рис. 3).

На приливе осолоненные воды распространялись вверх по эстуарию в виде клина со средней скоростью движения фронтальной поверхности (~1.3 км/ч). В полные воды водная толща в основании клина была хорошо перемешана, а на его дистали наблюдалась выраженная стратификация (рис. 3). После наступления полных вод движение клина еще некоторое время про-

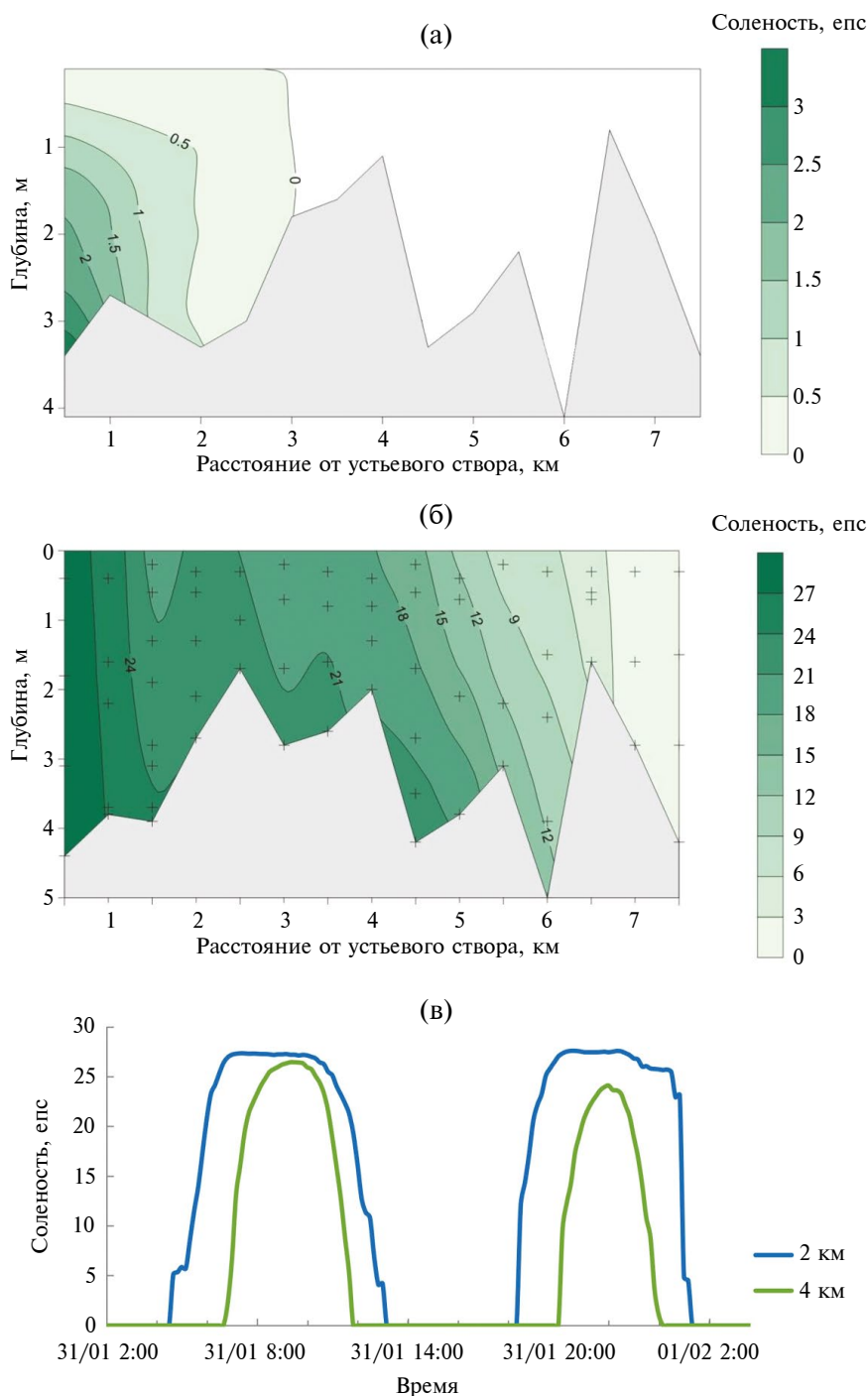


Рис. 3. Продольный профиль солености в период малой (а) и полной (б) воды; график придонной солености воды в створах на фарватере в 2 и 4 км от устьевго створа (на рис. 1 пункты 2 и 3 соответственно) (в) в эстуарии р. Варзуги 31.01.2020–01.02.2020 (знаками “+” помечены точки измерения солености).

должалось в придонном слое, хотя в большей части водной толщи течение уже поворачивало в сторону моря. В это время по всей протяженности зоны смешения наблюдалась наибольшая стратификация. В отлив осолоненные воды сбрасывались в море. Ко времени наступления

малых вод эстуарий почти полностью заполнялся пресной водой.

Около устьевго створа осолоненные воды присутствовали постоянно: в отлив соленость здесь снижалась до 2–3 епс, а в прилив она повы-

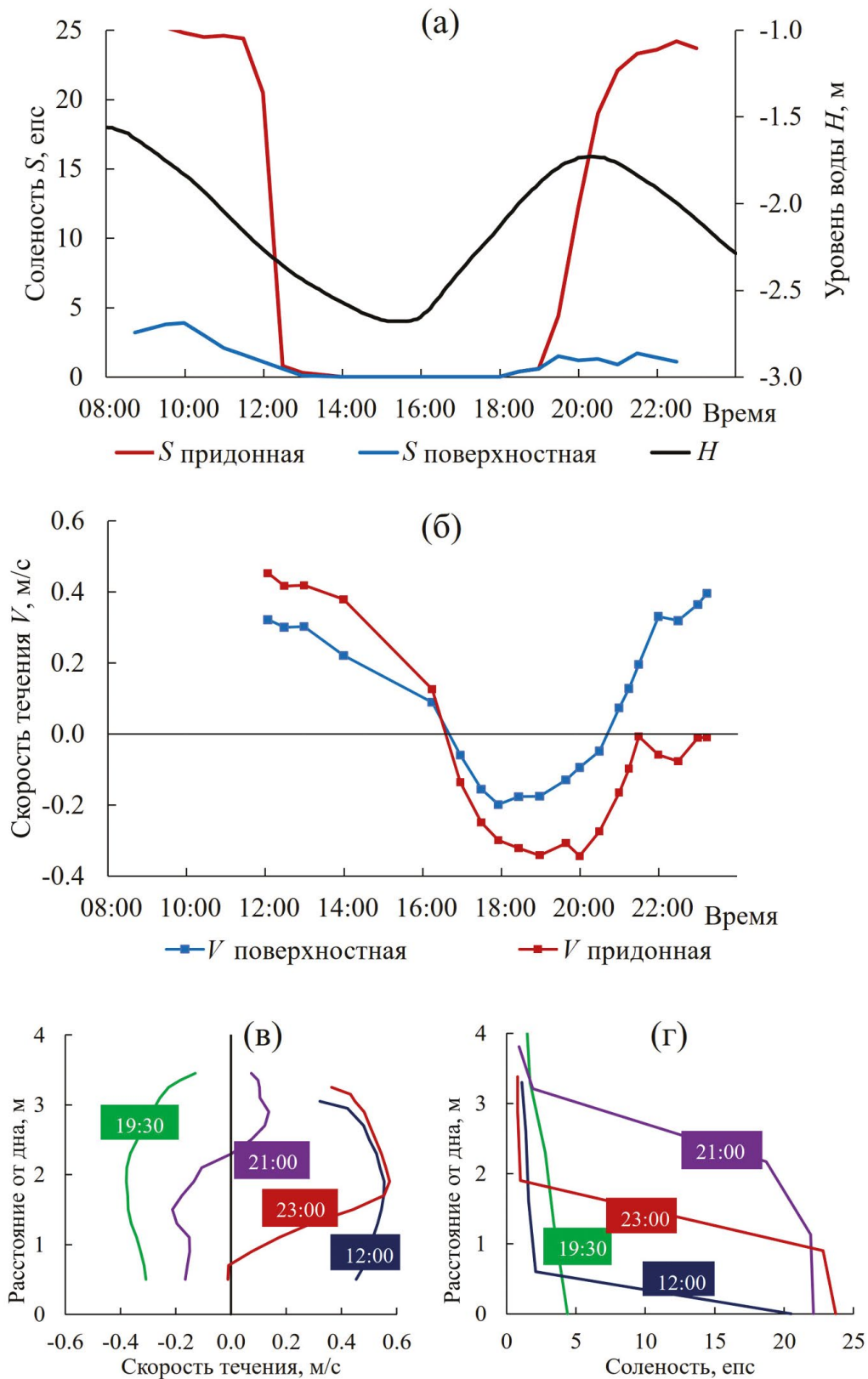


Рис. 4. Уровень воды, скорость течения и солёность в течение приливного цикла по данным измерений на фарватере в 4.5 км выше устьевового створа Варзуги (на рис. 1 п. 4).



Рис. 5. Нижнее течение р. Варзуги и выделенные границы распространения характерных явлений (по результатам экспедиционных исследований в январе–феврале 2020 г.).

шалась до 28 епс (рис. 3). В средней части эстуария (в 4 км от устьевового створа) они фиксировались на протяжении 4–5 ч каждого приливного цикла (~12.5 ч).

Приливная изменчивость гидрологических характеристик в эстуарии

Наблюдения на рейдовой вертикали (4.5 км выше устьевового створа) (рис. 1) за скоростью течения, соленостью и температурой воды были выполнены с 8:45 до 23:15 30.01.2020. Уровень воды измерялся на посту, расположенном на 0.5 км ниже рейдовой вертикали (рис. 1). Глубина на вертикали менялась от 2.3 м в отлив до 3.0 м в прилив.

Наблюдения начались через 0.5 ч после ПВ, а завершились спустя 2.5 ч после ПВ. Таким образом, ими был охвачен весь полусуточный приливный цикл. С начала наблюдений и до ~15:30 уровень воды в эстуарии падал (был отлив). Затем до ~20:20 наблюдался прилив, а после него – снова отлив (рис. 4). В течение 3 ч после начала измерений (т. е. в первую половину отлива) в придонном слое сохранялась высокая соленость (до 20 епс), хотя большая часть водной толщи уже была пресной (рис. 5). При этом вода на всех горизонтах текла в сторону моря. Только в середине отлива (между 12:00 и 12:30) соленость у дна резко уменьшилась с 20 до 0.8 епс и на рейдовой вертикали не осталось осолоненных вод. Имен-

но в этот период скорость отливного (прямого) течения достигла своего максимума 0.49 м/с в середине водной толщи (на глубине 1.6–1.7 м от дна), 0.32 и 0.43 м/с на поверхности и у дна соответственно (рис. 4). Затем скорость отливного течения постепенно ослабевала.

Течение сменило свое направление с прямого на обратное через 1 ч после начала прилива (в ~16:40). Своей наибольшей скорости (0.34 м/с) приливный поток достиг в 18:30–19:00, т. е. во второй половине прилива. В это же время на рейдовой вертикали появилась осолоненная вода (соленость у дна превысила 1 епс) (рис. 5). В течение следующего часа соленость воды у дна быстро нарастала и достигла 19 епс. При этом в поверхностном слое соленость оставалась невысокой. Благодаря этому на вертикали возникла сильная стратификация вод, достигшая своего максимума в период ПВ (в 20:30 вертикальный градиент солености воды составлял 4.4 епс/1 м).

Сразу после наступления ПВ (в ~20:30) течение в поверхностном слое повернуло к морю (рис. 4). При этом у дна оно еще ~2 ч оставалось обратным, хотя и постепенно ослабевало. В это время соленость воды у поверхности уменьшалась, а у дна продолжала нарастать. Максимум придонной солености (24.2 епс) был измерен в 22:30, т. е. спустя 1.5 ч после ПВ. Затем течение у дна повернуло на отлив и началось постепенное отступление осолоненной воды. По-видимому,

это пример эстуарной циркуляции, суть которой заключается в одновременном существовании стока пресных вод на поверхности и притока осолоненных вод у дна. Движение воды в поверхностном слое поддерживается градиентами уровня, направленными в сторону моря, а в придонном слое — градиентами солености, направленными в обратную сторону.

Почти 2/3 приливного цикла вертикальное распределение скорости течения воды было квазиравномерным (со слабо выраженным максимумом в центре и минимумами у дна и подо льдом). Эта закономерность нарушалась лишь в период существования эстуарной циркуляции.

По результатам экспедиции в нижнем течении р. Варзуги в зимнее время можно выделить три гидрологических участка (рис. 5). На первом (27–20 км от устья) участке гидрологические условия соответствуют речным (выше границы 3 на рис. 5 — зимой здесь не выявлены приливные колебания уровня). На втором участке (20–8 км от устья) вода всегда пресная, но заметны полусуточные приливные изменения уровня воды. Скорее всего, здесь есть и соответствующие колебания скорости течения: в прилив она уменьшается, а в отлив увеличивается. На третьем участке (8–0 км) все основные гидрологические характеристики (уровень, температура, соленость, скорость и направление течения воды) имеют выраженную полусуточную приливную изменчивость (между границами 1 и 2 на рис. 5). Гидрологические условия здесь колеблются в широких пределах: от речных (на минимуме отлива) до морских (на максимуме прилива).

Сопоставление с устьями других рек Белого моря

Для понимания того, какое место устье р. Варзуги (по особенностям его зимнего режима) занимает среди других устьев Белого моря, сопоставлены имеющиеся сведения. В предыдущие годы авторами статьи были проведены зимние экспедиции в устья больших и малых рек Белого моря [5]. Некоторые результаты этой работы получены непосредственно коллективом авторов, опубликованы впервые и представлены в табл. 1. Выводы о характере гидрологических

процессов и оценка влияния факторов солености, приливов, рельефа, стока и льда, приведенные ниже, опираются на результаты натурных наблюдений и являются дискуссионными.

Уровень воды. Общая закономерность для всех исследованных авторами рек состоит в том, что в период ледостава дальность проникновения приливных колебаний уровня в их руслах ограничивается перекатами и порогами. У малых рек при прочих равных условиях (рельеф территории бассейна и величина приливов на взморье) дальность проникновения приливов меньше, чем у больших и средних рек (в Кянде и Тамие по сравнению с Онегой, а также в Кузрезе по сравнению с Варзугой) (табл. 1). В первом случае приливы охватывают первые километры русла, а во втором случае они распространяются на десятки километров (табл. 1). Это можно объяснить тем, что у малых водотоков продольный профиль русла выработан значительно слабее, чем у более крупных рек. На эту закономерность накладывается влияние местных факторов, также ограничивающих проникновение приливов. Например, в устье Мезени — это “ледяные плотины”, которые практически ежегодно образуются в некоторых местах устьевого участка реки [9]. А в устье Умбы — это наличие промежуточного водного объекта (узкого и глубокого залива — одноименной губы — с порогом на входе, находящегося между рекой и морем), а также выходов коренных пород в месте впадения реки в губу. Во всех реках приливная волна перекашивается — по мере удаления от моря продолжительность приливной фазы уменьшается, а отливной фазы увеличивается. В больших реках это может приводить к тому, что колебания уровня в устьевом створе и в вершине устьевой области происходят в противофазе.

Скорость течения. Во всех реках обратные (приливные) течения охватывают более половины зоны приливных колебаний уровня (табл. 1). В крупных реках относительные размеры зоны обратных течений больше, чем в малых. В качестве типичной особенности вертикальной структуры поля скоростей можно отметить следующее. В больших и средних реках возможно возникновение двухслойной циркуляции, вызванной противоположно на-

Таблица 1. Основные характеристики зимнего режима устьев рек Белого моря (по данным предшествующих исследований коллектива авторов)

Район	Онежский залив				Мезенский залив	Кандалакшский залив и Терский берег			
Река	Онега		Кянда	Тамица	Мезень	Варзуга	Умба	Кузрека	
Общие характеристики									
$Q_{\text{ср}}$, м ³ /с год/ январь/ май 1941–2018	522/192/ 2050		5.36/1.97/ 21.0	4.88/1.80/ 19.1	878/245/ 3860	105/31.9/ 444	81.6/41.9/ 166	3.02/1.37/ 10.8	
F (устье), км ²	56900		510	465	78000	9840	6470	255	
Зимние характеристики (по результатам полевых исследований)									
Период работ	27.01– 1.02.17	27.01– 4.02.19	1–3.02.17	1–2.02.19	31.02– 4.02.17	29.01– 3.02.19	28.01– 2.02.20	27.01– 3.02.20	29.01– 2.02.20
Q	74.5	110	(1–2)	(1–2)	1.08	225	42.8	48.2	–
V (взморье), м	2.4–2.9	2.2–2.7	2.6–2.9	2.4–2.5	2.6–2.9	5.5–7.5	1–1.1	1.1–1.2	1.0–1.3
V (УС), м	1.6–1.7 (нагон)	1.1–1.4 (сгон)	–	1.2–1.4	1.6	–	1.1–1.3	1.1–1.2	–
$L_{\text{прил}}$, км	20–22	18–22	8–10	8–10	2–2.5	56–(60)	20	2.2	>2
$L_{\text{обр теч}}$, км	17–18 20 (нагон)	–	>4.5	>3.5	>0.8	39–40	–	(2.2)	–
$L_{\text{осол}}$, км	2.5–3 3.8–4 (нагон)	0	4–4.5	3–3.5	0.6–0.8	<30	7.5	0.5–2	0.9–1

Обозначения: УС – устьевой створ; Q – расход речной воды в вершине устьевой области; F – площадь водосбора реки; V (взморье), м – предвычисленная величина прилива на устьевом взморье; V (УС), м – измеренная величина прилива в устьевом створе; $L_{\text{прил}}$, км – дальность распространения приливных колебаний уровня воды; $L_{\text{обр теч}}$, км – дальность распространения реверсивных течений; $L_{\text{осол}}$, км – дальность проникновения вод соленостью более 1 епс; (50) – величины в скобках являются оценочными.

правленными градиентами уровня и плотности воды. В малых реках такое явление практически не возникает.

Осолонение. Во всех исследованных устьях происходит интрузия осолоненных вод во время прилива (табл. 1). В большинстве случаев осолоненные воды в отливную фазу полностью покидают речные русла. Но в устьях рек Умбы и Мезени осолонение сохраняется постоянно. В первом случае осолоненные воды накапливаются в котловине устьевого залива (в губе Умба), чему содействуют малый сток речной воды, характерный для зимы, и отсутствие ветрового перемешивания придонного слоя осолоненных вод с вышележащими пресными водами из-за льда. Во втором случае осолонению способствуют очень высокие приливы на фоне низкого речного стока, а также отсутствие ветрового перемешивания и наличие в русле реки значительных пле-

сов. В устье Онеги зимой 2019 г. удалось увидеть проявление другого фактора, ограничивающего интрузию осолоненных вод (табл. 1). В этот год мелководья в вершине Онежского залива (между устьевым створом реки и о. Кий) были забиты навалами льда. Свободной от него оставалась только стоковая ложбина, соединяющая реку и центральную часть Онежского залива. Поэтому поток, выходящий из реки на взморье, не растекался по его поверхности, а концентрировался внутри этой ложбины. То есть благодаря льду на взморье речное русло как бы удлинилось на несколько километров, и это привело к тому, что, несмотря на малый расход воды в реке, осолоненные воды престали в нее проникать (табл. 1). Приведенное здесь описание – предположение авторов настоящей статьи. Эта трактовка наилучшим образом соответствует увиденной картине ледовых явлений, а также результатам измерений (в том числе солености воды на взморье

и в русле реки) в устье Онеги зимой 2019 г. Предположение согласуется с сообщениями в [8] и [9], в которых говорится, что в устье Онеги зимой “лед препятствует осолонению” и “несмотря на меньшую величину стока, дальность проникновения осолоненных вод подо льдом меньше, чем в летнюю межень”.

Роль льда. В большинстве исследованных объектов ледяной покров не влияет на дальность распространения приливных колебаний уровня, поскольку она ограничена русловым рельефом. Только в макроприливном устье р. Мезени навалы льда могут создавать препятствия для распространения приливов [10]. На поле скоростей влияние льда более ощутимо. Во-первых, лед изолирует стоково-отливные и приливные потоки от воздействия ветра (как попутного, так встречного); во-вторых, он приводит к некоторому уменьшению скорости поверхностных течений из-за трения о нижнюю поверхность льда; во-третьих, он на мелководьях и у берегов концентрирует потоки в более глубоководной части русла. На осолонение речных устьев лед может оказывать как стимулирующее, так и противоположное ему влияние. С одной стороны, ледяной покров препятствует ветровому перемешиванию, что уменьшает размывание клина осолоненных вод и тем увеличивает дальность его проникновения. С другой стороны, лед перекрывает мелководья на устьевом участке реки, этим концентрируя речной поток в центральной части русла. Скорее всего, это уменьшает осолонение устьев по сравнению с тем, что было бы в них при тех же величинах речного стока и приливов в отсутствие льда. Такие же последствия могут быть от навалов льда на устьевом взморье, как показано выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные в устье р. Варзуги зимой 2020 г., показали следующее. Для нижнего течения реки характерно сильное влияние морских приливов, которое выражается в соответствующих колебаниях уровня, а также в периодическом возникновении обратных (приливных) течений и интрузии осолоненных вод. Наибольшая дальность распространения приливов и осолонения в реку составила 20 и 7.5 км соответственно.

Выше 20 км от устьевого створа наблюдаются речные гидрологические условия. На участке 20–8 км вода речная пресная, наблюдаются полусуточные колебания уровня воды. На нижнем участке уровень воды, температура, соленость, скорость и направление течения имеют полусуточную приливную изменчивость.

В зоне проникновения осолоненных вод в отдельные периоды приливного цикла возникает двухслойная (эстуарная) циркуляция вод, при которой пресная вода на поверхности движется в сторону моря, а осолоненная вода у дна перемещается вверх по речному руслу.

Сопоставление результатов экспедиций, проведенных в устье р. Варзуги, а также в устьях больших и средних рек Мезени, Онеги, Умбы, малых рек Тамицы, Кянды и Кузреки, позволило выделить общие черты зимнего гидрологического режима этих объектов и основные факторы его формирования (в том числе роль льда).

Коллектив авторов выражает благодарность А.П. Хромову и Л.Н. Чепур (ГМС “Умба”) за предоставленные фондовые данные, А. Двинину и И. Дерябиной (д. Кузомень) за предоставленные жилые помещения, Н.А. Кожину (с. Умба) за консультации и помощь экспедиции, Н.А. Демиденко и А.В. Дунюшину за поддержку и помощь в организации экспедиции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. II. Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Б.Х. Глуховского. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 240 с.
2. Жадин В.И. Фауна рек и водохранилищ // Тр. Зоол. ин-та. М.; Л., 1940. Т. 5. Вып. 3/4. 992 с.
3. Зарецкая Н.Е., Репкина Т.Ю. Новые данные по истории Терского берега Белого моря в голоцене (район устья р. Варзуги) // Геология морей и океанов: Материалы XXI Международ. науч. конф. (школы) по морской геологии. Т. III. М.: ГЕОС, 2015. С. 186–189.
4. Инжебейкин Ю.И. Колебания уровня Белого моря. Дис. ... докт. геогр. наук. 2004. СПб.: ИЭПС УО РАН, 2004.

5. Исследования зимнего режима устьев рек Белого моря в 2017–2020 гг. / Под ред. *П.Н. Терского, Е.Д. Панченко, С.Л. Горина* и др. // *Океанология*. 2021. Т. 61. № 6. С. 1006–1008.
6. *Крастынь Е.А., Фатхи М.О., Панченко Е.Д., Иванов В.А., Куликова Ж.М., Смирнова Д.А., Шишов А.А.* Зимний режим приливных устьев рек Терского берега Белого моря // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению. СПб.: Изд-во ВВМ, 2020. С. 1092–1097.
7. *Крыленко И.В., Липка О.Н., Суткайтис О.К.* Причины и последствия изменения русла в нижнем течении реки Варзуги. М.: WWF, 2018. 200 с.
8. *Кураева Л.Н., Лупачев Ю.В.* Особенности циркуляции и перемешивания вод в устьевой области Онеги // Тр. ГОИН. Вып. 179. 1986. С. 11–17.
9. *Михайлов В.Н.* Гидрологические процессы в устьях рек. М.: ГЕОС, 1997. 176 с.
10. *Полонский В.Ф., Лупачев Ю.В., Скриптунов Н.А.* Гидролого-морфологические процессы в устьях рек и методы их расчета (прогноза). СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 383 с.
11. *Потуткин А.Г.* Миграции атлантического лосося (*Salmo salar* L.) в прибрежном районе Белого моря и бассейне реки Варзуга: Дис. ... канд. биол. наук. Мурманск: ПИНРО, 2004. 125 с.
12. *Рейнеке М.Ф.* Гидрографическое описание северного берега России. Ч. 1–2 / Сост. *М. Рейнеке*. СПб.: Гидрографический департамент, 1878–1883. http://kolanord.ru/html_public/col_russkii_sever/Reyneke_MF
13. *Риппас П.Б.* Кольская экспедиция 1898 года. Предварительный отчет // Изв. Имп. Рус. геогр. об-ва. 1899. Т. 35. Вып. 3. С. 292–312. http://qwercus.narod.ru/rippas_1898.htm
14. *Сафьянов Г.А., Шевченко Н.В.* Особенности гранулометрической дифференциации наносов микроприливногo берега // Материалы XXII Международ. береговой конф. “Проблемы управления и устойчивого развития прибрежной зоны моря”. Тезисы / Под ред. *Л.А. Жиндарева*. Геленджик, 2007. С. 172–175.
15. *Яковлев В.А., Кашулин Н.А.* Об истории лимнологических исследований на Кольском Севере // Вестн. Кольского НЦ РАН. 2012. № 4. С. 117–138.
16. <https://gmvo.skniivh.ru/>
17. <https://rp5.ru>
18. <https://www.planet.com/>
19. *Panchenko E., Lebedeva S., Terskii P., Leummens M.* Hydrodynamics of the Onega river tidal estuary as a basis for ecosystem monitoring // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2019. 263. 012014. P. 1–6.
20. *Pettitt A.N.* A non-parametric approach to the change-point problem // J. Royal Statistical Soc. Ser. C (Applied Statistics). 1979. V. 28 (2). P. 126–135. doi:10.2307/2346729

УДК 911.5; 556.08

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ПОДВОДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ДОННЫХ ЛАНДШАФТОВ ЗАЛИВА ХАУКАЙСЕНЛАХТИ (ОСТРОВ КУХКА, ЛАДОЖСКОЕ ОЗЕРО)¹

© 2024 г. Д. С. Дудакова^{a, *}, В. М. Анохин^{a, c, d}, М. О. Дудаков^a, М. И. Орлова^b

^a Институт озероведения РАН – СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург, 196105 Россия

^b Санкт-Петербургский научный центр РАН, Санкт-Петербург, 199034 Россия

^c Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, 191086 Россия

^d Ленинградский государственный университет им. А.С. Пушкина, Санкт-Петербург, 196605, Россия

*e-mail: Judina-D@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.05.2023 г.

После доработки 12.05.2023 г.

Принята к публикации 08.10.2023 г.

Представлены результаты исследований донных ландшафтов, проведенных с использованием эхолота с функцией локации бокового обзора и дополненной видеосъемкой с подводного аппарата в бухте одного из островов в северном шхерном районе Ладожского озера в июне 2022 г. В результате проведенных эхолотных работ создана трехмерная батиметрическая модель исследованной бух. Хаукайсенлахти о. Кухка и выявлены существенные различия по сравнению с опубликованными навигационными картами для бух. Хаукайсенлахти. Формирование рельефа дна и состояния берегов как в надводной, так и в подводной зонах определяются особенностями геологического строения данного участка акватории, обусловленного разной устойчивостью к процессам выветривания различных геологических образований. В составе подводного ландшафта бухты выявлено шесть основных типов фаций. Облик и смена фаций связаны с наличием твердых скальных поверхностей и твердого обломочного материала и следующими за ними на больших глубинах рыхлыми грунтами. Облик фаций определяется также особенностями батиметрического строения бухты и преобладанием различных ассоциаций живых организмов, развитие которых зависит от типа поверхности и грунта. Проведенные исследования подтвердили перспективность использования эхолота с функцией локации бокового обзора для изучения и картирования подводных ландшафтов Ладожского озера совместно с таким дистанционным методом, как видеосъемка с необитаемого аппарата.

Ключевые слова: подводные структуры и рельеф дна, фациальная структура ландшафта, акустические методы, подводная видеосъемка, картирование, крупные озера.

DOI: 10.31857/S0321059624020021 **EDN:** CISKDO

ВВЕДЕНИЕ

Изучение донных ландшафтов, особенно в крупных озерах, имеющих важное природное и хозяйственное значение как источников пресной воды, приобретает все большую актуальность [11, 34, 41]. Береговая зона озер – пространство формирования наиболее сложных многокомпонентных территориально-аквальных ландшафтов экотонного типа [25, 26]. Исследование дон-

ных и береговых участков позволяет определять характер взаимосвязей между ландшафтами разных частей водоема [14].

В изучении водных ландшафтов используются различные комплексы методов, в том числе неинвазивные, связанные с применением дистанционного зондирования дна и прибрежной зоны. Для сопряжения полученных полевых контактных (например, пробоотбор и измерения на конкретных участках) и дистанционных данных используются ГИС-технологии [17, 32, 33, 48, 52]. К способам дистанционного зондирования в ландшафтных исследованиях относятся: аэрофото- и мультиспектральная съемка (в частности с использованием беспилотных летательных ап-

¹ Публикация составлена в рамках Гостемы ИНОЗ РАН (тема 0154-2019-0001 “Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов”, госрегистрация № AAAA-A19-119031890106-5); в рамках Государственного задания СПбНЦ РАН № 075-01351-23-00 (тема 1022040700531-3-5.9.1).

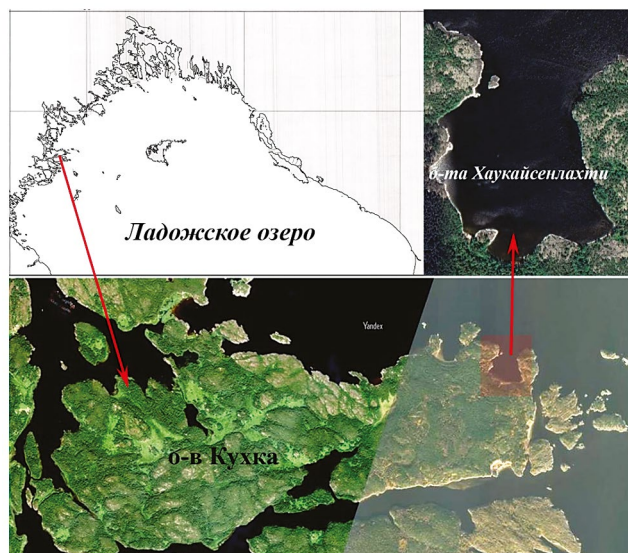


Рис. 1. Расположение исследованной бух. Хаукайсенлахти о. Кухка.

паратов) [5, 4, 15, 17, 42], видео- и фотосъемка с подводных аппаратов [11, 12, 16, 27] и гидролокация эхолотами и локами бокового обзора [9, 10, 30, 36, 39, 44–47, 53]. Разработанные комплексы гидроакустических систем и разнообразного программного обеспечения перспективны [18], они используются для экологического мониторинга океана и для решения широкого круга общенаучных, геоэкологических, технических задач, в том числе при инженерных изысканиях [37]. Использование гидролокаторов бокового обзора и многолучевых эхолотов дает возможность быстро и относительно точно идентифи-

цировать подводные структуры и рельеф дна, определять различные типы донных отложений, выделять слои донных осадков, картировать участки, покрытые высшей водной растительностью [21, 30, 53], охватывая значительные пространства акваторий, чего не позволяют классические контактные методы. Площадная съемка с помощью гидролокаторов позволяет изучать динамические процессы [31], протекающие в подводных ландшафтах. Результаты таких съемок, проведенных по отдельности или сочетаемых с подводным фото- и видеодокументированием — дистанционным или при выполнении водолазных работ, успешно применяются для оценки пространственного распределения донных группировок живых организмов и донных местообитаний, составлении карт их распределения [1, 5, 20, 42, 45, 47, 48, 51, 52, 53]. Гидролокационное изучение донных объектов имеет определенные сложности, что связано с особенностью метода, использующего акустические отражения, визуализация которых приводит к пространственным искажениям в зависимости от геометрии пространства и угла отражения [46].

Для изучения ландшафтов Ладожского озера в предыдущие годы авторами применялся метод совмещенной аэро- (с использованием БПЛА) и подводной видеосъемки с помощью водолазного метода и необитаемых подводных аппаратов на модельных полигонах. Одновременно изучались особенности пространственного распределения

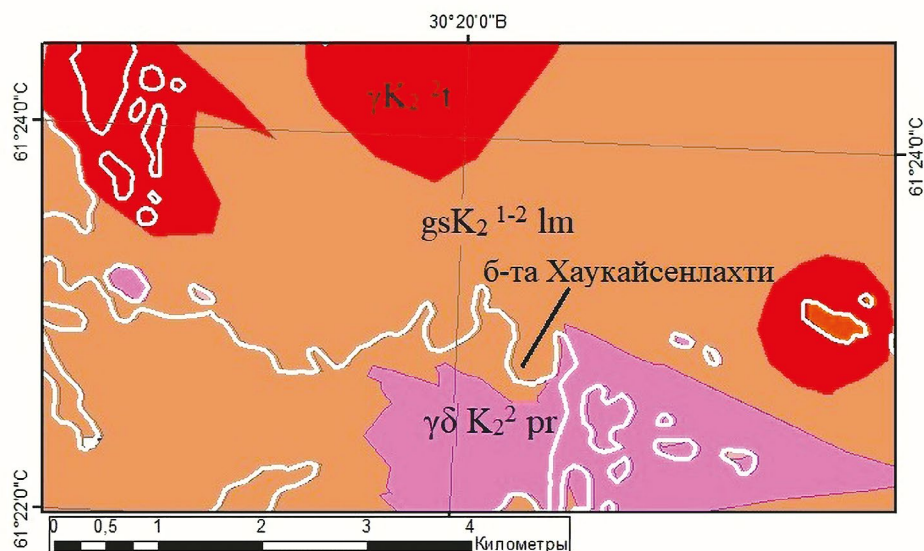


Рис. 2. Вырезка из Государственной геологической карты РФ масштаба 1:200000, листов Р-35-XXIV, Р-36-XIX.

перифитона и бентоса на исследуемых полигонах и создавались батиметрические модели по данным, получаемым с однолучевого эхолота [11]. Предполагается, что применение локатора бокового обзора совместно с уже разработанными ранее методами, прошедшими проверку при изучении донных ландшафтов озера, позволяет расширить масштаб исследований, получать данные с более высоким разрешением, и, таким образом, более надежно картировать распределение элементов ландшафтов, а также создавать 3D-модели дна и его топографические карты.

Цель работы — оценить возможности применения гидролокации с помощью локатора бокового обзора в составе интегративной методики, сочетающей акустические и видео методы для целей крупномасштабного картирования подводных ландшафтов прибрежной зоны Ладожского озера.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА

Краткий физико-географический очерк района исследований

В июне 2022 г. (17.06.2022) с помощью эхолота с функцией локации бокового обзора “Humingbird SOLIX SI+ G3” была обследована бух. Хаукайсенлахти о. Кухка (рис. 1). Бухта Хаукайсенлахти площадью 0.24 км², с глубинами до 40 м расположена в северо-восточной части острова и протягивается к югу на расстояние 600 м при ширине 260×450 м.

Остров Кухка преимущественно сложен породами (рис. 2) лахденпохского метаморфического комплекса (лумиварский биотито-гнейсовый подкомплекс): гнейсы биотитовые, реже гранат-биотитовые, мигматиты по ним, прослои кварцитовидных пород, включения скарноидов, линзы, полосы амфиболитов (gsK1-2lm). Восточная часть острова складывается интрузивными породами приозерского тоналитового комплекса: тоналиты, плагиограниты, кварцевые диориты (pgK2pr), что проявляется в выходе высокой отвесной скалы в восточной части бухты (рис. 3б) [8].

По морфометрической структуре дна в изучаемой акватории Ладожского озера (северо-западная часть, шхерный район) о. Кухка относит-

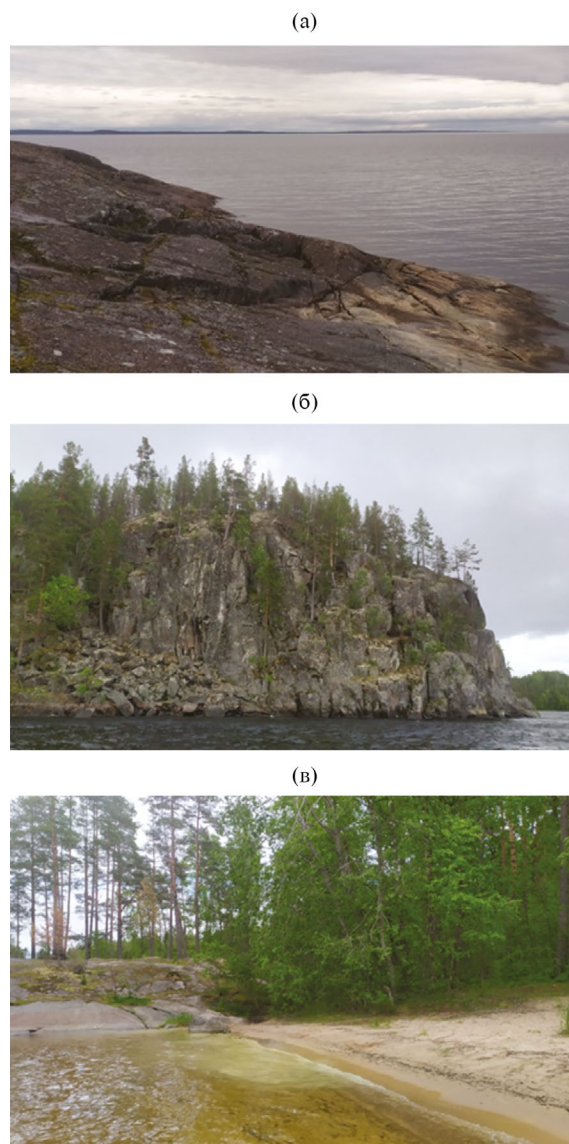


Рис. 3. Наземные скальные выходы западного (а), восточного (б) и песчаный пляж южного (в) борта бух. Хаукайсенлахти о. Кухка.

ся к области распространения кристаллических пород, для которой характерно неровное дно с многочисленными глубокими впадинами, сильно изрезанными берегами и многочисленными поднятиями, выходящими над поверхностью суши в виде островов [29]. На относительно небольшом удалении от острова — самый глубоководный участок всего Ладожского озера (230 м). Профиль дна характеризуется резкими опусканиями и поднятиями. Глубина дна всего в 2 км от исследуемой бухты достигает 100 м (рис. 4). Сама бухта относительно мелководна (<20 м глубины, большая часть бухты занята глубинами до 10 м), сильно вдается в остров.

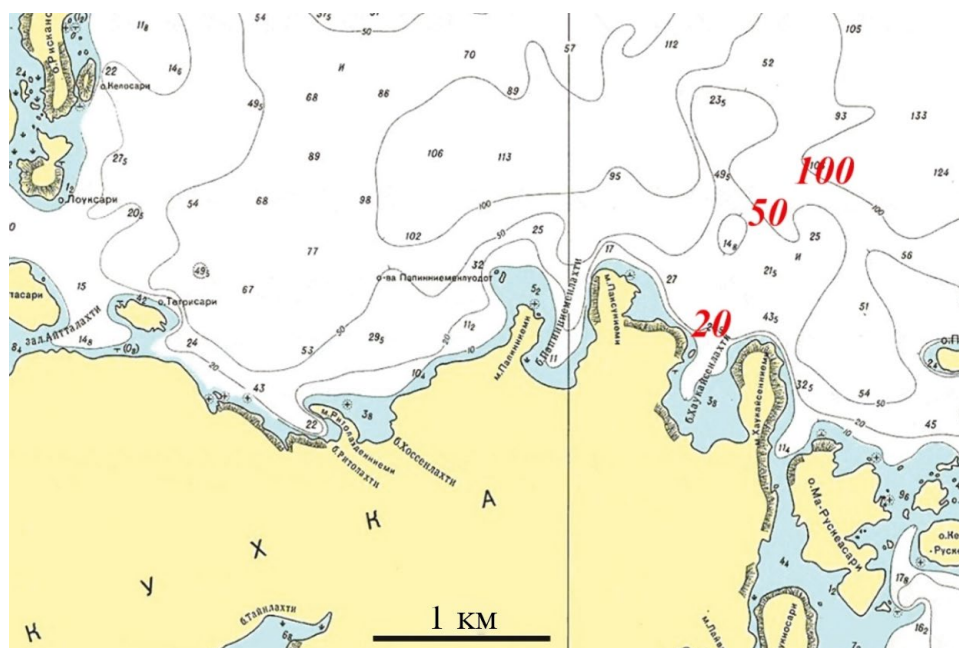


Рис. 4. Карта глубин северо-восточной и восточной частей о. Кухка [28].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Гидрофизические и геологические характеристики бух. Хаукайсенлахти о. Кухка (рис. 1) были исследованы вдоль разрезов с помощью эхолота с функцией локализации бокового обзора “Hummingbird SOLIX SI+ G3”; состав и распределение группиро-

ровок донных организмов оценивали с использованием многократно опробованной оригинальной видеоустановки — необитаемого подводного аппарата “Limnoscout” по ранее разработанной методике [11–13].

При эхолотировании по данным замера глубин, получаемым из индивидуальных форматов эхолота и извлекаемым в таблицу Excel (которая в дальнейшем использовалась как база данных для интерпретации в ГИС-программах Surfer, Arc Map), проводилось построение батиметрической модели.

Авторами разработана частная методика и других видов анализа изображений, полученных гидролокационными средствами для выделения отдельных литологических и фациальных разностей и проведения границ, как это показано на рис. 5–7. Анализ велся как по высоко- и низкочастотным гидролокационным снимкам с нижнего луча, так и по изображениям локатора бокового обзора. По полученным данным отстроено 11 поперечных и 9 продольных профилей (рис. 8а). Низкочастотные и высокочастотные эхограммы с датчиков нижнего сканирования анализировались параллельно для выявления перехода отдельных литологических разностей и водорослевых скоплений. Видеоизображения, полученные

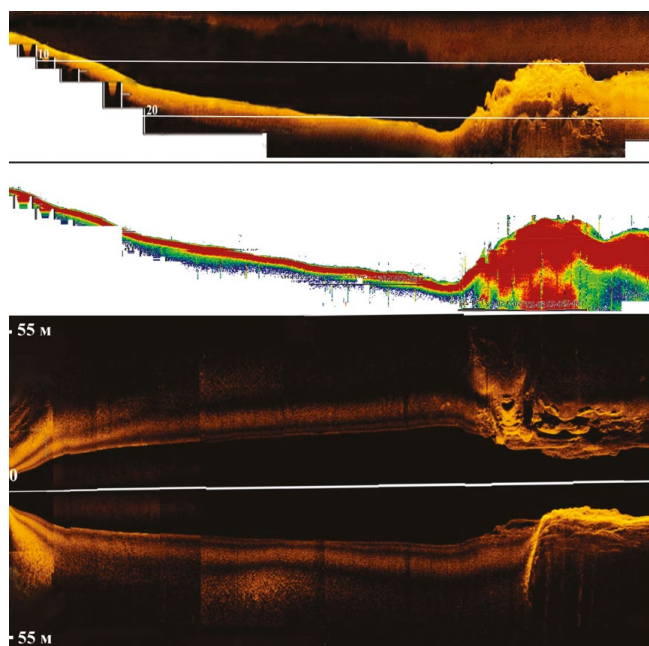


Рис. 5. Пример профиля, полученного по результатам эхолотирования с высокочастотного датчика.

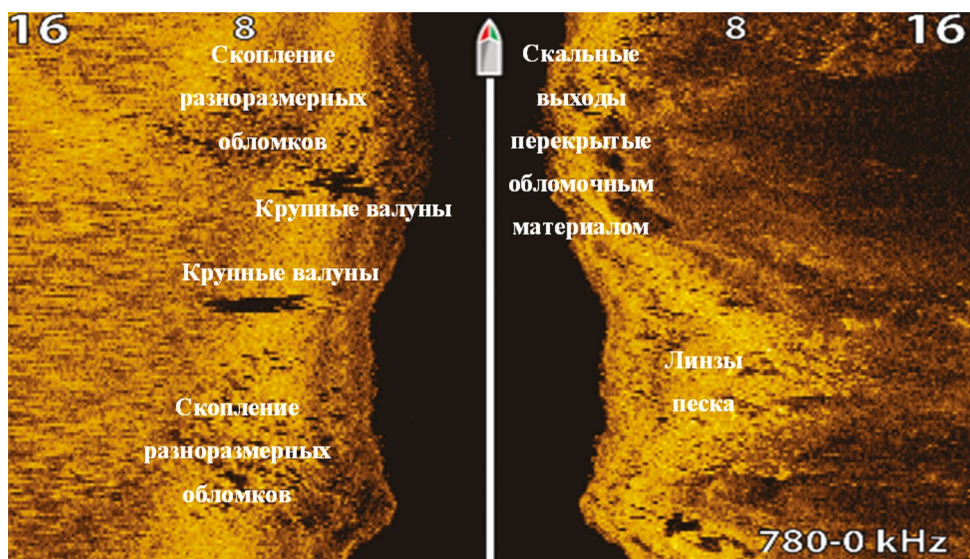
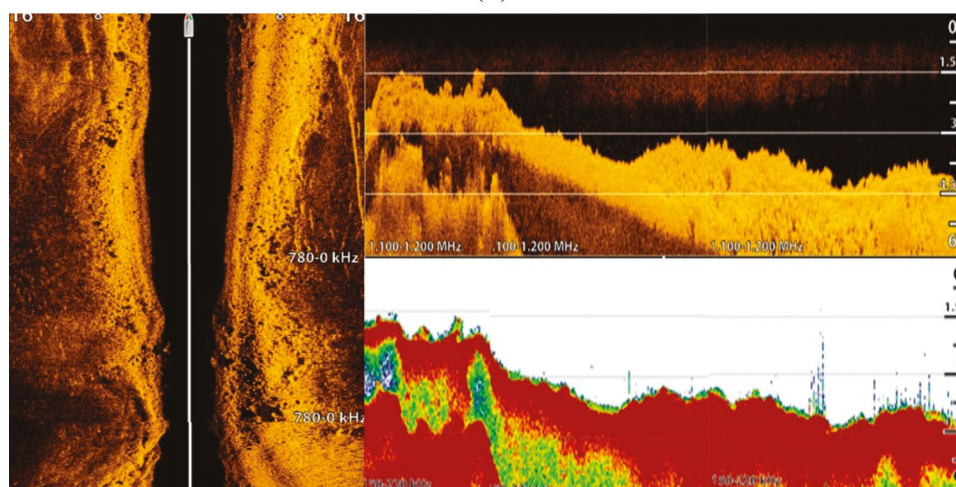


Рис. 6. Выделение литологических и фациальных различий по снимкам с лоатора бокового обзора.

(a)



(б)

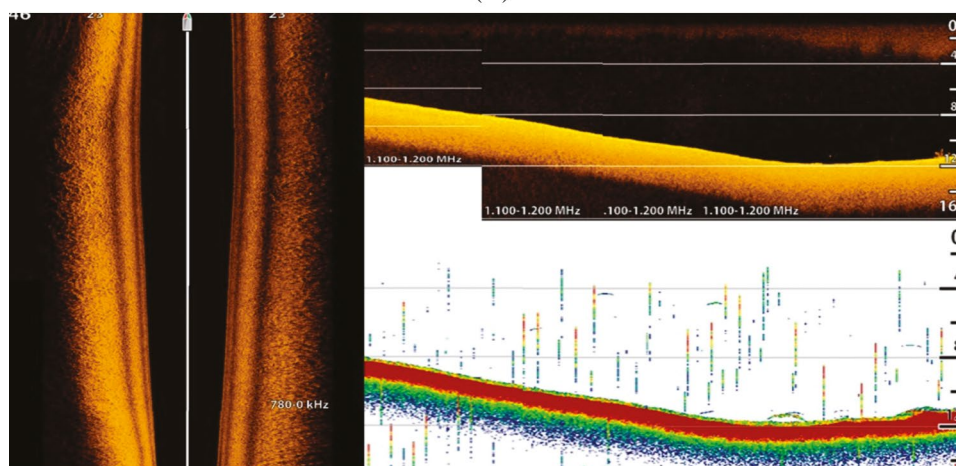


Рис. 7. Литологическая структура разных частей бух. Хаукайсенлахти по результатам исследования эхолотом и лока- тором бокового обзора: а – каменистые пояса у скальных выходов; б – алевролитовое дно с органикой.

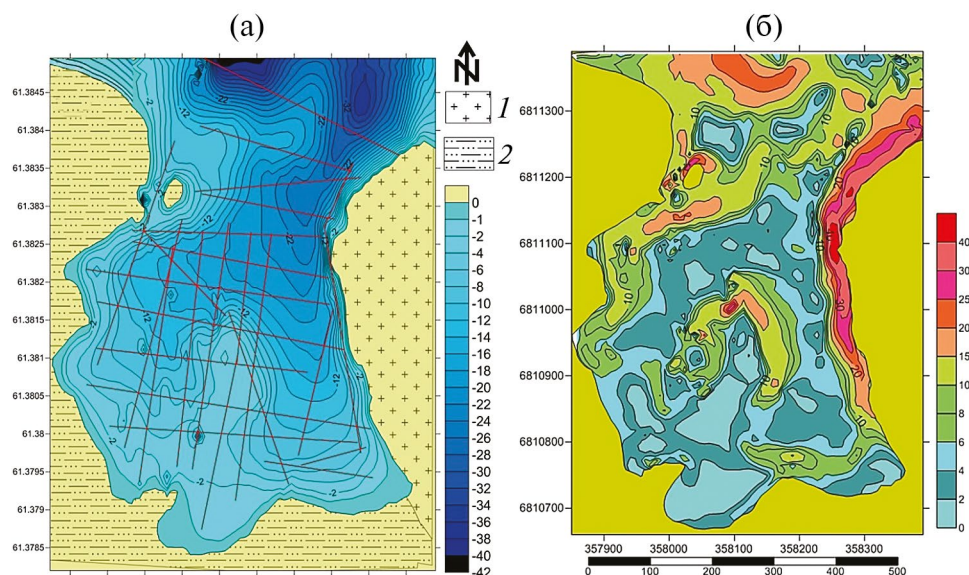


Рис. 8. Карты глубин (а) и крутизны склонов (б) бух. Хаукайсенлахти о. Кухка по результатам проведенного эхолотирования (красными линиями в (а) выделены эхолотные профили). 1 – Лумиварский биотито-гнейсовый подкомплекс Лахденпохского метаморфического комплекса (gsK1-2lm); 2 – Приозерский тоналитовый комплекс (pgK2pt).

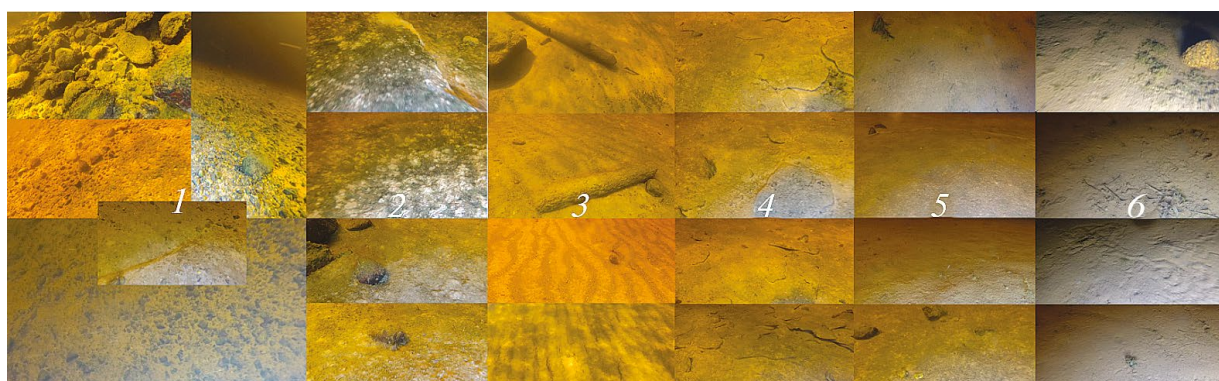


Рис. 9. Облик поверхности дна с различными типами донных осадков, представленных в исследуемой бухте. 1 – грубообломочные осадки (размерностью от крупных валунов до гравия и гальки); 2 – плотные скальные поверхности; 3 – разнозернистые промытые пески, подверженные волновому воздействию с выраженными знаками ряби; 4 – участки с пятнами плотной глины; 5 – алевропески; 6 – алевропелиты.

при видеопрофилировании, анализировались с привязкой к элементам рельефа по методике, разработанной авторами ранее [12, 13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Донный рельеф бухты, выявленный путем эхолотирования; геологическое строение, состав пород

Построенные по итогам проведенного эхолотирования карты распределения глубин и крутизны склонов исследуемой бухты свидетельствуют о сложном рельефе дна и позволяют установить соответствие морфометрии берегов

бухты геологическому строению различных частей дна (рис. 8). Согласно полученным результатам, от основной акватории Ладоги бухта отделяется клиновидным поднятием с глубинами 5–20 м, прорезанным на востоке узким желобом, продолжающимся вдоль крутого (до 70°) восточного борта бухты. Западный борт, более пологий (уклоны 5–25°), продолжается и далее в более глубоководную центральную часть бухты. Известно, что формирование рельефа зависит от состава слагающих территорию пород и их механической устойчивости [3, 7, 19, 23]. Это наглядно проявилось в рельефе изучаемой бухты. На восточном борту обнажаются устойчивые к выветриванию массивные плагио-

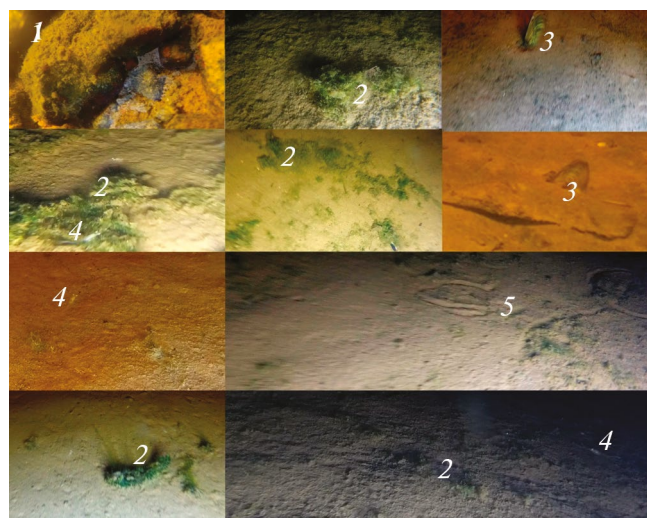


Рис. 10. Элементы биоты и ее следы в составе ландшафтов и следы ее жизнедеятельности на различных литологических разновидностях: 1 – перифитонные обрастания с гастроподами; 2 – скопления водорослевых агрегатов на дне; 3 – крупные двустворчатые моллюски семейства Unionidae; 4 – мизиды; 5 – следы моллюсков.

граниты; западный борт сложен полосчатыми гнейсами, более легко поддающимися химическому выветриванию и механическому разрушению [8]. Южная часть бухты представляет собой мелководье с глубинами до 3 м и пологим наклоном дна ($2-5^\circ$). Центральная часть бухты осложнена поднятием, предположительно обусловленным небольшим массивом плагиогранитов размером 150×200 м с плоской вершиной и склонами $15-20^\circ$.

Компоненты донного ландшафта бухты, выявленные с помощью видеосъемки

Проведенная видеосъемка дна позволила визуально оценить литологический облик дна разных частей бухты и населяющую его биоту. Литологические разновидности в бухте, согласно данным видеосъемки, могут быть отнесены к шести типам (рис. 9): 1–2 – представляют собой грубообломочные осадки (размерностью от крупных валунов до гравия и гальки) и плотные скальные поверхности; 3 – разнородные промытые пески, подверженные волновому воздействию с выраженными знаками ряби; 4 – вероятно, участки с пятнами плотной глины; 5–6 – мягкие грунты – алевропески и алевропелиты. Подобный литологический состав и его распределение характерны для бухт материкового берега и островов на кристаллических породах в шхерном районе Ладожского озера [2].

Форм представителей бентоса и перифитона, способных оказывать влияние на донный ландшафт исследуемой бухты, выявлено относительно немного как в качественном, так и в количественном отношении. Это были находящиеся на дне водорослевые скопления, отдельно растущие макрофиты, крупные зарывающиеся двустворчатые моллюски семейства Unionidae; зафиксированные видеосъемкой обычные для донного ландшафта бухты подвижные беспозвоночные – мизиды, представляют нектобентос

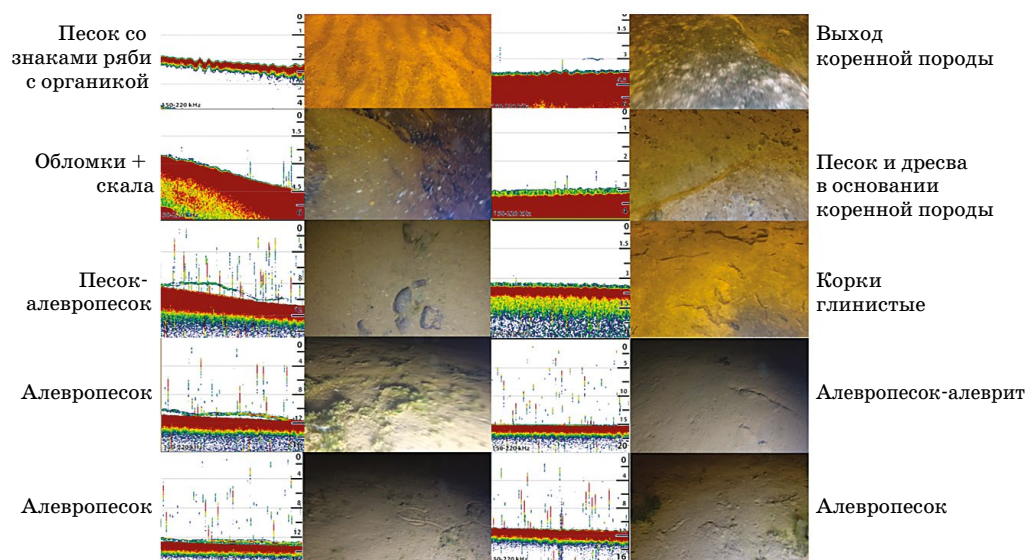


Рис. 11. Типизация разных типов грунта по показаниям низкочастотного датчика эхолота.

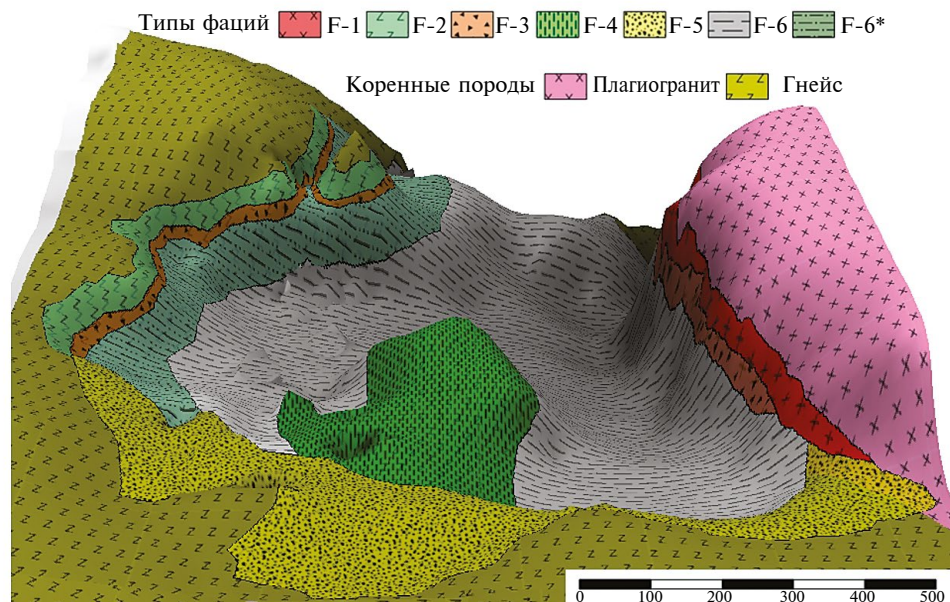


Рис. 12. Батиметрическая 3D-модель ландшафтных фаций бух. Хаукайсенлахти о. Кукха.

(рис. 10). Относительная бедность зафиксированной видеосъемкой макробиоты может быть связана с характерной для исследуемого района сезонной изменчивостью состава и развития биологических сообществ [10]. Согласно гидробиологическим исследованиям на Ладожском озере, бухты, аналогичные бух. Хаукайсенлахти, в сезоны максимальной вегетации могут характеризоваться высоким развитием высшей водной растительности [24, 35, 40], что не выявлено в период проведения настоящих работ. Развитие растительных ассоциаций позволяет выделить в пределах литоральной зоны дополнительные ландшафтные фации. Считается, что литоральная зона в Ладожском озере на отдельных участках этого водоема может быть весьма обширной, простираясь вглубь до 8 м [24]. Такие глубины в бух. Хаукайсенлахти составляют 68%. Однако максимальное развитие макрофитов группы линеидов (тростник, рогоз, осоки, аир и т. п.), а также следующих за ними по вертикальному профилю нимфеид (нимфея, кубышка, рдесты и т. п.), дающих максимальные покрытие и биомассу в пространственной структуре занимаемых площадей, распространяются в силу своих биологических особенностей в основном до глубин порядка 2.5 м [11, 35, 38]. В бух. Хаукайсенлахти глубинами <2.5 м занято 30% площади. Ограничение распространения ассоциаций погру-

женной высшей водной растительности в глубь фотической зоны, возможно, связано с тем, что на данных глубинах сформированы песчаные мелководные пляжи, подверженные интенсивному гидродинамическому (ветро-волновому) воздействию при сильных ветрах и штормовых эпизодах. Этот факт – препятствие для интенсивного зарастания. Согласно открытым геоданным Яндекс-карт 2023 [49] и программы Google Earth Pro, зарастаемость исследуемой бухты в периоды получения доступных снимков ДЗЗ также была низкой. Поэтому предполагается, что роль макрофитов в формировании ландшафтов бух. Хаукайсенлахти низка. До сих пор не до конца исследованными остаются сообщества скального фитоперифитона и фитосаммона шхерного района Ладожского озера [24]. Для более детальной оценки этого компонента донных ландшафтов актуально проведение специализированных гидробиотических исследований этих групп, а также изучение сезонной динамики высшей водной растительности и оценка ее роли в формировании дополнительных фациальных разновидностей в составе донных ландшафтов в периоды максимальной вегетации. Также необходимо изучать сезонную динамику зообентосных и зооперифитонных видов гидробионтов, отражающих специфику различных ландшафтных фаций.

Выделение ландшафтных фаций с привлечением результатов нижнего и бокового сканирования эхолотом с функцией ГЛБО

Как показало сопоставление данных подводной видеосъемки с эхограммами гидролокатора, высокой информативностью и корреляцией с характером дна на видеоснимках обладали эхограммы с низкочастотного датчика нижнего сканирования (рис. 11). Использование этих эхограмм позволило проводить границы между различными типами литологических разностей.

По полученным данным было отстроено 11 поперечных и 9 продольных профилей (рис. 8а). Эхограммы с датчиков нижнего сканирования низкочастотные и высокочастотные анализировались параллельно. Как указано выше, низкочастотные (режим классического сонара) эхограммы позволяли более четко выделять характер перехода отдельных литологических разностей, а также указали на наличие водорослевых скоплений на отдельных участках. Изображения с высокочастотного сонара давали более детальную информацию по мелким немасштабным элементам дна и характеру неровности поверхности и, таким образом, позволили наметить границы перехода между отдельными ландшафтными фациями. В ходе совместного анализа результатов эхолотирования датчиками нижнего сканирования и видеосъемки были определены ключевые абиотические и биотические факторы выделения границ, соответственно абиотические — тип осадка и характер микрорельефа и биотические — компоненты биологических сообществ, выявленных при видеосъемке (оказывающих воздействие на внешний облик дна).

Анализ мозаики гидролокатора бокового обзора и изображения ГЛБО с отдельных участков дал дополнительные плоскостные пространственные изображения по видам переходов на границах фаций, форме распределения разных типов осадков, их сочетания и взаимосвязи, распределения отдельных крупных обломков и затонувшей древесины (рис. 6, 7).

Границы отдельных фаций проводились в местах смены типа осадка и при изменении характера рельефа.

Как показывает предшествующий опыт проведения исследований с эхолотами с ГЛБО, эти приборы отлично подходят для целей крупномасштабного картирования и широко используются для морских работ [10, 30, 45, 52, 53]; они позволяют изучать мезо- и микроформы рельефа, выделять немасштабные элементы из мозаик ГЛБО, изучать отдельные интересующие объекты на дне [9, 36, 43, 50]. Осуществленные авторами статьи работы в бух. Хаукайсенланхти подтвердили достоинства ГЛБО и показали, что данный метод применим в прибрежной мелководной зоне Ладожского озера.

Предшествующий опыт показывает также перспективность использования прибора с функцией высокочастотного нижнего луча и ГЛБО для изучения пространственного распределения ихтиофауны [6, 22]. Этот подход, позволивший отчетливо выявить различные формы микрорельефа и биологические объекты, расположенные на дне, помимо детализации межфациальных границ может быть использован для косвенной оценки трофической связи бентоса с рыбным населением, а также для оценки степени влияния рыб на характер поверхности дна (“ямки”, углубления, образованные зарывающимися видами рыб и т. д.).

3D-модель ландшафтных фаций бух. Хаукайсенланхти

По итогам проведенного анализа составлена батиметрическая 3D-модель ландшафтных фаций в исследуемой бухте (рис. 12).

В структуре ландшафта выявлено шесть основных типов фаций:

- 1) F-1 — выположенные ступени продолжения западного берега на коренном гнейсовом основании с обломочным материалом, на поверхности которых развивается перифитон ($h = 0-6$ м);
- 2) F-2 — более крутосклонные борта восточной части бухты на гранитном коренном основании со скальными выходами и преобладанием грубообломочного материала, также характеризуются заселением их поверхности перифитонными организмами ($h = 0-6$ м);
- 3) F-3 — дресвяно-галечные и песчаные пояса в подножии скальных выходов ($h = 2-7$ м);

Таблица 1. Размеры и доля отдельных ландшафтных фаций в общей площади бух. Хаукайсенлахти о. Кухка

Фация	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	F-6	F-6'	Итого
Площадь, м ²	8539	4286	4286	24 205	35 803	138 243	138 243	239 594
Площадь, %	4	2.5	2.5	10	15	57	9	100

4) F-4 – (предположительно) пелитовые мало-мощные осадки на подъеме коренной породы в центральной части бухты, заселенные двустворчатыми моллюсками и покрытые водорослевой пленкой ($h = 0–8$ м);

5) F-5 – пески со знаками ряби в кутовой части бухты в районе песчаного пляжа с характерным скоплением крупных органических остатков растительного происхождения и множество следов моллюсков ($h = 0–2$ м);

6) F-6 – алевропесчаное и алевритовое дно с водорослевой пленкой на некоторых участках и скоплениями крупных растительных водорослевых агрегатов на всей площади, занятой этой фацией; из эпибентосной биоты преобладают мизиды, на небольших глубинах встречаются двустворчатые моллюски и их следы ($h = 3–40$ м); в пределах этой фации на западном склоне выделяется участок (с глубинами 3–8 м) (F-6') с большим уклоном по сравнению с наиболее пологим днищем в остальной части бухты.

Полученная модель показывает, что доминирующая фация (57% общей площади бухты) – пологая алевритопесчанистая равнина, слагающая днище (зону аккумуляции) бухты (F-6) (рис. 12, табл. 1).

В целом фациальный состав донного ландшафта бух. Хаукайсенлахти – типовой для закрытых частей акватории шхерного района [11, 12]. Отмечено высокое пространственное разнообразие элементов ландшафтов и биогеоценозов. Это создает предпосылки для высокого развития биологических ресурсов, что в целом хорошо известно для переходных (экотонных) зон [24, 44, 45]. Экстраполирование результатов исследований донных ландшафтов на сопредельную территорию дает возможность оценки распределения бентосных сообществ по площади и перспективно для учета биологических запасов определенных хозяйственно значимых видов гидробионтов [48, 50, 51].

ВЫВОДЫ

В результате проведенных эхолотных работ создана трехмерная батиметрическая модель исследованной бух. Хаукайсенлахти о. Кухка; крупномасштабная карта глубин бухты имеет существенные отличия от опубликованных навигационных карт.

На формирование рельефа дна влияет геологическое строение данного участка акватории, обусловленное разной устойчивостью к процессам выветривания различных геологических образований: биотитовых гнейсов Лахденпохского метаморфического комплекса и плагиогранитов Приозерского тоналитового комплекса. В связи с этим проявляется различие морфометрического строения берегов как в надводной, так и в подводной частях.

В структуре подводного ландшафта бухты выявлено шесть основных типов фаций. Облик и смена фаций связаны с наличием твердых скальных поверхностей и твердого обломочного материала и следующими за ними на больших глубинах рыхлыми грунтами. Облик и смена фаций определяются также особенностями батиметрического строения бухты и преобладанием различных биологических сообществ, развитие которых находится в зависимости от типа поверхности и грунта.

Составленная ландшафтная карта показала, что преобладающая фация – F-6 (57% площади бухты). Дополнительный вклад в разнообразие ландшафтной структуры вносит подъем дна в центре бухты (F-4) (10% площади бухты) с нехарактерными для других частей грунтами и типом поверхности.

Проведенные исследования подтвердили перспективность использования эхолота с функцией локации бокового обзора для изучения и картирования подводных ландшафтов Ладожского

озера совместно с таким дистанционным методом, как видеосъемка с необитаемого аппарата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агапова Г.В. Исследование и картографирование подводного рельефа в познании природы Мирового океана. Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М.: Геологический ин-т РАН, 2008. 48 с.
2. Анохин В.М., Науменко М.А., Дудакова Д.С., Дудаков М.О., Рыбакин В.М. Геоморфологические особенности дна и берегов Ладожского озера // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Под ред. С.А. Кондратьева, Ш.Р. Позднякова, В.А. Румянцева. СПб.: Ладожская монография, 2021. С. 151–164.
3. Афанасьев В.В. Строение и развитие берегов контактной зоны умеренных и субарктических морей северной Пацифики. Дис... докт. геол. наук. Южно-Сахалинск, 2018. 345 с.
4. Беленко В.В. Теоретические основы исследования природных ландшафтов по материалам аэрокосмических съемок и наземных экологических исследований. Учеб. пособие. М.: Спутник+, 2016. 123 с.
5. Блинова Е.И., Вилкова О.Ю., Милютин Д.М., Пронина О.А., Штрик В.А. Изучение экосистем рыбохозяйственных водоемов, сбор и обработка данных о водных биологических ресурсах, техника и технология их добычи и переработки. Вып. 3. Методы ландшафтных исследований и оценки запасов донных беспозвоночных и водорослей морской прибрежной зоны. М.: ВНИРО, 2005. 135 с.
6. Борисенко Э.С. Гидроакустические исследования распределения рыб в пойменно-руслевой системе Нижнего Иртыша. Дис. ... канд. биол. наук. М.: ИПЭЭ РАН, 2013. 158 с.
7. Геология. Учеб. пособие / Под ред. С.С. Бондаренко. М.: Изд-во МГОУ, 2004. 243 с.
8. Государственная геологическая карта РФ масштаба 1:200000, листов Р-35-XXIV, Р-36-XIX. 2004.
9. Дорохов Д.В. Абиотическое картирование донных ландшафтов Балтийского моря в целях пространственного планирования и морского природопользования // Морские исследования и образование (MARESEDU) — 2022. Тр. XI Международ. науч.-практ. конф. Т. I (IV). Тверь: ПолиПРЕСС, 2022. С. 56–59.
10. Дорохов Д.В. Ландшафтно-экологическое районирование субаквальных комплексов юго-восточной части Балтийского моря. Дис. ... канд. геогр. наук. Калининград: БФУ, 2018. 174 с.
11. Дудакова Д.С., Анохин В.М., Дудаков М.О. Донные ландшафты Ладожского озера // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. СПб.: Ладожская монография, 2021. С. 136–146.
12. Дудакова Д.С., Анохин В.М., Поздняков Ш.Р., Дудаков М.О., Юдин С.Н. Подводные ландшафты островов Мантсинсаари и Лункулансаари в зоне рифейских поднятий в восточной части Ладожского озера // Изв. РАН. Сер. географическая. 2021. Т. 85. № 3. С. 433–445.
13. Дудакова Д.С., Дудаков М.О., Анохин В.М. Опыт применения глубоководного телеуправляемого аппарата для изучения подводных ландшафтов Ладожского озера // Рос. журн. приклад. экологии. 2018. № 4 (16). С. 51–55.
14. Дудакова Д.С., Юдин С.Н. Цифровая модель подводных ландшафтов Ладожского озера как источник интегрированной информации о состоянии дна // Геоморфология. 2022. Т. 53. № 2. С. 13–26.
15. Дуленин А.А., Дуленина П.А., Коцюк Д.В., Свиридов В.В. Опыт и перспективы использования малых беспилотных летательных аппаратов в морских прибрежных биологических исследованиях // Тр. ВНИРО. 2021. Т. 185. С. 134–151.
16. Дуленин А.А., Кудревский О.А. Использование легкого телеуправляемого необитаемого подводного аппарата для морских прибрежных гидробиологических исследований // Вестн. КамчатГТУ. 2019. № 48. С. 6–17.
17. Жариков В.В., Базаров К.Ю., Егидарев Е.Г. Использование данных дистанционного зондирования при картографировании подводных ландшафтов бухты Средней (залив Петра Великого, Японское море) // География и природ. ресурсы. 2017. № 2. С. 190–198.
18. Каевицер В.И., Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В. Опыт проведения исследования дна и донных отложений Арктических морей гидролокационными комплексами с Л Ч М зондирующими сигналами // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2017. С. 6–15.
19. Каплин П.А., Леонтьев О.К., Лукьянова С.А., Никифоров Л.Г. Берега. М.: Мысль, 1991. 479 с.
20. Козловский В.В., Симакова У.В., Папунов В.Г., Федорович В.С., Терехина Я.Е., Куликова Д.С., Гала-

- ев В.Е., Шабалин Н.В., Колючкина Г.А., Семин В.Л., Любимов И.В., Тимофеев В.А., Мокиевский В.О. Классификация и картографирование донных биотопов государственного природного заповедника Утриш // Моря России: исследования береговой и шельфовой зон. Тезисы докл. Всерос. науч. конф. (XXVIII береговая конф.). Севастополь: Морской гидрофиз. ин-т РАН, 2020. С. 413–414.
21. Колосов К.В. Многоцелевой эхолот-гидролокатор: решение задач съемки рельефа, поиска и классификации в прибрежной зоне. Дис. ... канд. техн. наук. М.: СПбГМТУ, 2006. 102 с.
 22. Кудрявцев В.И. Гидроакустика рыбохозяйственная. М.: ВНИРО, 2018. 460 с.
 23. Леонтьев О.К., Рычагов Г.И. Общая геоморфология. М.: Высш. шк., 1979. 287 с.
 24. Литоральная зона Ладожского озера / Под ред. Е.А. Курашова. СПб.: Нестор-История, 2011. 416 с.
 25. Митина Н.Н. Геоэкологические исследования ландшафтов морских мелководий. М.: Наука, 2005. 197 с.
 26. Митина Н.Н. Принципы классификации подводных ландшафтов морских мелководий // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири (в пяти томах). Т. 2. Изучение и мониторинг процессов в почвах и водных объектах / Под ред. В.Г. Сычева, Л. Мюллера. М.: ВНИИ агрохимии, 2018. С. 447–452.
 27. Мокиевский В.О., Спиридонов В.А., Токарев М.Ю., Добрынин Д.В. Современные дистанционные методы в изучении морских донных сообществ и ландшафтов прибрежной зоны // Комплексные исследования подводных ландшафтов в Белом море с применением дистанционных методов. Тр. Беломорской биостанции МГУ. Т. 11. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2012. С. 6–21.
 28. Навигационные карты Главного управления навигации и океанографии Министерства обороны СССР. Л. 26. Карта 28075. СПб.: УНиО МО РФ, 1991.
 29. Науменко М.А. Анализ морфометрических характеристик подводного рельефа Ладожского озера на основе цифровой модели // Изв. РАН. Сер. геогр. 2013. № 1. С. 62–72.
 30. Невин И.А., Буданов Л.М., Сергеев А.Ю., Рябчук Д.В., Жамойда В.А., Дронь О.В. Геолого-геофизические методы как источник базовой информации для последующих биологических исследований и картирования подводных ландшафтов // Регион. экология. 2015. № 3 (38); 4 (39). С. 5–19.
 31. Нестеров Н.А., Гузиватый В.В., Науменко М.А. Гидролокационный мониторинг донных объектов // Всерос. конф. по крупным внутренним водоемам (V Ладожский симпозиум). Сб. науч. тр. конф. СПб.: Лема, 2016. С. 287–293.
 32. Петров К.М. Биогеография океана. М.: Акад. проект, 2008. 323 с.
 33. Петров К.М. Концепция подводного ландшафта // Изв. Русского геогр. об-ва. 2020. Т. 152. № 3. С. 3–16.
 34. Подводные ландшафты Байкала / Под ред. Е.Б. Карабанова. Новосибирск: Наука, 1990. 183 с.
 35. Распопов И.М., Рычкова М.А., Стальмакова Г.А. Гидробиологическая характеристика заливов западной части шхерного района Ладожского озера, пригодных для развития водоплавающей птицы // Биологические ресурсы Ладожского озера (зоология). Л.: Наука, 1968. С. 71–104.
 36. Римский-Корсаков Н.А. Технология исследования дна акваторий и подводных объектов гидролокационными методами. Дис. ... докт. техн. наук. М.: Ин-т океанологии РАН, 2011.
 37. Русанов А.Г. Высшая водная растительность // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. М.: Ладожская монография, 2021. С. 316–322.
 38. Рыбалко А.Е., Токарев М.Ю., Терехина Я.Е., Локтев А.С., Миронюк С.Г., Росляков А.Г., Шербаков В.А., Колюбакин А.А. Использование геофизических методов для решения широкого круга задач геоэкологии морей и крупных озер // Материалы 17-й науч.-практ. конф. и выставки “Инженерная и рудная геофизика 2021”. Геленджик, 2021. М.: ЕАГЕ “Геомодель”, 2021. 8 с.
 39. Сивков В.В., Дорохов Д.В., Дорохова Е.В., Жамойда В.А., Рябчук Д.В., Сергеев А.Ю. Абиотический подход к картированию донных ландшафтов в российских секторах Балтийского моря // Регион. экология. 2014. № 1–2 (35). С. 156–165.
 40. Степанова А.Б., Воякина Е.Ю., Бабин А.В., Зуева Н.В., Зуев Ю.А. Результаты исследований прибрежной зоны Ладожского озера в районе Валаамского архипелага (1998–2019 гг.) в РГГМУ // Гидрометеорология и экология. 2020. № 60. С. 325–350.
 41. Тахтеев В.В. Байкаловедение. Материалы к семинарским занятиям. Учеб. пособие. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2000. 104 с.
 42. Ткаченко К.С. Использование аэрокосмической съемки в гидробиологических исследованиях //

- Изв. Самарского НЦ РАН. 2012. Т. 14. № 1. С. 15–31.
43. *Brisette M.B., Clarke J.E.* Side scan versus mutibeam echosounder object detection: a comparative analysis // The Int. Hydrographic Rev. 2015. V. 76. I. 2. 11 p.
44. *Che Hasan R., Ierodiconou D., Laurenson L., Schimel A.* Integrating multibeam backscatter angular response, mosaic and bathymetry data for benthic habitat mapping // LoS ONE. 2014. V. 9. I. 5. P. 1–14.
45. *Cochrane G.R., Lafferty K.D.* Use of acoustic classification of side-scan sonar data for mapping benthic habitat in the Northern Channel Islands, California // Continental Shelf Res. 2002. V. 22. P. 683–690.
46. *Fish J.P., Carr H.A.* Sound underwater images. A guide to the generation and interpretation of side-scan sonar data. Orleans: Lower Cape Publ., 1990. 188 p.
47. *Foster G., Walker B.K., Riegl B.M.* Interpretation of Single-Beam Acoustic Backscatter Using Lidar-Derived Topographic Complexity and Benthic Habitat Classifications in a Coral Reef Environment // J. Coastal Res. 2009. V. 25. № 6. Supplement. SPECIAL ISSUE № 53. Coastal Applications of Airborne Lidar Remote Sensing (FALL 2009). P. 16–26.
48. *Harris P.T., Baker E.K.* Seafloor Geomorphology as Benthic habitat: GEOHAB Atlas of seafloor geomorphologic features and benthic habitats – synthesis and lessons learned // GEOHAB Atlas of seafloor geomorphologic features and benthic habitats (First edition). Elsevier, 2012. 871 p.
49. <https://yandex.ru/maps/?l=sat&ll=30.321331%2C61.379745&z=13>
50. *Kaesler A.J., Litts T.L.* An illustrated guide to low-cost, side-scan sonar habitat Version 1.0. April 2013. 309 p.
51. *Kenny A.J., Cato I., Desprez M., Fader G., Schuttenhelm R., Stolk A., Side J.* An overview of seabed mapping technologies in the context of marine habitat classification // ICES J. Marine Sci. 2003. V. 60. I. 2. P. 411–418.
52. *Quintino V.* Benthic biotopes remote sensing using acoustics // J. Experimental Marine Biol. Ecol. 2003. V. 285; 286 (4). P. 339–353.
53. *Savini A.* Side-Scan Sonar as a Tool for Seafloor Imagery: Examples from the Mediterranean Continental Margin // Sonar Systems / Ed. *N.Z. Kolev*. 2011. P. 299–322.

УДК 551.464.6.02

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ИЗОТОПНО-КИСЛОРОДНОГО СОСТАВА РЕКИ ЯУЗЫ В ПРЕДЕЛАХ ГОРОДА МОСКВЫ В 2019–2021 гг. ПОД ВЛИЯНИЕМ СНЕГОТАЯНИЯ И СИЛЬНЫХ ДОЖДЕЙ

© 2024 г. Ю. К. Васильчук^а, Н. А. Буданцева^{а, *}

^а *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия*

**e-mail: nadin.budanceva@mail.ru*

Поступила в редакцию 19.05.2023 г.

После доработки 25.08.2023 г.

Принята к публикации 08.10.2023 г.

Выполнено исследование сезонных вариаций изотопно-кислородного состава ($\delta^{18}\text{O}$) р. Яузы с июня 2019 по ноябрь 2021 г. на основе еженедельных проб, а также изотопного состава и количества атмосферных осадков за данный период в г. Москве. Показана сезонность изотопного состава как для осадков, так и для воды реки, при этом амплитуда вариаций изотопных значений в осадках заметно выше, чем в воде реки. Показаны особенности изменения изотопного состава р. Яузы в периоды снеготаяния 2020 и 2021 гг., отличавшиеся по количеству снеготаяния в предшествующие зимние периоды и объемам талой снеговой воды. Также установлено, что в весенне-осенний период выпадение обильных дождей может приводить к быстрому (через несколько часов или на следующие сутки после дождя) изменению изотопного состава воды реки на 1.0–2.3‰.

Ключевые слова: изотопы кислорода, атмосферные осадки, река Яуза, сезонность, изотопный сигнал, талые снеговые воды.

DOI: 10.31857/S0321059624020033 **EDN:** CIKGCH

ВВЕДЕНИЕ

Изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) природных вод варьирует в широком диапазоне вследствие изотопного фракционирования, сопровождающего перенос воды в глобальном гидрологическом цикле [10, 19, 29]. Изотопный состав атмосферных осадков обусловлен вариациями температуры воздуха, интенсивностью выпадения осадков, испарением и рядом других процессов [18, 26, 30, 32]. Изотопный состав речной воды в основном соответствует изотопному составу осадков, но также он зависит от времени пребывания воды в водосборном бассейне и степени влияния гидрологических процессов — смешения с подземными, талыми снеговыми и ледниковыми водами, испарения и др. [7, 13].

В отличие от большинства химических индикаторов, изотопы ведут себя консервативно и могут дать комплексное представление об относительном участии различных источников воды

в суммарном стоке реки [16]. В связи с этим изотопные данные — надежный инструмент для наблюдений и количественной оценки пространственных эффектов процессов водного цикла [6, 11–13, 23].

В рамках международных исследовательских программ МАГАТЭ по изотопным исследованиям осадков (GNIP) и рек (GNIR) в мире решается ряд задач в области взаимосвязи осадков, поверхностных, почвенных и подземных вод, в том числе для количественных оценок гидравлических связей между различными водными объектами. Изотопные индикаторы могут применяться для локальных водосборов с быстрой реакцией на каждый эпизод выпадения осадков, в более широком масштабе они — высокоэффективный инструмент определения общей структуры формирования речного стока.

Обобщение данных последних лет по изотопному составу осадков (по сети GNIP) и речных вод (по сети GNIR), а также анализ изотопных данных из более 17 тыс. публикаций показали,

¹ Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-77-30004).

что значения изотопного состава большей части рек мира расположены вблизи глобальной линии метеорных вод, а соотношение изотопного состава кислорода и водорода в реках описывается уравнением $\delta^2\text{H} = 8.03\delta^{18}\text{O} + 8.59$, что близко к уравнению для глобальных осадков: $\delta^2\text{H} = 8.14\delta^{18}\text{O} + 10.9$. Это говорит о том, что атмосферные осадки — основной источник питания рек. Кроме того, большинство известных изотопных эффектов для осадков — температурный, высотный, количественный, испарительный — также прослеживаются в изотопном составе рек мира [20, 25]. Сопоставление изотопного состава осадков и воды рек показывает значительное сглаживание изотопных вариаций в воде рек по сравнению с осадками: как правило, в течение года в реках для значений $\delta^{18}\text{O}$ изотопные вариации $\leq 10\text{‰}$; а для рек, питающихся преимущественно за счет подземных вод, внутригодовые вариации еще меньше [8, 17, 24].

Детальные многолетние исследования изотопного состава рек в Европе показали для большей части рек Центральной Европы сезонные вариации, соответствующие изотопной сезонности в осадках или сезонности таяния снежного покрова и ледников, что характерно для рек горных районов. При этом показано, что испарение несущественно влияет на изотопный состав рек [4, 28].

Для рек городских территорий установлены особенности вариаций изотопного состава, обусловленные повышенной долей поверхностного

стока в питании рек, особенно во время сильных дождей и/или таяния снега, а также влиянием сточных вод [21]. Изотопный подход часто применяется для оценки взаимодействия природных подземных и сточных вод в городах. Цель настоящего исследования — оценка сезонных вариаций изотопно-кислородного состава р. Яузы и выявление выраженных изотопных вариаций в воде реки в периоды снеготаяния и на фоне интенсивных дождей.

МЕТОДЫ

Отбор воды из р. Яузы проводился в период с 15.06.2019 по 17.11.2021 с частотой 1 раз в неделю; всего за исследуемый период отобрано 104 пробы. Отбор воды из реки проводился на северо-востоке Москвы, в районе Олонецкого проезда, где река протекает в парковой зоне (рис. 1). В пробах воды р. Яузы выполнено определение изотопного состава кислорода ($\delta^{18}\text{O}$).

Выполнено сопоставление изотопного состава воды реки и осадков, выпадавших в г. Москве в течение исследуемого периода (отбор осадков производился на метеостанции МГУ). Особое внимание уделено сопоставлению изотопного состава воды реки и обильных дождей, сумма которых была >20 мм, выпадавших в день отбора пробы из реки или в предшествующие сутки. Следует отметить, что данные по количеству осадков для конкретных дней были сопоставлены авторами для метеостанций МГУ и ВДНХ [15] и отмечено их хорошее их совпадение. Так-



Рис. 1. Река Яуза в районе исследований 2019–2021 гг.

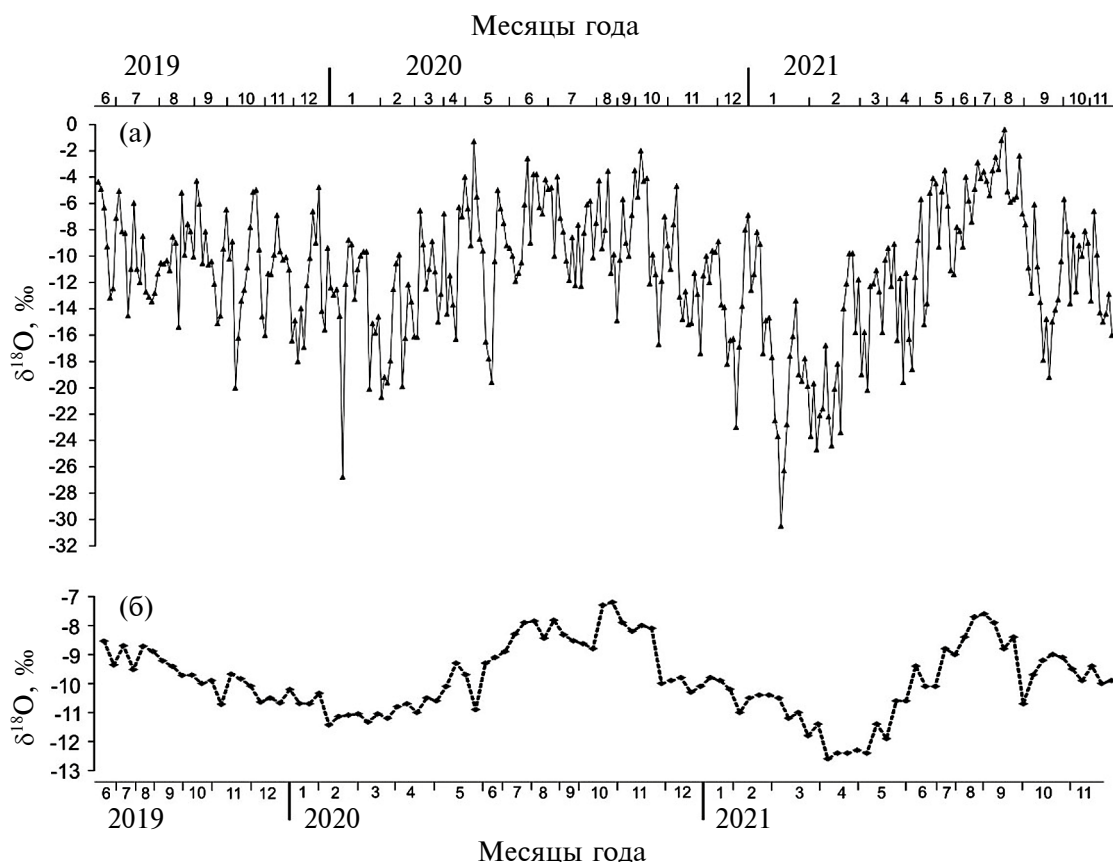


Рис. 2. Вариации $\delta^{18}\text{O}$ в осадках в г. Москве (а) и в воде р. Яузы (б) за период с 14.06.2019 по 17.11.2021.

же прослежено изменение изотопного состава воды реки в периоды весеннего снеготаяния.

Измерения изотопного состава выполнены в лаборатории стабильных изотопов кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ на масс-спектрометре “Delta-V Plus”, оснащённом опцией GasBench II. При измерении и калибровке результатов использовались международные стандарты МАГАТЭ (V-SMOW, V-SLAP, GISP и GRESP). Средняя точность измерений для значений $\delta^{18}\text{O}$ составила 0.4‰.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ в осадках

За исследуемый период (15.06.2019–17.11.2021) значения $\delta^{18}\text{O}$ в осадках варьировали от –0.4 до –30.5‰. В распределении значений $\delta^{18}\text{O}$ прослеживается явно выраженная сезонность — наиболее изотопически тяжелые осадки

выпадали в виде дождей в период с мая по сентябрь, наиболее изотопически легкие — в виде смешанных осадков и снега в период с ноября по март (рис. 2а).

Вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ в воде р. Яузы

Значения $\delta^{18}\text{O}$ в воде р. Яузы варьировали в диапазоне от –7.2 до –12.6‰, наиболее высокие значения отмечены в августе–сентябре, наиболее низкие — в марте–апреле (рис. 2б).

Сопоставление изотопных данных по осадкам и воде реки показывает следующее. Во-первых, значительно более высокая амплитуда вариаций величин в осадках по сравнению с рекой (рис. 3б): для проб осадков, выпадавших в смежные сутки, вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ могут составлять 5–6‰ и даже достигать 10‰, в то время как в воде реки для смежных проб амплитуда значений $\delta^{18}\text{O}$, как правило, ≤ 1 ‰. Во-вторых, минимумы значений изотопного состава в воде реки и в осадках во временном масштабе почти

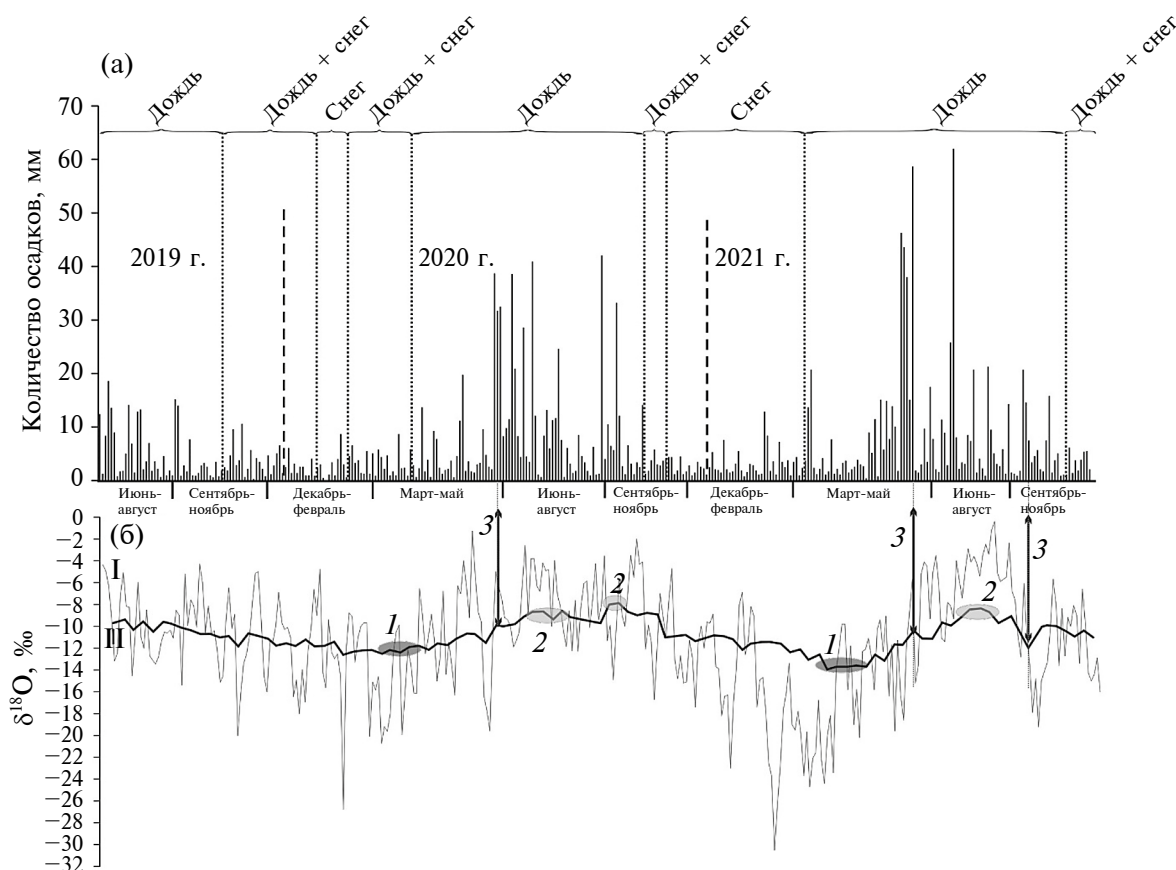


Рис. 3. Соотношение количества осадков (а) и величин $\delta^{18}\text{O}$ (б) в осадках (I) и в воде р. Яуза (II). На изотопной кривой по р. Яузе показаны минимумы величин $\delta^{18}\text{O}$ в период весеннего снеготаяния (1) и максимумы в летний период (2) и изотопный импульс интенсивных дождей (3).

не совпадают, так как для осадков минимальные значения $\delta^{18}\text{O}$, определяемые в подавляющем числе случаев температурой воздуха, отмечаются в зимнее время, в то время как в воде реки минимальные значения изотопного состава зафиксированы в конце марта – апреле. Летние максимумы значений $\delta^{18}\text{O}$ в осадках и воде реки хорошо коррелируют и отмечаются в июле–августе 2020 г. и в июле – начале сентября 2021 г. В 2020 г. в воде реки были отмечены два положительных пика значений $\delta^{18}\text{O}$ – в июле–августе и октябре (от -7.2 до -8‰), осенний пик может быть обусловлен большим количеством изотопически тяжелых осадков, выпадавших в период с 10.09.2020 по 15.10.2020 (суммарное количество осадков за этот период ~ 67 мм, значения $\delta^{18}\text{O}$ от -2 до -10‰).

В течение зимней межени изотопный состав воды реки составлял около -10 , -11‰ , что указывает на преимущественное питание за счет

грунтовых вод, средний изотопный состав которых в московском регионе составляет -10 , -12‰ [1]. В периоды весеннего снеготаяния значения изотопного состава воды реки были минимальными. При этом весной 2020 г. минимум был слабо выражен, значения $\delta^{18}\text{O}$ в воде реки в период снеготаяния (середина марта – середина апреля) были почти равны значениям $\delta^{18}\text{O}$ в период зимней межени (-10 , -11‰). В 2021 г. в период снеготаяния значения $\delta^{18}\text{O}$ в воде реки были на 1.0 – 2.5‰ ниже, чем в течение зимней межени, и варьировали от -12.3 до -12.6‰ , т. е. в этот год весенний изотопный минимум в воде реки был наиболее выражен (рис. 3б).

Несмотря на довольно равномерное распределение $\delta^{18}\text{O}$ в воде р. Яузы от -7.2 до -12.6‰ (что можно объяснить значительной долей грунтовых вод в питании реки), можно отметить влияние изотопного сигнала осадков (особенно ливневого характера) на изотопный состав воды

Таблица 1. Изменение изотопного состава воды р. Яузы на фоне выпадения интенсивных дождей (количество осадков >20 мм)

$\delta^{18}\text{O}$ (‰) в воде р. Яузы до дождя	$\delta^{18}\text{O}$ в дождевых осадках, ‰	Количество осадков, мм	$\delta^{18}\text{O}$ (‰) в воде р. Яузы после дождя	$\Delta\delta^{18}\text{O}$ в воде реки после дождя, ‰
–10.9 (24.05.2020)	–6.4 (29.05.2020)	38.7	–9.3 (30.05.2020)	+1.6
	–7.5 (30.05.2020)	31.7		
–12.4 (26.04.2021)	–5.7 (3.05.2021)	43.6	–11.4 (03.05.2021)	+1.0
–8.4 (15.09.2021)	–17.9 (20.09.2021)	20.7	–10.7 (21.09.2021)	–2.3
	–14.8 (21.09.2021)	14.6		

реки, что выражается в изменении изотопного состава реки на 1–2‰. Особенно выраженный изотопный сдвиг в воде реки отмечался в случае, если значения $\delta^{18}\text{O}$ в осадках не менее чем на 5–8‰ отличались от значения $\delta^{18}\text{O}$ в воде реки до дождя. Как правило, изотопный сигнал осадков прослеживался в периоды сильных дождей, с мая по сентябрь (рис. 3а). 29–30 мая 2020 г. выпало ~70 мм осадков со средним значением $\delta^{18}\text{O}$ –7.1‰, значения $\delta^{18}\text{O}$ в воде р. Яузы (отбор 30.05.2020) повысились на 1.6‰ – от –10.9 до –9.3‰.

С 1.05.2021 по 3.05.2021 выпало ~90 мм осадков, изотопный состав выпадавших дождей варьировал от –8.8 до –5.7‰, значения $\delta^{18}\text{O}$ в воде р. Яузы (отбор 03.05.2021) повысились на 1‰ – от –12.4 до –11.4‰. Также был выявлен сигнал заметно изотопно легких осадков в воде реки. Так, 20.09.2020–21.09.2020 выпало ~37 мм дождя со значениями $\delta^{18}\text{O}$ –15, –18‰, значение $\delta^{18}\text{O}$ в воде реки (отбор 21.09.2021) снизилось более чем на 2‰ – от –8.4 до –10.7‰ (рис. 3б; табл. 1).

СЕЗОННОСТЬ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ И ВОДЫ р. ЯУЗЫ

Отмеченная сезонность распределения изотопного состава осадков в исследуемый период 2019–2021 гг. типична для Москвы и соответствует ранее полученным данным. Так, для периодов 1970–2014 и 2014–2016 гг. распределение значений $\delta^{18}\text{O}$ в осадках имело синусоидальный характер, соответствующий повышению значений в летние месяцы и снижению в зимний период; наиболее низкие значения $\delta^{18}\text{O}$, как

правило, получены для осадков, выпадающих в январе. Для периода 2014–2016 гг. коэффициент корреляции изотопного состава осадков с температурой воздуха составил 0.96 в январе и 0.99 в июне–августе [2, 37].

Сезонность изотопного состава рек прослеживается во многих районах с гумидным климатом. Как правило, изотопная сезонность в реках проявляется в повышении величин в летнее время и снижении в зимне-весенний период. Так, например, многолетний мониторинг изотопного состава р. Дунай в г. Тульне показали, что наименьшие величины $\delta^{18}\text{O}$ отмечены в периоды таяния снега, наибольшие связаны, главным образом, с выпадением летних осадков [27]. Для большинства равнинных рек Германии сезонность изотопного состава воды рек близка к его сезонности в осадках с минимумом зимой и максимумом летом [20, 32]. Даже в районах с аридным климатом испарение не всегда приводит к полному сглаживанию сезонных вариаций в речных водах; так, например, для р. Шиянг в аридном регионе Китая показана сезонность изотопного состава, близкая к сезонности для осадков. Более низкие значения отмечены зимой и весной, более высокие – летом и осенью [36]. В городах в условиях плотной городской застройки сезонность изотопного состава осадков и рек может также коррелировать, несмотря на влияние сточных промышленных и коммунально-бытовых вод [21].

Несоответствие сезонного распределения изотопного состава осадков и рек связано, как правило, с особенностями питания рек. Так, для

рек альпийских областей Германии и Швейцарии установлено, что минимальные значения отмечаются летом (в период таяния снега в горах), максимальные — зимой [20, 32]. В районах с муссонным климатом сезонность изотопного состава рек часто связана с сезонностью выпадения осадков; так, например, для р. Меконг в Таиланде в воде реки низкие величины $\delta^{18}\text{O}$ (-11.8‰) отмечены в сезон дождей (апрель—август), высокие значения (-0.95‰) — в теплые и сухие месяцы (ноябрь—февраль) [22]. При многолетних исследованиях может быть обнаружено нарушение типичной сезонности в связи с аномальными климатическими условиями. Например, в длительные периоды низкого стока изотопный состав воды рек не будет соответствовать долгосрочным сезонным закономерностям и может определяться более высокой долей подземных вод. Для рек бассейнов Рейна и Эльбы на фоне летне-осенней засухи в 2018 г. в стоке рек заметно повысилась доля более древних изотопно легких подземных вод, что привело к заметному снижению значений изотопного состава речных вод [20].

Ранее проведенные исследования показывают, что амплитуда сезонных колебаний изотопного состава для речных вод заметно ниже, чем для осадков, что связано с участием в питании рек подземных вод (изотопный состав которых, как правило, варьирует на $\leq 5\text{‰}$ для значений $\delta^{18}\text{O}$), а также с участием в речном стоке вод крупных водных резервуаров — озер и водохранилищ, в которых происходит существенное сглаживание сезонных изотопных вариаций. Так, для воды р. Дунай (данные по 2012 г. по г. Тульну) величины $\delta^{18}\text{O}$ варьировали в течение года на $\leq 1.8\text{‰}$ [34]. В реках Карпатского региона в Румынии при наличии сезонности изотопного состава вариации величин $\delta^{18}\text{O}$ были $\leq 2\text{‰}$ (от -10.8 до -8.8‰), в то время как в осадках вариации достигали $\sim 30\text{‰}$ [24]. В Канаде в реках в десяти точках средняя амплитуда вариаций величин $\delta^{18}\text{O}$ составляет 3.2‰ , в то время как для осадков в районах с морским климатом вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ составляли $6\text{--}12\text{‰}$, а в районах с континентальным климатом $>20\text{‰}$ [14, 31]. По данным Ю.Н. Чижовой с соавторами, в 2019–2021 гг. в центральной части Восточно-Европейской равнины величины изотопного состава трех

рек (Дубна, Закза и Сосна) варьировали в гораздо более узком диапазоне (величины $\delta^{18}\text{O}$ в среднем варьировали от -7 , -8 до -12 , -13‰), чем у атмосферных осадков в этот период (значения $\delta^{18}\text{O}$ в среднем менялись от -3 до -20‰), что авторы объясняют высокой долей подземных вод в суммарном стоке рек [9].

Сезонность изотопного состава воды р. Яузы в 2019–2021 гг. была хорошо выражена (рис. 26). Весенний минимум связан с поступлением в реку большого количества изотопно легкой талой снеговой воды. Летне-осенний (в 2020 г.) и летний (в 2021 г.) максимумы обусловлены как непосредственным участием изотопно тяжелых летних дождей в стоке реки, так и утяжелением изотопного состава неглубоко залегающих грунтовых вод. При этом за исследуемый период вариации величин $\delta^{18}\text{O}$ в воде реки были заметно ниже, чем в осадках (5.4 и 30.1‰ соответственно), что объясняется значительной долей подземных вод в питании реки.

ВЛИЯНИЕ СНЕГОТАЯНИЯ НА ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ВОДЫ р. ЯУЗЫ В 2020 И 2021 гг.

Установлено, что в период снеготаяния весной 2020 г. изотопный минимум в воде реки был выражен заметно слабее, чем весной 2021 г. (рис. 36). В весенний период 2020 г. изотопный состав воды реки почти не отличался от изотопного состава воды в зимнюю межень, в то время как весной 2021 г. значения $\delta^{18}\text{O}$ в воде реки были на $1.0\text{--}2.5\text{‰}$ ниже, чем в зимнюю межень. Возможно, это объясняется тем, что в течение зимнего периода 2019–2020 гг. осадки выпадали часто в виде снега и дождя и снежный покров был довольно маломощный. Устойчивый снежный покров в Москве и Московской области окончательно установился только с 23 января, при этом на метеостанции ВДНХ мощность снежного покрова была ≤ 11 см. Установившийся в конце января снежный покров разрушился в первой декаде марта. Снежный покров в марте и апреле 2020 г. устанавливался в результате залповых снегопадов, но держался он от нескольких часов до двух–четырех дней. Для сравнения, в предыдущий зимний сезон мощность снежного покрова в Москве достигала 49 см [3]. Отсутствие выраженного половодья весной 2020 г. из-за малого

снегонакопления в зимний период 2019–2020 гг. было отмечено и для ряда рек Европейской части России [9].

Ранее для р. Сетуни было показано, что влияние талого снега на изотопный состав реки может быть довольно заметным. В пределах двух участков (в районе ул. Минской и на 100 м выше устья, на территории парка “Сказка”) в 2010 г. проводился отбор проб воды с февраля до окончания периода снеготаяния в середине апреля, частота отбора проб составляла 3–5 дней. Выявлено облегчение изотопного состава воды р. Сетуни в пик снеготаяния (вторая половина марта) на 3.0–3.5‰ по $\delta^{18}\text{O}$: от –11 до –14.5‰, при этом уже в начале апреля значения $\delta^{18}\text{O}$ повысились до –11.5, –12‰, что указывает на практически полное прекращение поступления прямого стока талых снеговых вод в реку [1]. Поступление в реки талых снеговых вод приводит к заметному снижению значений изотопного состава рек, что было установлено в разных районах мира. Для р. Дунай показано, что таяние снега, как и обильные дожди, приводит к заметным (иногда >1‰ по величине $\delta^{18}\text{O}$) кратковременным изменениям изотопного состава речной воды в течение нескольких дней или даже в течение одного дня [27]. Для рек Колымы и Маккензи показано, что в период активного снеготаяния, когда доля талых снеговых вод может достигать ≥80% общего стока, величины $\delta^{18}\text{O}$ в воде рек снижаются на 2–3‰ [33, 35].

ВЛИЯНИЕ ДОЖДЕЙ НА ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ВОДЫ р. ЯУЗЫ

Для р. Яузы влияние изотопного сигнала осадков, особенно ливневого характера (>20 мм в течение одного эпизода дождя), на изотопный состав воды реки выражалось в изменении изотопного состава реки на 1.0–2.3‰ по величине $\delta^{18}\text{O}$ в течение 1–2 дней после выпадения осадка, особенно если изотопный состав дождя заметно отличался от изотопного состава воды реки до его выпадения.

Выявленные изменения изотопного состава воды р. Яузы после выпадения интенсивных дождей показывают, что доля поверхностного стока в такие периоды может быть очень высокой, что особенно характерно для застроенных городских территорий, так как дождевая вода

через системы ливневой канализации и с водонепроницаемых поверхностей быстро попадает в реку. Например, для г. Берлина показано, что для реки, протекающей в урбанизированной части города, реакция изотопного состава воды на дожди была более выражена, чем для участка реки за пределами городской застройки [21].

Ранее авторами настоящей статьи был прослежен импульс ливня в изотопном составе воды р. Протвы и ее притоков в пределах Сатинского учебно-научного полигона географического факультета МГУ. Изотопный состав р. Протвы до дождя составлял в среднем –10.8‰ по значению $\delta^{18}\text{O}$, после дождя с величиной $\delta^{18}\text{O} = -6.2‰$ в течение 12 ч изотопный состав р. Протвы был изотопно тяжелее на 0.6‰ [1, 5].

ВЫВОДЫ

Для осадков Москвы и воды р. Яузы для исследуемого периода выявлена сезонность изменения изотопного состава: в осадках взаимосвязь изотопно-кислородного состава с температурой воздуха хорошо выражена, в воде р. Яузы сезонность вариаций связана с источниками питания реки: подземными водами, поверхностным стоком (дождевыми и талыми снеговыми водами), а также с изменением доли их вклада в питание реки в разные сезоны года.

В атмосферных осадках Москвы наиболее низкие (изотопно легкие) значения отмечены в зимнее время, наиболее высокие (изотопно тяжелые) в летнее время. В воде реки наименьшие значения отмечены в период снеготаяния, наибольшие — в августе–сентябре.

В период снеготаяния в 2021 г. изотопный минимум в воде реки был более выражен (снижение величин $\delta^{18}\text{O}$ в среднем на 2‰ относительно зимней межени), чем в период снеготаяния в 2020 г., когда явного изменения изотопного состава воды реки не было отмечено, что обусловлено заметно меньшим снегонакоплением в зимний период 2019/2020 гг. по сравнению с зимним периодом 2020/2021 гг.

Выпадение изотопно легкого снега в зимний период не приводит к снижению изотопных ве-

личин в воде реки. В летний период (с мая по сентябрь) выпадение обильных дождей в большинстве случаев приводило к выраженному изменению изотопного состава воды реки (снижению или повышению значений $\delta^{18}\text{O}$ на 1.0–2.3‰ в зависимости от изотопного состава осадков), сигнал летних дождей прослеживался уже через несколько часов или на следующие сутки после выпадения.

Авторы выражают признательность Н. Буданцеву (РТУ МИРЭА) за систематическую помощь в отборе речных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Чижова Ю.Н. Изотопные методы в географии. Ч. 3. Геохимия стабильных изотопов атмосферы и гидросферы. М.: Геогр. фак. МГУ, 2013. 216 с.
2. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук Дж.Ю., Ерёмкина И.Д., Блудушкина Л.Б. Вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ и содержание водорастворимых солей в атмосферных осадках Москвы в 2014–2016 гг. // Вестн. МГУ. Сер. география. 2021. № 2. С. 35–43.
3. Литвиненко В.В., Фролов Д.М. Метеорологические особенности зимнего периода 2019/2020 года в Москве // Индикация состояния окружающей среды: теория, практика, образование. Тр. Седьмой междунаро. науч.-практ. конф. М.: Филинь, 2020. С. 56–66.
4. Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Агафонова С.А., Евстигнеев В.М., Ефремова Н.А., Повалишников Е.С. Внутригодовое распределение стока равнинных рек Европейской территории и его изменение // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 4. С. 4–20.
5. Чижова Ю.Н., Буданцева Н.А., Ефимова Л.Е., Лукьянова А.Н., Суркова Г.В., Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный состав атмосферных осадков и воды в речной системе средней Протвы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. география. 2013. № 2. С. 84–93.
6. Bowen G.J., Ehleringer J.R., Chesson L.A., Stange E., Cerling T.E. Stable isotope ratios of tap water in the contiguous USA // Water Resour. Res. 2007. V. 43. W03419. doi:10.1029/2006WR005186.
7. Bowen G.J., Kennedy C.D., Liu Z., Stalker J. Water balance model for mean annual hydrogen and oxygen isotope distributions in surface waters of the contiguous United States // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2011. V. 116. P. 1–14. <https://doi.org/10.1029/2010JG001581>
8. Chase C.A. Isotopic Composition of Precipitation and River Water: Measurement of $\delta^2\text{H}$, $\delta^{17}\text{O}$, $\delta^{18}\text{O}$, and ^3H in Southeastern New Brunswick. Master thesis. New Brunswick: New Brunswick Univ. press, 2018. 124 p.
9. Chizhova J., Kireeva M., Rets E., Ekaykin A., Kozachek A., Veres A., Zolina O., Varentsova N., Gorbarenko A., Povalyaev N., Plotnikova V., Samsonov N., Kharlamov M. Stable isotope ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) signature of river runoff, groundwater and precipitation in three river basins in the center of East European Plain // Earth system Sci. Data. 2022. <https://doi.org/10.5194/essd-2022-145>
10. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. 1964. V. 16. № 4. P. 436–468.
11. Fekete B.M., Gibson J.J., Aggarwal P., Vorosmarty C.J. Application of isotope tracers in continental scale hydrological modeling // J. Hydrol. 2006. V. 330. P. 444–456. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.04.029
12. Gat J.R., Bowser C.J., Kendall C. The contribution of evaporation from the Great Lakes to the continental atmosphere; estimate based on stable isotope data // Geophys. Res. Lett. 1994. V. 21. I. 7. P. 557–560. doi:10.1029/94GL00069
13. Gibson J.J., Aggarwal P., Hogan J., Kendall C., Martinnelli L.A., Stichler W., Rank D., Goni I., Choudhry M., Gat J., Bhattacharya S., Sugimoto A., Fekete B., Pietroniro A., Maurer T., Panarello H., Stone D., Seyler P., Maurice-Bourgoin L., Herczeg A. Isotope studies in large river basins: a new global research focus // Eos. 2002. V. 83. № 52. P. 613–617.
14. Gibson J.J., Holmes T., Stadnyk T.A., Birks S.J., Eby P., Pietroniro A. ^{18}O and ^2H in streamflow across Canada // J. Hydrol.: Regional Studies. 2020. V. 32. 100754. <https://rp5.ru>
15. Isotope tracers in catchment hydrology / Eds C. Kendall, J.J. McDonnell. Amsterdam: Elsevier, 1998. 803 p.
16. Iwatake K., Hirata H., Oda A., Okakita N., Ueda A. Isotope and chemical studies of groundwater in the Kurobe River alluvial fan, Toyama, Japan, for the efficient utilization of groundwater heat // Groundwater for Sustainable Development. 2022. V. 17. 100756. doi:10.1016/j.gsd.2022.100756
17. Kaiser A., Scheifinger H., Kralik M. et al. Links between meteorological conditions and spatial/temporal variations in long-term isotope records from the Austrian precipitation network. Vienna: IAEA, 2001. P. 57–59 (IAEA-CN-80/63).

19. Kendall C., Coplen T.B. Distribution of oxygen-18 and deuterium in river waters across the United States // Hydrol. Processes. 2001. V. 15. I. 7. P. 1363–1393. doi:10.1002/hyp.217
20. Koeniger P., Stumpp C., Schmidt A. Stable isotope patterns of German rivers with aspects on scales, continuity and network status // Isotopes in Environmental and Health Studies. 2022. V. 58. I. 4–6. P. 363–379. doi: 10.1080/10256016.2022.2127702.
21. Kuhlemann L.-M., Tetzlaff D., Soulsby C. Urban water systems under climate stress: An isotopic perspective from Berlin, Germany // Hydrol. Processes. 2020. V. 34. I. 18. P. 3758–3776. doi:1002/hyp.13850
22. Laonamsai J., Ichiyangi K., Patsinghasanee S., Kamdee K., Tomun N. Application of stable isotopic compositions of rainfall runoff for evaporation estimation in Thailand Mekong River basin // Water. 2022. V. 14. P. 2803. https://doi.org/ 10.3390/w14182803
23. McGuire K.J., McDonnell J.J., Weiler M., Kendall C., McGlynn B.L., Welker J.M., Seibert J. The role of topography on catchment-scale water residence time // Water Resour. Res. 2005. V. 41. W05002. doi:10.1029/2004WR003657
24. Nagavciuc V., Bădăluță C.-A., Ionita M. Tracing the relationship between precipitation and river water in the Northern Carpathians base on the evaluation of water isotope data // Geosci. 2019. V. 9. P. 198. https://doi.org/10.3390/geosciences9050198
25. Nan Y., Tian F., Hu H., Wang L., Sihan Zhao S. Stable Isotope Composition of River Waters across the World // Water. 2019. V. 11. I. 9. P. 1760. doi:10.3390/w11091760
26. Rank D., Papesch W. Isotopic composition of precipitation in Austria in relation to air circulation patterns and climate // Isotopic composition of precipitation in the Mediterranean Basin in relation to air circulation patterns and climate. Vienna: IAEA, 2005. P. 19.
27. Rank D., Wyhlidal S., Schott K., Jung M., Heiss G., Tudor M. A 50 years' isotope record of the Danube River water and its relevance for hydrological, climatological and environmental research // Acta zoologica bulgarica. Suppl. 7. 2014. P. 109–115.
28. Rank D., Wyhlidal S., Schott K., Weigand S., Oblin A. Temporal and spatial distribution of isotopes in river water in Central Europe: 50-year experience with the Austrian network of isotopes in rivers // Isotopes Environ. Health Stud. 2018. V. 54. I. 2. P. 115–136. https://doi.org/10.1080/10256016.2017.1383906
29. Rozanski K., Araguas-Araguas L., Gonfiantini R. Isotopic patterns in modern global precipitation // Climate change in continental isotopic records. 1993. V. 78. P. 1–36. https://doi.org/10.1029/GM078p0001
30. Rozanski K., Gonfiantini R. Isotopes in climatological studies // IAEA Bull. 1990. V. 32. I. 4. P. 9–15.
31. Smith A., Welch C., Stadnyk T. Assessment of a lumped coupled flow-isotope model in data scarce Boreal catchments // Hydrol. Process. 2016. V. 30. P. 3871–3884. https://doi.org/10.1002/hyp.10835
32. Freyberg von J., Rücker A., Zappa M., Schlumpf A., Studer B., Kirchner J.W. Four years of daily stable water isotope data in stream water and precipitation from three Swiss catchments // Sci. Data. 2022. V. 9. P. 46. https://doi.org/10.1038/s41597-022-01148-1
33. Welp L.R., Randerson J.T., Finlay J.C., Davydov S.P., Zimova G.M., Davydova A.I., Zimov S.A. A high-resolution time series of oxygen isotopes from the Kolyma River: Implications for the seasonal dynamics of discharge and basin-scale water use // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. P. L14401.
34. Wyhlidal S., Rank D., Schott K., Heiss G., Goetz J. Analysis of isotopic signals in the Danube River water at Tulln, Austria, based on daily grab samples in 2012 // Isotopes Environ. Health Studies. 2014. V. 50. Iss. 4. P. 448–460.
35. Yi Y., Gibson J.J., Cooper L.W., Hélie J.-F., Dick T.A. Synoptic and time-series stable isotope surveys of the Mackenzie River from Great Slave Lake to the Arctic Ocean, 2003 to 2006 // J. Hydrol. 2010. № 383. P. 223–232.
36. Zhu G., Liu Y., Shi P., Jia W., Zhou J., Liu Y., Ma X., Pan H., Zhang Y., Zhang Z., Sun Z., Yong L., Zhao K. Stable water isotope monitoring network of different water bodies in Shiyang River Basin, a typical arid river in China // Earth System Sci. Data. Discussions. 2021. https://doi.org/10.5194/essd-2021-79
37. Zykin N.N., Tokarev I.V., Vinograd N.A. Monitoring of stable isotopes ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) in precipitations of Moscow city (Russia): comparison for 2005–2014 and 1970–1979 periods // Вестн. Санкт-Петербургского гос. ун-та. Науки о Земле. 2021. Т. 66 (4). С. 723–733. https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.405

УДК 556.551 (571.53)

ИРКУТСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ: ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ И ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОТОКОВ И ЗАЛИВОВ¹

© 2024 г. И. Б. Воробьева^a, *, Н. В. Власова^a, И. А. Белозерцева^a, А. Н. Воробьев^a

^aИнститут географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, 664033 Россия

*e-mail: Irina-Vorobyeva@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.04.2023 г.

После доработки 23.06.2023 г.

Принята к публикации 08.10.2023 г.

Рассмотрена история формирования Иркутского водохранилища, его влияние на изменение прилегающей территории и химический состав вод. Проанализированы результаты гидрохимических исследований, проведенных авторами в 2022 г. в заливах водохранилища и его притоках, проведена сравнительная характеристика с более ранними исследованиями. Установлено, что воды рек, впадающих в Иркутское водохранилище, относятся к сульфатно-гидрокарбонатному магниевое-кальциевому типу. Выявлено, что химический состав рек, заливов Иркутского водохранилища на ключевых участках, где расположены населенные пункты, коттеджные поселки и садоводства, отличается от фоновое и является хлоридно-гидрокарбонатным магниевое-кальциевым. Микроэлементный состав вод большей части водохранилища соответствует границам величин базового содержания микроэлементов в истоке р. Ангары.

Ключевые слова: исток Ангары, Байкал, водохранилище, заливы, притоки, гидрохимия, экология.

DOI: 10.31857/S0321059624020047 **EDN:** C1JBFF

ВВЕДЕНИЕ

Ангара — река в Восточной Сибири, самая крупная из правых притоков Енисея и единственная, берущая начало в оз. Байкал. Ангара — редкий пример большой реки, водный режим которой практически полностью зарегулирован от истока до устья четырьмя большими водохранилищами. Водохранилище Иркутской ГЭС — первое из Ангарского каскада, оно протянулось на 56 км; Братское — на 570 км; Усть-Илимское — на 300 км; Богучанское — на 375 км. Иркутское водохранилище имеет площадь 154 км², длину береговой полосы 300 км и объем водной массы 2.1 км³.

Иркутская ГЭС расположена на Ангаре в г. Иркутске, в 56 км от оз. Байкал. При распространении подпора от плотины до Байкала и подъеме его уровня выше 1.0–1.2 м долина Ангары превратилась в залив озера, а сам Байкал стал частью Иркутского водохранилища. При относительно небольшой длине в 1779 км Ангара имеет большой перепад высот, равный 380 м,

уклон 0.2 м/км, что дает существенный гидроэнергетический потенциал [32].

В результате хозяйственной деятельности режим Ангары напоминает не речной, а озерный. Особенность Ангары в том, что она находится в зоне сурового климата, но ледостав наступает позднее, чем на других реках Сибири, что связано с быстрым течением и притоком теплых глубинных вод Байкала, которые не успевают остыть [3].

Образование водохранилища привело к изменению Ангарой ряда ее свойств: сокращение скорости течения воды у плотины до десятых долей метра в секунду, увеличение глубин на участке от Байкала до Иркутска привело к исчезновению “фабрики донного льда” и зимних разливов Ангары, ниже плотины Иркутской ГЭС Ангара перестала замерзать на участке длиной 5–10 км [22].

Создание Иркутского водохранилища обострило основное противоречие интересов — экономики, с одной стороны, и населения, природных объектов, которым наносится ущерб вследствие затопления, с другой. Иркутское водохранилище приносит большую экономиче-

¹ Исследование выполнено в рамках государственного задания (тема FWEM-2021-0002, госрегистрация AAAA-A21-121012190055-7).

скую пользу, но создает много геоэкологических проблем: разрушение берегов, размыв русла реки в нижнем бьефе, повышение уровня грунтовых вод, перестройка фауны водоема. При подъеме уровня водохранилища на соседних территориях повышается и уровень грунтовых вод, что вызывает подтопление сельскохозяйственных угодий, населенных пунктов и других объектов. Низко расположенные территории заболачиваются, что в целом ухудшает их санитарное состояние. Частые колебания уровня воды вызывают размывы и обрушение берегов, что приводит к расширению площади водохранилища относительно его первоначальных размеров [24, 29, 34].

Экологические проблемы Иркутского водохранилища особенно остро проявились в экстремальные по водности годы. В период повышенной водности (1983–1995 гг.) превышение отметки нормального подпорного уровня происходило 10 раз. По данным [27], с 1996 г. в бассейне озера установился рекордный по продолжительности маловодный период. Уровень оз. Байкал не удерживался на установленной законодательством минимально допустимой отметке 456 м и опускался в период экстремального маловодья (2015–2017 гг.) до 455.7 м.

По данным из Государственного доклада о состоянии и об охране окружающей среды в Иркутской области в 2021 г. [18], уровень воды оз. Байкал в 2021 г. повысился на 1.02 м, что на 0.07 м больше, чем в 2020 г. В целях минимизации рисков высоких расходов через Иркутскую ГЭС и с учетом стабилизации обстановки на р. Иркут, а также для предотвращения существенного повышения уровня Байкала осуществлялось поэтапное наращивание сбросных расходов Иркутской ГЭС, и к концу года уровень понизился до отметки 456.78 м Тихоокеанской системы высотных отметок (ТО), что выше, чем в 2020 г.

В настоящее время опубликовано большое количество работ по изучению химического состава вод оз. Байкал и р. Ангара [4, 5, 11, 12, 21, 26, 28, 35, 37]. Во временном аспекте фиксировались незначительные изменения ионного состава байкальских вод. Согласно данным Г.Ю. Верещагина [8] и К.К. Вотинцева [10], содержания

гидрокарбонат-иона, хлоридов, сульфатов, кальция, магния мало менялись.

Химический состав воды Ангара определяет прежде всего влиянием Байкала. “Основными характерными гидрохимическими особенностями, которые определяются особенностями питания Ангара, являются очень малая минерализация воды, малое изменение минерализации по длине реки и малая амплитуда внутригодовых колебаний минерализации. Эти особенности обусловлены тем, что основную массу воды реки составляет байкальская” (с. 57 в [5]).

Исследования ионного состава истока Ангара проводили многие исследователи. Исследованиями И.В. Глазунова [13] и В.И. Гребенщиковой с соавторами [20] выявлены незначительные колебания содержания гидрокарбонат-иона — от 67.63 до 66.52 мг/дм³, хлоридов — от 0.54 до 0.73, сульфатов — на более высоких уровнях — от 3.96 до 5.65. Весьма значимые изменения установлены и в содержании кальция и магния: 16.40–14.99 и 2.58–3.27 соответственно. Изменения содержания калия и натрия показали подвижность этих элементов — 3.98 до 4.71 мг/дм³ соответственно.

Цель исследования — дать характеристику р. Ангара от истока до г. Иркутска в историческом аспекте и определить особенности современного состояния Иркутского водохранилища и его притоков по гидрохимическим показателям.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования — акватории заливов Иркутского водохранилища от истока р. Ангара до плотины Иркутской ГЭС и притоки по левому и правому берегу.

Первое научное описание Ангара дала правительственная экспедиция Д.Г. Мессершмидта, работавшая в Сибири в течение 1720–1727 гг. Геодезистом П.Г. Чичаговым в 1725–1730 гг. была выполнена инструментальная съемка Ангара. Отрывочные сведения по изучению Ангара получены И.И. Гmeliным, Г.Ф. Миллером, С.П. Крашенинниковым. В конце XVIII в. академик П.С. Паллас опубликовал описание

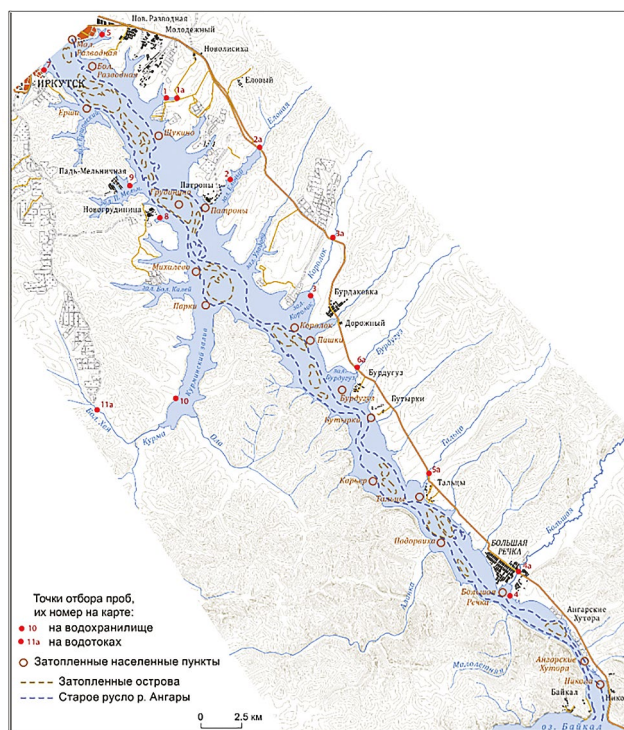


Рис. 1. Иркутское водохранилище: старое русло, населенные пункты, водотоки, точки отбора проб.

Прибайкалья. Детальное изучение Ангары и ее бассейна началось в середине XIX в., когда в Приангарье пришла экспедиция А.Ф. Миддендорфа. В конце XIX — начале XX вв. гидрографические работы были сосредоточены в ведомстве путей сообщения, так как реки имели значение прежде всего как транспортные пути. Геологическое изучение бассейна р. Ангары начаты И.Д. Черским, А.Л. Чекановским, П.К. Яворским и В.А. Обручевым. В начале XX в. на Ангаре стали проводиться регулярные гидрологические наблюдения за уровнями воды, стоком, температурой воды и т. д., а самый первый сбор информации начался в Иркутске в 1886 г. [17].

В 1920-х гг. гидрологи А.В. Вознесенский, В.Б. Шостакович, С.Л. Арцыбашев, С.Н. Лаптев и другие проводили исследования особенностей водного режима Ангары, специфики образования льда и других свойств реки [2].

В середине XX в. была опубликована работа Г.Ю. Верещагина [7], в которой детально изучен гидрологический режим Ангары на участке исток—Иркутск. В книге В.М. Малышева [25] (стр. 32) дано описание русла Ангары: “Вытекая

из Лиственничного залива Байкала, Ангара на протяжении 2.5 км течет в широком (около 1 км) каменном лотке, окаймленном непосредственно опускающимися к реке крутыми склонами Приморского хребта. Дальше на правом берегу русло отжимается нижней террасой, сложенной аллювием, постепенно приобретающей ширину в несколько км. На 6-м километре появляется первый остров на русле реки. Ниже 30 километра от истока количество галечных островов в русле становится уже настолько большим, что часто трудно опознать, куда направляется главный поток. Левый берег держится неизменно высоким до 73 км, где в Ангару впадает ее левый приток — р. Иркут. Правый берег почти на всем протяжении этого верхнего отрезка невысок, и лишь в 15–20 км от Иркутска непосредственно к реке подходит верхняя терраса, возвышающаяся над рекой на 25–30 м. Ширина речной долины на этом первом отрезке верхнего участка составляет в среднем 3–5 км, лишь в наиболее узких местах уменьшается до 2–2.5 км” (рис. 1).

В районе Иркутска планировалось построить три ГЭС: Байкальскую, Бархатовскую и Култукскую. Территория, отведенная под Байкаль-

скую ГЭС, характеризовалась более простыми геологическими условиями, чем территории других ГЭС района, а также освоенными площадями, что способствовало развитию индустриальной базы восточных окраин. Затопляемый лес и месторождения полезных ископаемых предполагалось выработать раньше поднятия подпора [6].

Согласно монографии “Гипотезы решения Ангарской проблемы”: “Число затопляемых поселений по р. Ангаре в пределах бьефа составит 12 с общим количеством дворов порядка 300. Культурные и пахотные земли попадут в зону затопления лишь в пределах жилых поселков” (25, с. 25). Предполагалось, что большого вреда сельскому хозяйству нанесено не будет, так как основными занятиями населения были рыбалка, заготовка и сплав леса.

В реальности, по официальным данным [31], в зоне затопления Иркутского водохранилища оказалось 138.6 тыс. га земли, ~32 тыс. га — это сельскохозяйственные поля, остальное — леса и луга. Более двух сотен населенных пунктов в той или иной степени пострадали: одна их часть ушла под воду целиком, жители другой были переселены (3.3 тыс. дворов, 17 тыс. человек), а некоторые потеряли часть улиц. Под водой оказались участок шоссейной дороги Иркутск—Листвянка и участок Транссиба от Иркутска до станции Байкал.

Большинство поселений, попавших под затопление, составляли малодворки, заимки. На правом берегу крупные поселения — Тальцы и Большая Речка, в остальных — по 5–6 домов. На левом берегу — Михалево, Грудиного, станция Подорвиха. Деревни стояли каждая на своей речке. На правой стороне — Разводная — длинная деревня вдоль Ангары; Патроны, Бутырки — на речке Чернушке; Шукино, Пашки и Бурдаковк — на речке Королок; Бурдугуз, Тальцы и Большая Речка — на одноименных речках. В Тальцах был стекольный завод. На левой стороне Ангары стояли железнодорожные станции Подорвиха, Выдрино, Малолетка и большая деревня Михалево [33].

Из зоны затопления было перенесено и ликвидировано несколько промышленных пред-

приятий. Так, в пос. Тальцы был уничтожен стекольный завод, из пос. Большая Речка в новый поселок перенесена Большереченская судостроительная верфь, из с. Бурдугуз перебазирована Ангарская сплавная контора, была построена новая автодорога — по правому берегу водохранилища от г. Иркутска до пос. Лиственничного [30].

Из старых поселений на своих первоначальных местах остались населенные пункты в самом истоке Ангары — Листвянка, порт Байкал и Никола.

Левый берег Иркутского водохранилища крутой, менее доступный и малоосвоенный. В настоящее время большая часть населенных пунктов располагается не на побережье, а в удалении. Небольшие поселки, садоводства и турбазы в основном располагаются ближе к Иркутску. Правый берег более пологий и заселенный, на нем расположилось большое количество баз отдыха, детских лагерей, дачных и коттеджных поселков.

В Иркутском водохранилище насчитывается более 20 заливов — Еловый, Уладова, Королок, Бурдаковка, Бурдугуз и др. Самый большой из них — зал. Курминский, длина которого составляет 11 км, площадь — 20 км². На его берегах, а также в заливах Ерши, Бурдугуз, Мельничная падь, Еловый расположено множество туристических и рекреационных объектов.

На участке от истока до плотины Иркутской ГЭС в Ангару впадает множество рек, речушек, ручьев и временных водотоков, основные — Большая, Тальца, Бурдугуз, Королок, Аланка, Курма (табл. 1).

Левобережные притоки берут начало в северных отрогах Восточного Саяна. Они имеют быстрое течение и многочисленные пороги, в обычном состоянии — короткие и маловодные. Летом могут быть полноводными за счет выпадающих осадков и таяния снега, накопившегося в их бассейнах в течение зимнего периода.

Правые притоки, стекающие с пологого берега, более протяженные и полноводные.

Таблица 1. Притоки Иркутского водохранилища (прочерк — нет данных; р. Курма (2.5 км) образуется от слияния рек Байсик (14 км) и Шинихта (19 км); у Курмы есть притоки Дабат (11 км) и Большая Хея

Название	Залив, куда впадает река	Расстояние от истока, км	Длина, км
Правые притоки			
Водоток — падь Банная,	Иркутское водохранилище	4	13.0
Водоток — падь Распопиха	То же	5	11.0
Водоток — падь Никулиха	“	6	11.0
Большая	“	15	37.0
Водоток — падь Щеглова	“	16	—
Тальца (Правая Тальца)	Тальцы	18	26.0
Бурдугуз (Правый Бурдугуз)	Бурдугуз	32	26.0
Королок	Королок	39	28.0
Левые притоки			
Водоток — падь Малолетняя	Иркутское водохранилище	11	—
Аланка	То же	16	19.0
Курма	Курминский	46	2.5

Качество воды водохранилища определяется химическим составом байкальских вод, являющихся основным источником формирования водной массы водохранилища.

При нормальном подпорном уровне (НПУ) 457 м площадь водохранилища составляет 17 тыс. га при уровне мертвого объема (УМО) 453–13 тыс. га. Полный объем — 2103 млн м³, полезный — 450 млн м³. Длина водохранилища — 56 км, максимальная ширина — 4.2 км, глубина у плотины ГЭС — 35 м, средняя — 10 м, площадь мелководий до 1 м — 65 км², от 1 до 2 м — 67.

До строительства Иркутской ГЭС в узких местах русла высота подъема воды достигала 9 м — зимой за счет скопления донного льда и шуги, летом за счет обильного выпадения осадков. Расход воды в истоке Ангары составляет 1855 м³/с.

В основу работы положены результаты полевых работ авторов в 2022 г., а также ранее опубликованные данные других исследователей. Анализируются материалы, полученные на участках Иркутского водохранилища, подверженных антропогенному воздействию разной степени, и водотоках, впадающих в водохранилище.

Отбор проб поверхностной воды осуществлялся в соответствии с ГОСТом [16]. Способ отбора проб определялся целями анализа и перечнем определяемых компонентов. Всего отобрано и проанализировано 98 проб. Температу-

ру в местах пробоотбора измеряли с помощью термометра. Химические анализы выполнены в лаборатории геохимии ландшафтов и географии почв и Химико-аналитическом центре Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН по стандартным методикам. Величину pH, содержание фторидов, хлоридов, гидрокарбонатов, фосфатов, аммония, нитритов, взвешенных веществ в воде определяли в полевых условиях с помощью полевой комплексной химической лаборатории с дополнительным оборудованием (рН-метр, фотоколориметр и др.) непосредственно в день отбора проб по стандартным общепринятым методикам с учетом требований ГОСТов [1, 14–15]. Определение химических элементов проводилось на приборе “Optima 2000DV” — оптическом эмиссионном спектрометре с индукционной плазмой и компьютерным управлением (фирма “Perkin Elmer LLC”, США), с чувствительностью от 0.001 до 50 000 мг/дм³ (для микро- и макроэлементов). Пробы воды для определения концентрации тяжелых металлов консервировались соляной кислотой и хранились в стеклянной посуде ≤5 сут.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

За время существования водохранилища у него сформировался собственный гидрохимический режим, обусловленный физико-географическими особенностями территории водосбора и протекающими внутриводоемными процессами.

Настоящими исследованиями установлено, что концентрации ионов водорода в заливах Иркутского водохранилища меняются в пределах слабощелочных — от 8.04 до 8.35 единиц рН. Диапазоны колебаний различаются незначительно: по правому берегу минимальные значения — 8.04, максимальные — 8.29; по левому — 8.05 и 8.35 соответственно.

Заливы с правой стороны водохранилища в основном мелководные с хорошим прогревом воды, температура воды в июне уже достигала +16–24°С, а с левой стороны — более холодные с температурой воды 11.0–15.0°С.

По электропроводности воды оценивается общее содержание ионов [23]. В результате исследований обнаружено, что для Иркутского водохранилища характерна низкая электропроводность воды (122–166 мкСм/см), что свидетельствует о невысоких концентрациях ионов. Ранее установленная электропроводность воды Байкала — 111–117 мкСм/см. Водотоки, несущие воды в Иркутское водохранилище, имеют высокую электропроводность воды — 116–218 мкСм/см; исключение — р. Королок, электропроводность ее воды — 75 мкСм/см.

Содержание кислорода в поверхностных водах служит косвенной характеристикой качества поверхностных вод. На содержание кислорода в воде оказывают влияние температура воды и воздуха, атмосферное давление, количество осадков, а также степень ее минерализации. По данным полевых исследований, содержание кислорода в воде более прогретых заливов (правого берега) колеблется от 7.08 до 14.57 мг/дм³ при среднем значении 11.06, а в заливах левого берега (более холодных) — от 11.62 до 18.0 мг/дм³ при среднем значении 14.22.

Содержание основных ионов в воде Иркутского водохранилища и рек, впадающих в него, представлены на рис. 2. Установлено, что содержание фторидов колеблется от 0.145 до 0.185 мг/дм³, их минимальная концентрация — в зал. Большая Речка, а максимальная — в зал. Щучьем (коттеджный пос. Хрустальный парк). Обнаружены максимальные concentra-

ции хлоридов в заливах Королок (28.10 мг/дм³) и Щучий (11.01 мг/дм³) при средних значениях 4.02, что, по-видимому, связано с расположением на берегах заливов большого количества коттеджей, дачных и туристско-рекреационных объектов. Содержание сульфатов меняется незначительно (12.00–14.50 мг/дм³). Фосфаты содержатся в очень малых количествах — ниже предела обнаружения, и только в зал. Щучьем их концентрации составляют 0.133 мг/дм³. Содержание сульфат-ионов в заливах левого берега меньше — 11.50 мг/дм³, что, по-видимому, связано с более низкой температурой воды, меньшей заселенностью и доступностью для туристов.

Реки, впадающие в Иркутское водохранилище, характеризуются низкой минерализацией, более высоким содержанием хлоридов и сульфатов, чем воды заливов, что согласуется с данными, полученными Е.Н. Тарасовой и др. [36]. По сумме ионов воды исследованных притоков можно разделить на две группы. В первую группу можно отнести реки Еловую, Тальцу, Бурдугуз, Большая Хея (минерализация от 77 до 113 мг/дм³). Формирование химического состава их воды происходит среди юрских и четвертичных отложений. Ко второй группе относятся воды рек Королок и Большой с минерализацией от 35 до 57 мг/дм³. Химический состав их вод формируется за счет растворения продуктов выветривания кристаллических пород.

Концентрации ионов кальция колебались в пределах от 21.66 до 33.77 мг/дм³ (реки Еловая и Тальца соответственно). Ионы магния находятся в близких концентрациях в воде как водохранилища, так и в водотоках.

Для представления химического состава вод авторами данной статьи использована формула Курлова (табл. 2). Согласно данным В.И. Гребенщиковой с соавторами [19, 20], воды истока Ангара по гидрохимическим показателям относятся к сульфатно-гидрокарбонатному магниевому-кальциевому типу. Установлено, что данный тип вод определяется почти во всех заливах Иркутского водохранилища. Исключение составляют территории, где расположены населенные пункты, коттеджные поселки, садовые некоммерческие товарищества (СНТ) и дачные

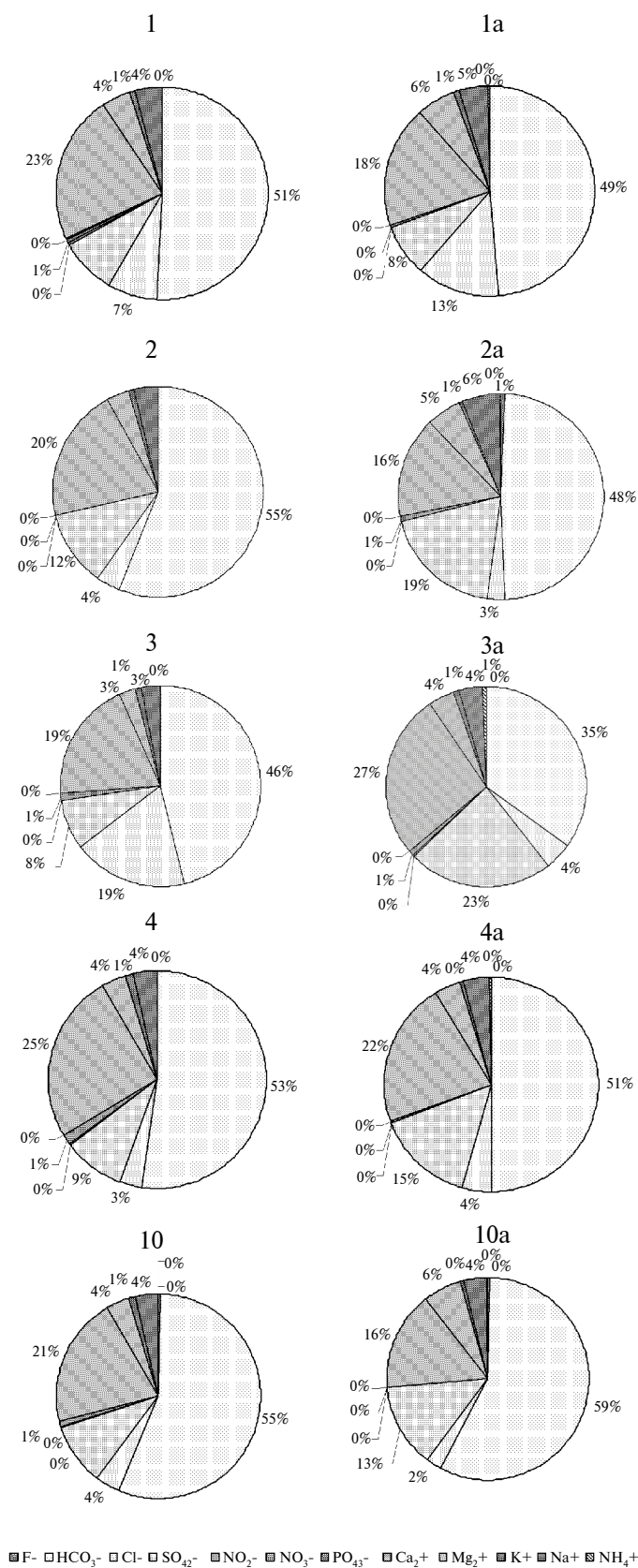


Рис. 2. Химический состав вод Иркутского водохранилища. Заливы: Ново-Лисихинский (1) и речка, впадающая в залив (1а); Еловый (2) и р. Еловая (2а); Королок (3) и р. Королок (3а); Большая речка (4) и р. Большая (4а); Курминский (10) и р. Большая Хейя (10а).

Таблица 2. Формула Курлова вод Иркутского водохранилища и его притоков, 2022 г.

№ точки	Местоположение	Формула Курлова
1	Ново-Лисиха, коттеджный пос. “Хрустальный парк”, залив	$M_{0.084} \frac{HCO_3 67 Cl 17 SO_4 14 T}{Ca 67 Mg 21 Na 10} T_{24.0}$
1a	Ново-Лисиха, коттеджный пос. “Хрустальный парк”, ручей впадает в залив	$M_{0.139} \frac{HCO_3 59 Cl 27 SO_4 13 T}{Ca 55 Mg 32 Na 12} T_{14.5}$
2	зал. Еловый	$M_{0.072} \frac{HCO_3 72 SO_4 19 Cl 8 T}{Ca 68 Mg 20 Na 10} T_{16.0}$
2a	р. Еловая	$M_{0.083} \frac{HCO_3 61 SO_4 30 Cl 6 T}{Ca 52 Mg 30 Na 17} T_{18.0}$
3	зал. Королок	$M_{0.066} \frac{HCO_3 51 Cl 36 SO_4 11 T}{Ca 71 Mg 17 Na 10} T_{26.0}$
3a	р. Королок	$M_{0.035} \frac{HCO_3 47 SO_4 40 Cl 11 T}{Ca 71 Mg 18 Na 9} T_{10.5}$
4	зал. Большая речка	$M_{0.060} \frac{HCO_3 73 SO_4 17 Cl 8 T}{Ca 72 Mg 18 Na 9} T_{18.0}$
4a	р. Большая	$M_{0.057} \frac{HCO_3 65 SO_4 24 Cl 10 T}{Ca 68 Mg 20 Na 11} T_{13.0}$
5	Залив, микрорайон “Солнечный”, стоянки лодок и яхт	$M_{0.072} \frac{HCO_3 75 SO_4 17 Cl 6 T}{Ca 66 Mg 20 Na 12} T_{18.0}$
5a	р. Тальца	$M_{0.113} \frac{HCO_3 56 SO_4 39 Cl 5 T}{Ca 62 Mg 31 Na 6} T_{11.0}$
6a	р. Бурдугуз	$M_{0.077} \frac{HCO_3 58 SO_4 35 Cl 6 T}{Ca 63 Mg 27 Na 9} T_{12.0}$
7	зал. Якоби, пляж	$M_{0.067} \frac{HCO_3 76 SO_4 15 Cl 7 T}{Ca 68 Mg 19 Na 10} T_{14.5}$
8	зал. Новогрудинино	$M_{0.063} \frac{HCO_3 75 SO_4 17 Cl 7 T}{Ca 58 Na 22 Mg 18} T_{11.0}$
9	зал. Падь-Мельничная	$M_{0.064} \frac{HCO_3 75 SO_4 16 Cl 8 T}{Ca 64 Mg 23 Na 11} T_{15.0}$
10	зал. Курминский	$M_{0.060} \frac{HCO_3 73 SO_4 16 Cl 9 T}{Ca 68 Mg 19 Na 10} T_{18.5}$
11a	р. Большая Хея	$M_{0.089} \frac{HCO_3 72 SO_4 21 Cl 5 T}{Ca 53 Mg 35 Na 10} T_{14.0}$
	Исток Ангары [19]	$M_{0.097} \frac{HCO_3 107 SO_4 12 Cl 2 T}{Ca 63 Mg 23 Na 12} T_{11.0}$

некоммерческие товарищества (ДНТ), где тип вод меняется на хлоридно-гидрокарбонатный магниевый-кальциевый вследствие увеличения хлоридов. Воды рек, впадающих в Иркутское водохранилище, относятся к сульфатно-гидрокарбонатному магниевый-кальциевому типу.

Результаты исследования микроэлементного состава вод заливов Иркутского водохранилища и его притоков представлены в табл. 3. Установлено, что такие элементы, как, барий, кобальт, ванадий, медь, цинк, присутствуют повсемест-

но. Железо и алюминий выявлены в основном в заливах, а кремний содержится в пределах базовых величин, тогда как в воде правых притоков обнаружены превышения в 2–4, левых – в 2 раза. Превышений содержания молибдена в воде водохранилища не выявлено. Минимальные значения зафиксированы в Курминском заливе, максимальные – в зал. Королок (0.009 и 0.1479 мг/дм³ соответственно). Увеличенные содержания обнаружены в заливах с антропогенным влиянием (Солнечный – стоянка катеров и яхт, Якоби – рекреационная деятельность). В водах

Таблица 3. Содержание микроэлементов в Иркутском водохранилище и его притоках, 2022 г.

№ точки	Местоположение	Mo	Ba	Al	Pb	Cu	Fe	Si	P	Zn	Sr	Co	Cr	V	Ag	Cd
1	Ново-Лисиха, котельный пос. "Хрустальный парк"	0.0351	0.537	0.0020	0.0206	0.0015	0	1.5906	0	0	0.6663	0.0016	0	0.0075	0.0008	0
1a	зал. Ново-Лисиха, котельный пос. "Хрустальный парк", ручей впадает в залив	0.0874	0.0768	0.0028	0	0.0027	0	8.6018	0.1364	0.0032	0.7769	0.0032	0.0007	0.0063	0.0009	0.0009
2	зал. Еловый	0.0390	0.0572	0.0044	0	0	0.0001	0.3524	0	0	0.5432	0.0030	0	0.0076	0.0002	0.0009
2a	р. Еловая	0.1202	0.0316	0	0.0042	0.0138	0	7.0590	0.0619	0.0022	0.4896	0	0	0.0088	0.0002	0
3	зал. Королок	0.1479	0.0522	0.0083	0.0061	0.0035	0	0.2085	0.0975	0.0017	0.5887	0.0007	0.0009	0.0076	0.0007	0.0009
3a	р. Королок	0.0679	0.0430	0.0476	0	0	0.2850	6.8731	0	0.0008	0.3220	0.0018	0	0.0083	0	0.0003
4	зал. Большая речка	0.0679	0.0308	0.0893	0.0109	0.0021	0	0.5561	0	0.0001	0.7460	0.0030	0	0.0100	0.0005	0
4a	р. Большая	0.0805	0.0297	0	0.0260	0.0010	0.0013	5.9923	0	0.0019	0.3607	0.0004	0	0.0101	0.0003	0.0002
5	Залив, микрорайон "Солнечный", стоянки лодок и яхт	0.1461	0.0514	0	0.0306	0.0117	0	0.2056	0	0.0012	0.5223	0.0014	0	0.0031	0	0.0005
5a	р. Талыа	0.1718	0.0565	0.0316	0	0	0.0754	5.1467	0	0.0006	0.7090	0.0001	0.0002	0.0079	0.0001	0.0012
6a	р. Бурдугуз	0.1216	0.0364	0	0	0.0134	0.0299	5.3420	0	0	0.8063	0.0022	0.0003	0.0088	0	0.0002
7	зал. Якоб, пляж	0.1086	0.0426	0	0.0036	0.0013	0	0	0.0494	0.0005	0.5047	0.0023	0.0015	0.0077	0.0006	0.0007
8	зал. Новогрудинно	0.0368	0.0450	0.0031	0.0043	0.0014	0	0.2524	0	0.0010	0.4794	0.0015	0.0004	0.0064	0.0007	0.0008
9	зал. Паль-Мельничная	0.0373	0.0453	0	0.0080	0.0016	0	0.1192	0	0	0.4897	0.0017	0	0.0073	0.0005	0.0002
10	зал. Курминский	0.0090	0.0426	0	0	0.0018	0	0.3145	0	0.0029	0.5172	0.0017	0	0.0102	0.0006	0
11a	р. Большая Хей	0	0.0450	0.0027	0	0.0004	0.0154	4.7599	0.1181	0.0010	0.4296	0	0.0001	0.0101	0	0.0009
Базовые уровни химических элементов в воде оз. Байкал [9]		0.8–1.5	9–11	0.1–1.0	0.03–0.06	0.2–1.0	0.1–1.6	0.5–2.0	11–24	0.4–4.3	96–107	0.02–0.05	0.03–0.09	0.3–0.6	0.001–0.004	0.001–0.010

рек правого берега содержание молибдена выше, чем в водах самого водохранилища. Так, в реках Еловой, Бурдугуз и Тальце его содержания были 0.1202, 0.1216 и 0.1718 мг/дм³ соответственно. В воде Большой Хеи этот элемент не выявлен. Свинец поступает в природные воды в процессе растворения и выщелачивания минералов, а также в результате сжигания углей, применения тетраэтилсвинца в моторном топливе и со сточными водами промышленно-селитебных зон. Это подтвердилось данными настоящего исследования в зал. Солнечном, где расположена стоянка катеров и яхт, концентрации находятся на нижней границе базовых величин. В воде притоков как левых, так и правых свинец не был обнаружен. Следует обратить внимание на р. Еловую, где был обнаружен свинец в незначительных количествах (неясной природы).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов исследования современного состояния вод Иркутского водохранилища от истока р. Ангары до Иркутска показал, что регулирующее влияние Байкала на гидрохимические показатели Ангары сказывается на всем протяжении Иркутского водохранилища. Изменения гидрохимических показателей выявлены в заливах, где сказываются влияние впадающих в них рек и антропогенные факторы, такие как расположенные по берегам заливов многочисленные коттеджные поселки, СНТ, ДНТ и туристско-рекреационные объекты.

Выявлено, что заливы с правой стороны водохранилища — в основном мелководные с хорошим прогревом воды и средним содержанием кислорода 11.06 мг/дм³. Заливы левого берега более глубокие, и температура воды здесь значительно ниже, чем у заливов правого берега, содержание кислорода в воде меняется от 11.62 до 18.0 мг/дм³ при среднем значении 14.22.

В водах заливов установлена более высокая минерализация, чем в водах рек, впадающих в водохранилище. Концентрации хлоридов и сульфатов в реках выше, чем в заливах водохранилища, содержание ионов кальция колеблется от 21.66 до 33.77 мг/дм³ (реки Еловая и Тальца соответственно).

Отмечено, что сульфатно-гидрокарбонатный магниевый-кальциевый тип вод определяется почти во всех заливах Иркутского водохранилища. В заливах с антропогенным влиянием тип вод меняется на хлоридно-гидрокарбонатный магниевый-кальциевый вследствие увеличения хлоридов. Воды рек, впадающих в Иркутское водохранилище, относятся к сульфатно-гидрокарбонатному магниевый-кальциевому типу.

Анализ микроэлементного состава вод заливов Иркутского водохранилища и его притоков показал, что такие элементы, как барий, кобальт, ванадий, медь, цинк, присутствуют в водах как заливов, так и рек. Железо и алюминий выявлены в основном в заливах, но их содержание находится в базовых границах содержания микроэлементов в оз. Байкал.

Таким образом, установлено, что большая часть исследованных заливов и рек, впадающих в Иркутское водохранилище, в настоящее время не подвержены существенному влиянию антропогенных факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алекин О.А., Семенов А.Д., Скопинцева Б.А.* Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 269 с.
2. *Александров И.Г.* Проблемы Ангары. М.; Л., 1931. С. 16.
3. Ангара, река, рожденная Байкалом [Электронный ресурс]. <http://asonov.com/goroda-i-strany/angara-reka-rozhdannaya-bajkalom.html> (дата обращения: 06.02.2023)
4. *Белозерцева И.А., Воробьева И.Б., Власова Н.В., Лопатина Д.Н.* Трансформация почв побережья Иркутского водохранилища и оз. Байкал (в границах Иркутской области) в результате влияния колебаний уровня водоемов // Природа внутренней Азии 2023. № 1 (23). С. 18–48.
5. *Бочкарев П.Ф.* Гидрохимия рек Восточной Сибири. Иркутск: Иркутское кн. изд-во, 1959. 155 с.
6. *Вампилова О.А.* Проблемы реки Ангары // Огни Ангары. 1975. 14 июня. С. 3.
7. *Верещагин Г.Ю.* Байкал. Иркутск: ОГИЗ, 1947. 168 с.
8. *Верещагин Г.Ю.* Термические периоды и образование донного льда на Ангаре // Изв. АН СССР. ОМОН. 1932. № 10. С. 1473–1484.

9. *Ветров В.А., Кузнецова И.А., Склярова О.А.* Базовые уровни химических элементов в воде озера Байкал // География и природ. ресурсы. 2013. № 3. С. 41–45.
10. *Вотинцев К.К.* Гидрохимия озера Байкал. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 310 с.
11. *Вотинцев К.К., Глазунов И.В.* Гидрохимический режим озера Байкал в районе пос. Лиственничное // Гидрохимическое исследование озера Байкал. Тр. Лимнол. ин-та. М.: Изд-во АН СССР, 1963. Т. 3 (23). С. 3–56.
12. *Гаченко А.С., Минаев В.В., Михайлов А.А., Хмельнов А.Е., Фереферов Е.С., Фёдоров Р.К., Воробьева И.Б., Власова Н.В.* Информационно-аналитическая система мониторинга и оценки антропогенного воздействия на экологию прибрежной зоны озера Байкал // География и природ. ресурсы. 2016. № S6. С. 174–179.
13. *Глазунов И.В.* Гидрохимический режим и химический сток реки Ангары // Гидрохимические исследования озера Байкал / Под ред. К.К. Вотинцева. Тр. Лимнол. ин-та. М.: Изд-во АН СССР, 1963. Т. III (XXIII). С. 57–94.
14. ГОСТ 17.1.5.04-81 Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Гидросфера. Приборы и устройства для отбора, первичной обработки и хранения проб природных вод. 01.01. 1984.
15. ГОСТ 2874-82. Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством. М.: 1995. [Электронный ресурс]. // <http://gostvoda.ru/d/677526/d/4-gost-2874-82.pdf> (дата обращения: 14.02.2023)
16. ГОСТ Р 59024-2020. Вода. Общие требования к отбору проб. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2022. 17 с. [Электронный ресурс]. <https://files.stroyinf.ru/Index/74/74335.htm> (дата обращения: 07.06.2023)
17. Государственный архив Иркутской области. Фонд Р-1933. Оп. 7 (ОЦ). Д. 1236. Л. 16.
18. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды в Иркутской области в 2021 году. Ижевск: Принт, 2022. 252 с.
19. *Гребенщикова В.И., Загоруйко Н.А.* Мониторинговые исследования микроэлементного состава воды истока Ангары // Вода: химия и экология. 2012. № 12. С. 3–8.
20. *Гребенщикова В.И., Загоруйко Н.А., Пастухов М.В.* Мониторинговые исследования ионного состава воды истока р. Ангары (озеро Байкал) // Вода: химия и экология. 2011. № 4. С. 2–8.
21. *Карнаухова Г.А.* Гидрохимия Ангары и водохранилищ Ангарского каскада // Вод. ресурсы. 2008. Т. 35. № 1. С. 72–80.
22. *Коваль П.В., Удодов Ю.Н., Андрулайтис Л.Д., Гапон А.Е., Склярова О.А., Чернигова С.Е.* Геохимические характеристики поверхностного стока озера Байкал // Докл. РАН. 2005. Т. 401. № 5. С. 663–667.
23. *Крайнов С.Р., Швеиц В.М.* Гидрогеохимия. М.: Недра, 1992. 463 с.
24. *Кудзи Е.М.* Перспективы развития Иркутской области // Иркутский гидроузел. Иркутск, 1957. С. 69.
25. *Малышев В.М.* Гипотеза решения Ангарской проблемы. М.; Иркутск, 1935. 121 с.
26. *Напрасникова Е.В., Воробьева И.Б., Власова Н.В., Захарова Ю.Р.* Санитарно-экологическая оценка воды колодцев на побережье Байкала (п. Листвянка) // Сиб. мед. журн. (Иркутск) 2007. Т. 75. № 8. С. 63–65.
27. *Никитин В.М., Абасов Н.В., Болгов М.В., Осипчук Е.Н.* Устойчивость водохозяйственной системы бассейна реки Ангары в различных условиях водности // География и природ. ресурсы 2021. № 2. С. 103–113.
28. *Николаева М.Д.* К гидрохимии Иркутского водохранилища // Биология Иркутского водохранилища / Под ред. Г.И. Галазия. Тр. Лимнол. ин-та. М.: Наука, 1964. Т. II (31). С. 17–40.
29. *Овчинников Г.И., Павлов С.Х., Трещинский Ю.Б.* Изменение геологической среды в зонах влияния Ангаро-Енисейских водохранилищ. Новосибирск: Наука, 1999. 254 с.
30. Переселенцы помнят, как по картофельным полям плавали щуки. [Электронный ресурс]. <http://baik-info.ru/sm/2008/33/004006.html>
31. Подводные миры. Восточно-Сибирская правда. 18.08.2020. [Электронный ресурс]. <https://irkutsk.bezformata.com/listnews/podvodnie-miri/86482014/> (дата обращения: 14.02.2023)
32. *Подгорная Т.И.* Оценка состояния и прогноз изменения окружающей среды под влиянием техногенных воздействий. Хабаровск: Ин-т архитектуры и стр-ва, ХГТУ, 1997. 37 с.
33. Река и люди. Из истории изучения и освоения Ангары, 25 июня 2015. [Электронный ресурс]. <https://baikalru.ru/baikal/angara-doch-baikala/reka-i-lyudi-iz-istorii-izuchenija-i-osv.html> (дата обращения: 20.02.2023)
34. *Рыбченко А.А., Кадетова А.В., Хак В.* Переработка участка берега Иркутского водохранилища, сложенного лессовидными породами // Геоморфология. 2014. № 2. С. 61–67.

35. Синюкович В.Н. Реконструкция естественного уровненного режима оз. Байкал после строительства Иркутской ГЭС // Метеорология и гидрология. 2005. № 7. С. 70–76.
36. Тарасова Е.Н., Мамонтов А.А., Мамонтова Е.А. Факторы, определяющие современный гидрохимический режим Иркутского водохранилища // Вода: химия и экология. 2015. № 7. С 10–17.
37. Шнейзер Г.М. Водноэкологический мониторинг и качество вод реки Ангары (под влиянием техногенеза) // Успехи современного естествознания. 2004. № 2. С. 138–140.

УДК 574.633

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ИНДИКАЦИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕКИ УРАЛ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗООБЕНТОСА ЛЕТОМ 2022 г.

© 2024 г. А. В. Гончаров^{a, *}, Д. М. Палатов^{a, c}, Н. Л. Фролова^a, В. О. Полянин^b,
В. А. Исаев^d, Э. Х. Кудяков^a

^a Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119992 Россия

^b Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

^c Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, 119071 Россия

^d ООО “Яндекс.Технологии”, Москва, 119034 Россия

*e-mail: tata15333@mail.ru

Поступила в редакцию 23.03.2023 г.

После доработки 15.06.2023 г.

Принята к публикации 03.09.2023 г.

Представлены результаты обследования зообентоса р. Урал на участке от г. Верхнеуральска до г. Оренбурга (~1000 км) с отбором проб выше и ниже источников антропогенного воздействия: крупных городов, металлургических комбинатов, очистных сооружений, водохранилищ. Для оценки степени загрязнения использовали индексы Шеннона, ЕРТ, а также показатель, частично учитывающий два предыдущих — индекс Вудивисса. Показано, что ниже источников антропогенного воздействия рассматриваемые показатели снижаются, отражая уменьшение видового разнообразия донных биоценозов и уменьшение числа видов-индикаторов, чувствительных к загрязнению. Особенно сильное воздействие испытывают малые водотоки; плесы подвержены большей трансформации, чем перекаты. Предложен комплексный показатель качества воды по биологическим показателям. С его помощью проведено ранжирование всех обследованных участков по степени загрязненности. Показано, что 10 из 23 обследованных участков рек относятся к 1-му классу качества воды (условно чистые), 7 участков — ко 2-му классу (слабо загрязненные), 3 участка — к 4-му классу (грязные) и 3 участка — к 5-му классу (экстремально грязные). Это говорит о том, что, несмотря на многочисленные источники загрязнения, р. Урал обладает высокой самоочищающей способностью и большинство обследованных участков — достаточно чистые, благоприятные для обитания донных беспозвоночных.

Ключевые слова: экология рек, качество воды, донные биоценозы, видовое разнообразие, виды-индикаторы, биотические индексы, Магнитогорск, металлургический комбинат, очистные сооружения.

DOI: 10.31857/S0321059624020056 EDN: CINFEA

ВВЕДЕНИЕ

На р. Урал расположены крупные города — Магнитогорск, Орск, Оренбург, имеются крупнейшие предприятия металлургической промышленности. Поэтому можно ожидать, что сравнительно маловодная река в условиях сильного техногенного воздействия может сильно загрязняться [6, 30].

Действительно, по данным Росгидромета за 2021 г., вода более половины створов гидрохимического мониторинга на р. Урал отнесена к категориям “загрязненная” или “очень загрязненная”, а в отдельных пунктах — “грязная” и “очень грязная” [11].

В Росгидромете анализируется несколько десятков гидрохимических показателей. На самом деле в водных объектах содержится значительно большее число — сотни и тысячи — разнообразных веществ-загрязнителей [36]. Поэтому результаты проводимого гидрохимического мониторинга могут оказаться недостаточными для оценки загрязненности р. Урал. Кроме того, отбор проб для химического анализа проводится, как правило, ежедекадно или ежемесячно [11]; при столь редких наблюде-

¹ Работа выполнена в рамках государственного контракта (№ 0173100011322000002 от 30.03.2022, тема “Экологическая оценка последствий регулирования стока в трансграничном бассейне трансграничной реки Урал (Жайык) и разработка научно-обоснованных предложений по экологической реабилитации, сохранению и восстановлению трансграничной реки Урал (Жайык)”, шифр 22-14-НИР/01); госзадания НИР кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (ЦИТИС: 121051400038-1) и при финансировании междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ им. М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”.

ниях легко пропустить случаи экстремального загрязнения.

В такой ситуации оказываются полезными биологические методы исследования, поскольку очевидно, что речные обитатели реагируют на многие вещества, которые находятся в воде, на все их комбинации и сочетания [35, 36]. Кроме того, если говорить о донных обитателях, то они в течение долгого времени находятся на данном участке реки и несут на себе отпечаток длительного воздействия — в отличие от эпизодических обследований в существующей системе мониторинга [32, 33].

В настоящее время для р. Урал имеются результаты исследований зообентоса, проводившихся в разные годы лишь на отдельных участках реки и ее притоков [8] — в районе Орска, Оренбурга, Илека [9, 13, 17]. Так, по результатам исследования р. Урал в районе Орска в 2007–2017 гг. в составе фауны донных беспозвоночных выявлено 70 видов и форм. Наиболее разнообразно представлены поденки и хирономиды, насчитывающие соответственно 13 и 12 видов и форм; сравнительно богаты видами ручейники и веснянки [13].

Ввиду слабой изученности зообентоса р. Урал, летом 2022 г. авторами статьи проведена экспедиция с целью определения загрязненности р. Урал на большом протяжении — от г. Верхнеуральска до г. Оренбурга (>1000 км) — по состоянию донных биоценозов. Такое исследование проводится впервые.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сбор натуральных материалов проведен 16–24 августа 2022 г. на участке р. Урал от Верхнеуральска до Оренбурга (рис. 1; табл. 1) при одинаковых погодных условиях — без дождей и резких колебаний температуры воздуха. Уровень и расход воды соответствовали периоду летней межени, были несколько ниже своих средних многолетних значений. Температура воды в р. Урал менялась преимущественно в пределах 19–25°C (в зависимости от времени суток); ниже Ириклинского водохранилища она составляла 15°C (из-за сброса холодных вод с глуби-

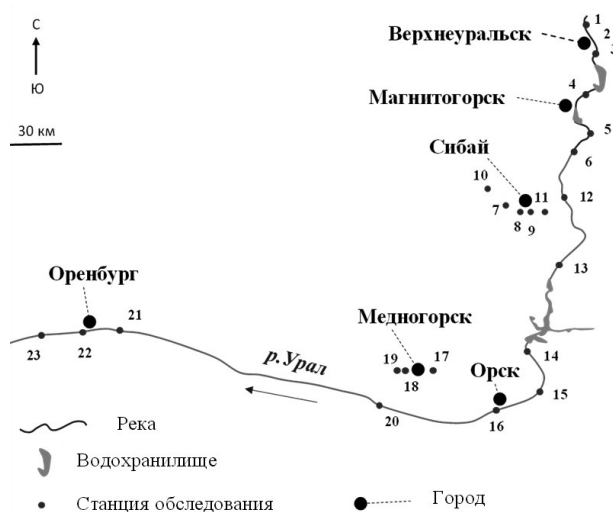


Рис. 1. Картограмма расположения пунктов гидробиологического обследования р. Урал в августе 2022 г.

ны ~30 м); в малых притоках температура воды могла снижаться до 13–14°C. Преобладали скорости течения 0.2–0.4 м/с. Наибольшее распространение в р. Урал имеют гравийно-галечные, галечно-песчаные отложения. Именно на таких грунтах отбирались пробы зообентоса, чтобы обеспечить сходство условий обитания донных беспозвоночных на сравниваемых участках рек (табл. 1). В местах значительного антропогенного воздействия (ниже очистных сооружений) донные отложения покрываются наилком.

Пробы зообентоса отбирали, как правило, в нескольких километрах выше и ниже основных источников воздействия, кроме того — в непосредственной близости (в 50–100 м) от сброса с городских очистных сооружений в р. Урал в Верхнеуральске, Оренбурге; в Орске — в 1 км ниже сооружений (в связи с особенностями их расположения). Кроме того, обследовали несколько малых водотоков (реки Карагайлы, Худолаз, Блява) — выше и ниже источников загрязнения.

Работа на реке проводилась в соответствии с общепринятой методикой [16, 23] — с помощью гидробиологического сачка с основанием шириной 20 см. Учитывалась обловленная на каждой станции площадь дна реки, которая составляла 2–3 м². Разборку проб и определение организмов проводили в лаборатории с использованием микроскопа и определителей [20, 22, 26].

Таблица 1. Расположение пунктов гидробиологического обследования р. Урал в августе 2022 г. и их краткая характеристика ($V_{\text{теч}}$ — скорость течения)

№ станции	Точка	Географические координаты	Ширина, м	Глубина, м	$V_{\text{теч}}$, м/с	Отложения	$T_{\text{воды}}$, °C
1	р. Урал выше г. Верхнеуральска	53.88978 с.ш., 59.18214 в.д.	20–25	0.5	0.1	Гравий, галька и песок	19.8
2	Нижне сброса с ОС г. Верхнеуральска	53.85793 с.ш., 59.19356 в.д.	15–20 м	0.8	0.2	Гравий, галька и ил	17.7
3	Выше Верхнеуральского вдхр	53.79884 с.ш., 59.11980 в.д.	20 м	0.55	0.3	Гравий, галька и песок	18.2
4	Нижне Верхнеуральского вдхр	53.53618 с.ш., 59.07705 в.д.	30 м	1–1.3	0.27	Гравий, галька и ил	20.8
5	1.5 км ниже Магнитогорского вдхр	53.31045 с.ш., 59.08970 в.д.	20 м	0.3	0.4	Гравий, галька и щебень	21.6
6	В пос. Янтельском	53.12830 с.ш., 58.99304 в.д.	20 м	0.45	0.45	Гравий, галька и песок	20.9
7	р. Карагайлы выше Старого Сибая	52.70847 с.ш., 58.51396 в.д.	1 м	0.1	0.15	Гравий, галька, щебень, валуны, ил	20.8
8	Нижне карьера г. Сибая	52.70569 с.ш., 58.67975 в.д.	2–3 м	0.25	0.04	Ил, песок и щебень (у уреза)	15.3
9	Сброс с ОС г. Сибая	52.71187 с.ш., 58.71262 в.д.	1.5 м	0.15–0.2	0.2	Ил и песок	17.5
10	р. Худюлаз ниже водопада Гадельша	52.75849 с.ш., 58.37877 в.д.	1–2 м	0.1–0.3	0.1	Валуны, глыбы, щебень и ил	13
11	Нижне карьера	52.70615 с.ш., 58.77409 в.д.	4.5 м	0.3	0.33	Ил, гравий, щебень, валуны	18.3
12	р. Урал ниже пос. Пролетарка	52.76303 с.ш., 58.91222 в.д.	30–35 м	0.5	0.13	Гравий, галька, щебень и ил	20.2
13	Выше Ириклинского вдхр	52.27630 с.ш., 58.90453 в.д.	30 м	0.3	0.6	Гравий, галька и песок	21.6
14	Нижне Ириклинского вдхр	51.63264 с.ш., 58.60962 в.д.	70–90 м	1–1.5	0.3	Песок, щебень и галька	15
15	Выше г. Орска	51.34453 с.ш., 58.74857 в.д.	40–50 м	1.5–2	0.35	Песок, галька и щебень	19.5
16	На сбросе с очистных г. Орска	51.19560 с.ш., 58.46916 в.д.	40–50 м	1.5–2	0.35	Песок, галька, гравий	22.2
17	р. Блява выше г. Медногогорска	51.40651 с.ш., 57.74030 в.д.	2–2.5 м	0.15	0.3	Гравий, галька, щебень и песок	14.1
18	Нижне г. Медногогорска, перекат	51.48715 с.ш., 57.54993 в.д.	4–5 м	0.2	0.4	Гравий, галька, щебень, песок	15.4
19	Нижне г. Медногогорска, плес	51.48715 с.ш., 57.54993 в.д.	7–5 м	0.3	0.05	Камни крупные под слоем ила	-
20	р. Урал ниже г. Орска	51.23930 с.ш., 57.34245 в.д.	70–80 м	1.5–2	0.1	Гравий, галька, щебень и песок	22.3
21	Выше г. Оренбурга	51.71853 с.ш., 55.28884 в.д.	50–60 м	0.8	0.33	Гравий, галька щебень, песок	23.3
22	Нижне ОС г. Оренбурга	51.77134 с.ш., 55.02655 в.д.	100–120 м	1	0.24	Заиленное дно, светлого-коричневый	25.6
23	Нижне г. Оренбурга	51.72985 с.ш., 54.64913 в.д.	100–110 м	1–1.5	0.25	Гравий, галька, щебень и песок	25.4

Для оценки загрязненности рек использовали индексы Вудивисса [7, 41], Шеннона (видового разнообразия по численности) [19], ЕРТ (суммарное число видов реофильных беспозвоночных) [24]. При этом считается, что чем больше видовое разнообразие, тем лучше условия существования донных организмов, тем чище вода [2].

Индекс Вудивисса — широко известный показатель, учитывающий присутствие индикаторных (с точки зрения загрязнения) таксонов и одновременно — видовое богатство. В настоящей работе использовали расширенный вариант индекса Вудивисса [1, 42].

Индекс Шеннона, по существу, учитывает два параметра: видовое богатство (т. е. число видов) и выравненность сообщества, оцениваемую индексом Пielу. Последний принимает наибольшее значение, если все особи сообщества относятся к разным видам, наименьшее — когда все особи принадлежат одному виду [18].

Индекс ЕРТ представляет собой суммарное число видов реофильных беспозвоночных — Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera; многие из таких видов приспособлены к жизни на каменистом грунте в условиях значительной скорости течения, обеспечивающей перемешивание и насыщение воды кислородом.

Для однозначной оценки состояния водных объектов индексы Шеннона, Вудивисса и ЕРТ были преобразованы в один комплексный показатель [3, 5]. С этой же целью применен метод главных компонент [38]; в расчетах использована библиотека с открытым исходным кодом Scikit-learn [39].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Состав биоценозов и основные рассматриваемые показатели зообентоса

Число найденных в августе 2022 г. видов донных беспозвоночных — 189 (на всех 23 обследованных участках без проб, собранных с растительности). В табл. 2 представлено распределение числа видов по основным систематическим группам организмов. Из таблицы вид-

но, что почти на каждой станции встречаются хирономиды, поденки и брюхоногие моллюски (включающие в среднем по 8, 5, 3 вида на пробу соответственно). Обычны также ручейники, жуки, двустворчатые моллюски, пиявки (в среднем от 2 до 5 видов на пробу). Реже встречаются мошки, стрекозы, клопы, олигохеты, мокрецы, слепни.

Фауна донных беспозвоночных на обследованном участке р. Урал в целом характерна для крупных и средних рек Каспийского бассейна; наиболее близкий фаунистический аналог — среднее течение р. Оки [21]. На плотных грунтах обнаруживается характерный литореофильный комплекс с доминированием фильтрующих личинок ручейников *Hydropsyche contubernalis* McLachlan, 1865, *Brachycentrus subnubilus* Curtis, 1834, поденок-альгофагов *Baetis buceratus* Eaton, 1870, *B. fuscatus* (Linnaeus, 1761) и *Potamanthus luteus* (Linnaeus, 1767), мошек *Wilhelmia equina* (Linnaeus, 1758) и хищных клопов *Aphelocheirus aestivalis* (Fabricius, 1794). На мягких грунтах преобладают двустворчатые моллюски *Euglesa supina* (Schmidt, 1850) и *Rivicoliana rivicola* (Lamarck, 1818), роющие поденки *Ephemera lineata* Eaton, 1870, хирономиды *Cladotanytarsus* gr. *mancus* (Walker, 1856) и *Polypedilum scalaenum* (Schränk, 1803). В зоне зарослей наиболее обычны гастроподы *Radix auricularia* (Linnaeus, 1758) и *Bithynia tentaculata* (Linnaeus, 1758), поденки *Labiobaetis atrebatinus* (Eaton, 1870), стрекозы *Calopteryx splendens* (Harris, 1782) и др. На участках реки ниже Орска значительную роль в донных сообществах играют в целом эвритопные вселенцы каспийского происхождения — амфиподы *Dikerogammarus haemobaphes* (Eichwald, 1841) и *Chelicorophium curvispinum* (G.O. Sars, 1895), мизиды *Paramysis intermedia* (Czerniavsky, 1882), двустворчатые моллюски *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771). В составе фауны отмечены редкие и исчезающие виды водных беспозвоночных, характерные для крупных водотоков [26, 29], такие как веснянки *Isogenus nubecula* (Newman, 1833) или *Xanthoperla apicalis* (Newman, 1836).

В табл. 3 приведены подсчитанные на основе исходных данных значения показателей, используемых для оценки состояния р. Урал и нескольких малых рек. Видно, что параметры

Таблица 2. Распределение числа видов зообентоса по основным таксономическим группам, р. Урал, август 2022 г.

Таксон (по-русски)	Таксон	р. Урал выше Верхнеуральска	р. Урал, ниже ОС Верхнеуральск	р. Урал выше Верхнеуральского вдхр	р. Урал ниже Верхнеуральского вдхр	р. Урал ниже Магнитогорского вдхр	р. Урал пос. Янгельский	р. Карагайлы выше Старого Сибая	р. Карагайлы, ниже карьера	р. Карагайлы, сброс с ОС Сибая	р. Худолаз ниже водопада	р. Худолаз ниже карьера	р. Урал ниже п. Пролетарка	р. Урал выше Ириклинского вдхр	р. Урал ниже Ириклинского вдхр	р. Урал выше Орска	р. Урал ниже ОС Орска	р. Блява выше Медногогорска	р. Блява ниже Медногогорска, перекат	р. Блява ниже Медногогорска, плес	р. Урал ниже Орска	р. Урал выше Оренбурга	р. Урал ниже ОС Оренбурга	р. Урал ниже Оренбурга
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Губки	PORIFERA																							
Бадяги	Spongillidae											1	1	1			1	1			1			
Кольчатые черви	ANNELIDA																							
Олигохеты	Oligochaeta		3		2	1	1			1				1		2	3				2	1		1
Плоские пиявки	Glossiphoniidae		1		1	1	1				2		3		1	1	1	1			1	1		
Глоточные пиявки	Erpobdellidae				1	1					1			1	1	1		1			1			
Моллюски	MOLLUSCA																							
Двустворчатые моллюски	Bivalvia	4	1	2	5	1	2				2		6	2	1	3	2	1			2	2		3
Брюхоногие моллюски	Gastropoda	7	2	4	3	2	3	2		2	3	1	6	1		3	5	2			4	3	1	2
Членистоногие: Ракообразные	ARTHROPODA: CRUSTACEA																							
Мизиды	Mysidae																				1			
Бокоплавы	Amphipoda					1									2	2		1						1
Десятиногие ракообразные	Decapoda	1																						
Членистоногие: Насекомые	ARTHROPODA: INSECTA																							
Поденки	Ephemeroptera	5	2	10	11	5	9	4		1	4	1	5	6		10	6	4	2		3	10		9
Стрекозы	Odonata	1	1	2	1		3			1		3	4	1		3		2			4	2		
Веснянки	Plecoptera			2				5			4	1					5					1		
Клопы	Heteroptera	1		1	1		1						1	1	1		1	1				1		1
Жуки	Coleoptera	3	2	2	4		1	2		1	4	1	3	3	1	2		5	2		1	2		
Вислокрылки	Megaloptera							1					1					1			1			
Сетчатокрылые	Neuroptera																	1						
Ручейники	Trichoptera	2	2	5	4	5	7	7			6	6	6	5	1	6	2	8			8	3		3
Бабочки	Lepidoptera																				1			
Комары-лимонииды	Limoniidae			2	1																	1		
Комары-болотницы	Pediciidae			1	1			1				1					1							

Таблица 2. Продолжение

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Комары-долгоножки	Tipulidae											1						1						
Комары-звонцы	Chironomidae	11	15	14	9	8	9	6	1	9	8	10	8	4		10	5	10	6	3	8	6	2	11
Мокрецы	Cerato-pogonidae	1		1	1		1			1			1	1					1					1
Мошки	Simuliidae	1				2	2	1		1	1	1	1			1	3	1	2	1				2
Толкунчики	Empididae											1												
Слепни	Tabanidae			1	1	1		1				1				1		1						
Мухи настоящие	Muscidae											1						1						
Мухи-атерициды	Athericidae	1		1			1	1																

Таблица 3. Основные показатели, используемые для оценки состояния р. Урал и нескольких малых рек; август 2022 г. (N , экз/м² – численность организмов)

Место	Станция	N , экз/м ²	Число видов	Индекс Шеннона	Индекс Пиелу	Индекс Вудивисса	ЕРТ
р. Урал выше г. Верхнеуральска	1	50	38	4.50	0.86	13	7
Ниже сброса с ОС г. Верхнеуральска	2	168	29	4.18	0.86	11	4
Выше Верхнеуральского вдхр	3	168	48	4.59	0.82	15	17
Ниже Верхнеуральского вдхр	4	127	46	4.10	0.74	14	15
1.5 км ниже Магнитогорского вдхр	5	126	28	3.65	0.76	11	10
В пос. Янгельском	6	108	41	4.51	0.84	14	16
р. Карагайлы выше Старого Сибая	7	269	31	3.78	0.76	13	16
Ниже карьера г. Сибай	8	5	1	0.00	0.00	1	0
Сброс с ОС г. Сибай	9	185	17	2.69	0.66	8	1
р. Худолаз ниже водопада Гадельша	10	59	35	4.27	0.83	13	14
Ниже карьера	11	1127	30	3.64	0.74	12	8
р. Урал ниже пос. Пролетарка	12	615	46	4.28	0.77	14	11
Выше Ириклинского вдхр (правый рукав)	13	528	27	3.42	0.72	11	11
Ниже Ириклинского вдхр	14	1672	8	0.58	0.19	8	1
Выше г. Орска	15	264	45	4.56	0.83	14	16
На сбросе с очистных г. Орска	16	181	29	3.94	0.81	11	8
р. Блява выше г. Медногорска	17	214	49	4.00	0.71	15	17
Ниже г. Медногорска, перекат	18	1703	13	0.22	0.06	8	2
Ниже г. Медногорска, плес	19	26	4	1.37	0.69	2	0
р. Урал ниже г. Орска	20	48	38	4.54	0.87	14	11
Выше г. Оренбурга	21	330	33	3.98	0.79	12	14
Ниже ОС г. Оренбурга	22	50	3	0.42	0.27	2	0
Ниже г. Оренбурга	23	152	34	4.08	0.80	12	12
Наибольшие значения				4.59		15	17

Таблица 4. Основные показатели, выраженные в долях (%) от максимальных значений; р. Урал, август 2022 г.

Место	Станция	Индекс Шеннона	Индекс Вудивисса	ЕРТ	Среднее (КПК)
р. Урал выше г. Верхнеуральска	1	98	87	41	75
Ниже сброса с ОС г. Верхнеуральска	2	91	73	24	63
Выше Верхнеуральского вдхр	3	100	100	100	100
Ниже Верхнеуральского вдхр	4	89	93	88	90
1.5 км ниже Магнитогорского вдхр	5	80	73	59	71
В пос. Янгельском	6	98	93	94	95
р. Карагайлы выше Старого Сибая	7	93	87	82	87
Ниже карьера г. Сибая	8	0	7	0	2
Сброс с ОС г. Сибая	9	59	53	6	39
р. Худолаз ниже водопада Гадельша	10	82	87	94	88
ниже карьера	11	79	80	47	69
р. Урал ниже пос. Пролетарка	12	93	93	65	84
выше Ириклинского вдхр (правый рукав)	13	74	73	65	71
ниже Ириклинского вдхр	14	13	53	6	24
Выше г. Орска	15	99	93	94	95
На сбросе с очистных г. Орска	16	86	73	47	69
р. Блява выше г. Медногорска	17	87	100	100	96
Ниже г. Медногорска, перекат	18	5	53	12	23
Ниже г. Медногорска, плес	19	30	13	0	14
р. Урал ниже г. Орска	20	99	93	65	86
Выше г. Оренбурга	21	87	80	82	83
Ниже ОС г. Оренбурга	22	9	13	0	7
Ниже г. Оренбурга	23	89	80	71	80

довольно различны на разных станциях; например, число видов — от 1 до 49, суммарное число видов поденок, веснянок, ручейников (индекс ЕРТ) — от 0 до 17, индекс Шеннона — от 0 до 4.59. Это свидетельствует о том, что условия обитания донных беспозвоночных сильно различаются на разных речных участках.

Полученные результаты отражены на диаграммах (рис. 2, 3) — отдельно для р. Урал и отдельно для малых водотоков (реки Худолаз, Карагайлы, Блява).

Биологическая индикация р. Урал

На рис. 2 представлено последовательное изменение показателей зообентоса вниз по течению р. Урал от Верхнеуральска до Оренбурга. Стрелками показаны места наиболее значитель-

ного антропогенного воздействия. Видно, что именно в этих пунктах происходит снижение показателей. Первое заметное снижение происходит на ст. 2 — ниже очистных сооружений Верхнеуральска; но оно незначительное. Рассматриваемые биологические параметры достаточно велики: индекс Шеннона 4.18, индекс Вудивиса 11, ЕРТ 4 (встречены по 2 вида поденок и ручейников) (табл. 2, 3); т. е. существенного загрязнения здесь не наблюдается.

На вышерасположенной ст. 1 (которую исходно предполагали рассматривать в качестве “фоновой”) параметры зообентоса, в частности ЕРТ, не самые высокие. По всей вероятности, это связано с тем, что небольшой водоток с расходом воды ~1 м³/с (по данным во время обследования) испытывает воздействие небольших населенных пунктов и сельскохозяйственных

угодий, расположенных выше на территории водосбора.

К ст. 3, расположенной в ~15 км ниже Верхнеуральска, происходит самоочищение реки и разбавление при существенном увеличении водности реки (по данным настоящего исследования — в 3 раза) за счет притоков. Это отражается на показателях зообентоса, которые значительно увеличиваются (рис. 2). Здесь наблюдаются наиболее высокие (из всех полученных на р. Урал) значения индексов Шеннона и Вудивиса. ЕРТ также достигает максимального значения — присутствует 10 видов поденок, 5 видов ручейников и 2 вида веснянок. Основу фауны составляют литореофильные оксифильные виды, такие как поденки *Alainites muticus* (Linnaeus, 1758), *Baetis fuscatus*, *Heptagenia sulphurea* (Müller, 1776), *Serratella ignita* (Poda, 1761), ручейники *Hydropsyche contubernalis*, *H. pellucidula* (Curtis, 1834), *Psychomyia pusilla* (Fabricius, 1781) и *Brachycentrus subnubilus*. Оба вида веснянок (*Isogenus nubecula* и *Xanthoperla apicalis*), обнаруженные на этой станции, считаются чувствительными к загрязнению и являются редкими [26].

Ниже Верхнеуральского водохранилища (на ст. 4) показатели зообентоса также достаточно велики, что свидетельствует о том, из водохранилища поступает вода высокого качества.

Следующее заметное снижение происходит на ст. 5, расположенной в 1.5 км ниже плотины Магнитогорского водохранилища. По сравнению с двумя предыдущими речными участками здесь уменьшается видовое разнообразие, ЕРТ, индекс Вудивиса. Из состава фауны выбывают многие активно плавающие личинки поденок (представители родов *Baetis*, *Labiobaetis*, *Nigrobaetis*, *Potamanthus* и др.), исчезают веснянки. Причиной этого могут быть сточные воды г. Магнитогорска, значительная часть которых поступает в приплотинную зону водохранилища и далее в реку. Косвенно это подтверждается наличием в составе фауны термофильных вселенцев, таких как *Physella acuta* (Draparnaud, 1805), населяющих в умеренных широтах водоемы-охладители, сточные и иные воды, испытывающие сильное термическое загрязнение [37].

Кроме того, во время обследования в водохранилище наблюдалось цветение воды сине-зелеными водорослями, которые могут выделять токсины. Поступление и накопление в донных отложениях реки большого количества органического вещества водорослей ухудшает кислородные условия донных обитателей. Бедные кислородом воды могут поступать в реку также из придонных слоев водохранилища через донный водоспуск.

На ст. 6, расположенной на 50 км ниже предыдущей точки (у пос. Янгельского), состояние донных биоценозов восстанавливается: индекс Вудивиса достигает 14, Шеннона — 4.51, число разных видов поденок составляет 9, а ручейников 7. Вновь практически в прежнем составе встречается комплекс оксифильных, активно плавающих и ползающих поденок — *Baetis buceratus*, *B. fuscatus*, *Labiobaetis atrebatinus*, *Centroptilum luteolum* (Müller, 1776) и *Potamanthus luteus*. В составе сообщества появляются ручейники семейства Leptoceridae (*Athripsodes cinereus* (Curtis, 1834) и *Mystacides azureus* (Linnaeus, 1761)), вновь появляются хищные литореофильные клопы *Aphelocheirus aestivalis*.

Перед Ириклинским водохранилищем (на ст. 13) параметры зообентоса несколько уменьшаются. Но наиболее существенное их снижение происходит ниже водохранилища на ст. 14 (рис. 2). Вода в реку здесь поступает из водохранилища с глубины ~30 м. Поэтому можно предположить, что в такой воде очень мало кислорода и возможно присутствие сероводорода. Эти факторы приводят к резкому снижению видового разнообразия, особенно представителей чистых вод. В табл. 2 видно, что зообентос здесь представлен всего восемью видами: 2 вида бокоплавов и по одному виду моллюсков, жуков, клопов, плоских и глоточных пиявок, ручейников. По показателям численности и биомассы здесь резко доминирует байкальский по происхождению бокоплав *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing, 1899), ранее искусственно вселяемый в озера и водохранилища по всей территории бывшего СССР от Карелии до Средней Азии [40] в качестве объекта питания для молоди ценных видов рыб. Очевидно, этот вид находит здесь оптимальные условия для развития, демонстрируя очень большую био-

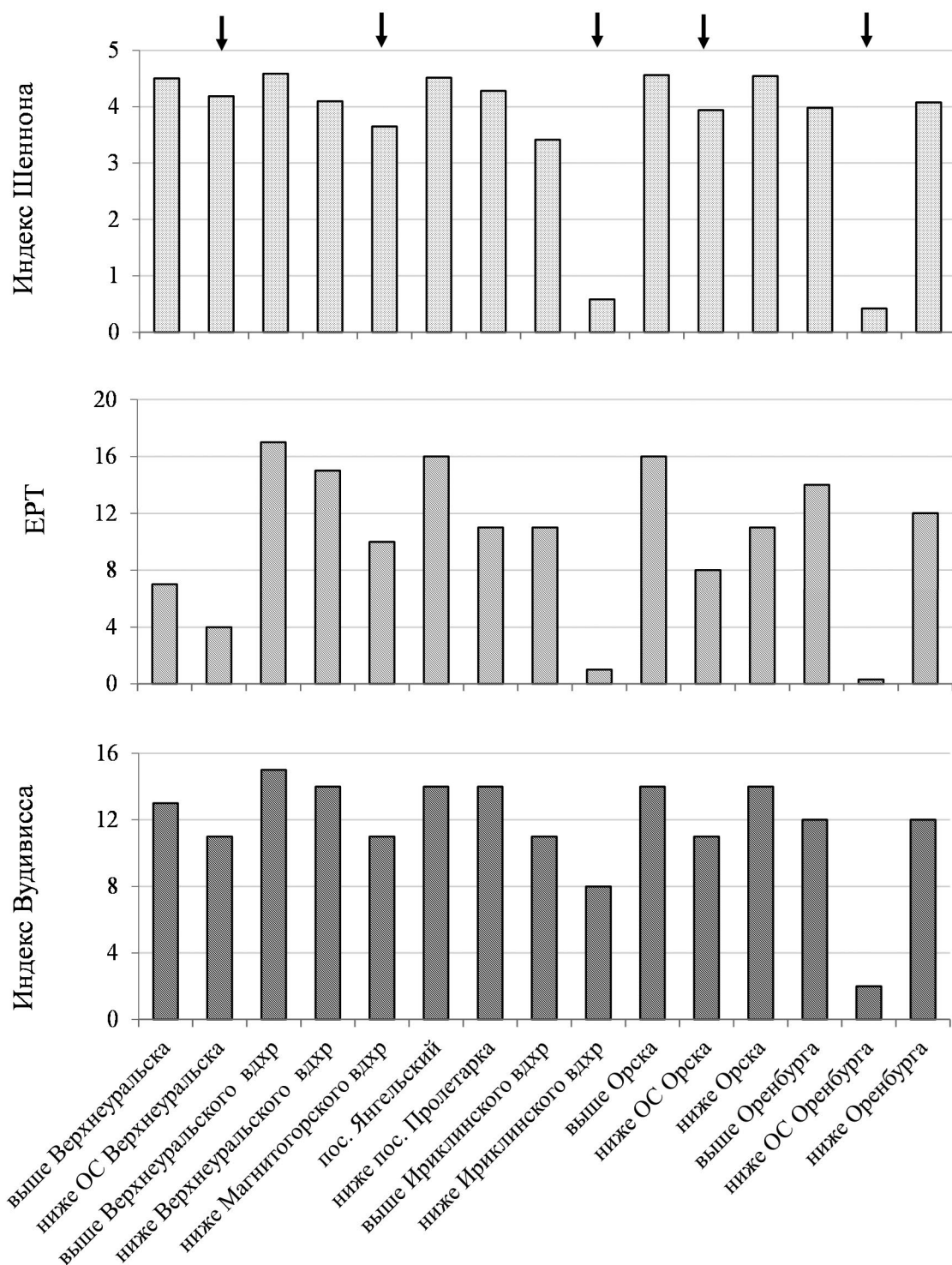


Рис. 2. Биологическая индикация р. Урал в августе 2022 г. (стрелками показаны места антропогенного воздействия).

массу (64 г/м²), почти в полтора раза большую, чем в озерах Карелии [4], при этом существенно теснит автохтонную фауну.

Через 60 км (на ст. 15) состояние биоценозов восстанавливается, а ниже очистных сооружений (ОС) Орска (на ст. 16) показатели снова снижаются. Однако уменьшение невелико, это связано с тем, что сточные воды ОС Орска не сразу поступают в р. Урал, а проходят чрез пруды-отстойники и затем еще ~1 км — по трубе к реке.

Оренбург — значительно более крупный город, чем Орск; от него в р. Урал поступает сточных вод 52.2 млн м³/год против 13.9 млн м³/год из Орска [11]. Поэтому влияние сточных вод на донные биоценозы здесь очень велико: число видов на ст. 22 снижается до 3, индекс Шеннона — до 0.42, Вудивисса — до 2, ЕРТ — до 0. В составе этой фауны вновь обнаруживаются термофильные вселенцы — физы *Physella acuta*, а также крайне устойчивые к разнообразным видам загрязнения лимнофильные личинки хирономид *Chironomus pilicornis* (Fabricius, 1787) и *Polypedilum nubeculosum* (Meigen, 1804). Влияние оказывают не только сами сточные воды, но и содержащиеся в них взвешенные частицы, которые, оседая, формируют слой иловых отложений на дне.

Вместе с тем самоочищающая способность реки достаточно велика, и уже в 40 км ниже Оренбурга на ст. 23 донные биоценозы восстанавливаются, достигая тех величин параметров, которые наблюдались выше города (рис. 2; табл. 3).

Биологическая индикация малых рек

Изучались загрязняемые малые реки Карагайлы, Худолаз (в районе г. Сибая) и Блява (в районе г. Медногорска). Здесь расположены крупнейшие предприятия цветной металлургии — медно-серные комбинаты. Пробы зообентоса отбирали выше и ниже источников загрязнения. На рис. 3 видно, что верхние участки рек по биологическим показателям можно охарактеризовать как достаточно чистые.

Так, на участке Карагайлы выше Сибая (ст. 7) индексы имеют следующие величины: видо-

вого разнообразия 3.78, Вудивисса 13, ЕРТ 16 (табл. 3). Здесь преобладают рео- и оксифильные виды, свойственные чистым и быстрым малым рекам [27]. Основу разнообразия составляют ручейники и веснянки. Из последних наиболее распространена *Leuctra fusca* (Linnaeus, 1758), встречаются также холодолюбивые виды *Amphinemura borealis* (Morton, 1894), *Taeniopteryx nebulosa* (Linnaeus, 1758), *Arcynopteryx compacta* (Mac Lachlan, 1872) и *Isoperla difformis* (Klapalek, 1909). Фауну ручейников также отличает наличие оксифилов, свойственных совершенно чистым водотокам, — обнаружены *Sericostoma personatum* (Kirby et Spence, 1826), *Silo pallipes* (Fabricius, 1781), *Chaetopteryx villosa* (Fabricius, 1798), *Potamophylax latipennis* (Curtis, 1834) и *Rhyacophila nubila* (Zetterstedt, 1840). Поденки представлены видом *Baetis rhodani* (Pictet, 1843), также населяющим чистые малые реки и родники [31].

В р. Карагайлы в г. Сибая на ст. 8 (рис. 4) зообентос почти исчезает, здесь найден только один вид — представитель хирономид *Procladius choreus* (Meigen, 1804) (табл. 2, 3). Это один из наиболее устойчивых к загрязнению видов пресноводных макробеспозвоночных, в норме населяющий бедные кислородом или стоячих водоемов [22]. Ситуация объясняется тем, что на данном участке река проходит ~10 км вдоль отвалов горных пород крупнейшего Сибайского карьера. В реку поступают шахтные воды, а из отвалов вымываются загрязняющие вещества, в результате чего концентрации меди, марганца, цинка, кадмия могут возрастать в десятки и сотни раз [25]. По данным настоящего исследования, электропроводность воды в точке на ст. 8 повышена до 2105 мкСм/см против 236 мкСм/см на вышележащем участке. Загрязнению способствуют маловодность реки (расход <0.1 м³/с) и слабое течение (~0.04 м/с). Гравийно-галечные отложения на этом участке покрыты слоем светло-коричневого ила толщиной в несколько сантиметров. Это значительно ухудшает условия существования донных обитателей. Сходную ситуацию резкого обеднения донной фауны наблюдали в горной р. Модонкуль, протекающей в отвалах горных пород металлургического комбината г. Закаменска (Бурятия) [34].

На следующей точке (ст. 9) в 100 м ниже выпуска сточных вод ОС г. Сибая состояние реки, как ни парадоксально, улучшается; т. е. на предыдущем участке река была загрязнена так сильно, что приток очищенных сточных вод с ОС города способствует улучшению экологического состояния реки. Число видов увеличивается до 17, индекс Шеннона — 2.69, Вудивисса — 8, ЕРТ — 1. Это все еще достаточно загрязненный водоток: основу фауны (11 видов) составляют разнообразные виды пелофильных хирономид, не слишком чувствительных к загрязнению и выдерживающих дефицит кислорода. Здесь же вновь обнаруживаются термофильные вселенцы с воздушным дыханием — моллюски *Ferrissia californica* (Rowell, 1863) и *Physella acuta*, что говорит о тепловом загрязнении реки. Электропроводность воды здесь уменьшается в 1.7 раза по сравнению с расположенной выше точкой.

В 10 км к северо-западу от ст. 7 в отрогах хребта Ирендык — истоки р. Худолаз. Здесь на реке находится самый высокий в Башкортостане водопад Гадельша. Он подлежит охране как гидрологический памятник природы. Здесь отсутствуют заметные источники антропогенного воздействия. Дно на ст. 10 сложено валунами, глыбами, присутствуют щебень, местами — ил; скорость течения ~0.1 м/с. Показатели зообентоса достаточно высокие — суммарно обнаружено 35 видов. Вновь основу фауны составляют холодноводные литореофилы, неустойчивые к загрязнению, такие как поденки *Baetis rhodani* и *Afghanurus joernensis* Bengtsson, 1909, веснянки *Leuctra fusca*, *Amphinemura borealis* и *Arcynopteryx compacta*, ручейники *Rhyacophila nubila*, *Plectrocnemia conspersa* (Curtis, 1834) (встречающийся в родниках вид) [28], *Silo pallipes* (Fabricius, 1781) и др., хирономиды *Diamesa* sp. Для описанного в Норвегии *Afghanurus joernensis* это, вероятно, одна из самых южных находок в Европе [31].

Следующая ст. 11 на р. Худолаз расположена в Сибее после прохождения рекой ~3 км вдоль отвалов горных пород. Дно реки каменистое, скорость течения ~0.3 м/с; имеются участки замедленного течения, где на дне местами может присутствовать ил. Расход воды ~0.5 м³/с. Несмотря на близость горных разработок, состояние донных биоценозов удовлетворительное

(рис. 3; табл. 3). Вновь отмечается резкое преобладание оксифильных и холодноводных видов. Обнаружены поденки, свойственные ручьям и малым рекам, — *Baetis rhodani*, *Ephemera danica* Müller, 1764, *Heptagenia sulphurea* (Müller, 1776) и др. По-прежнему сохраняется богатый комплекс литореофильных веснянок — выявлены *Leuctra fusca*, *Amphinemura borealis*, *Taeniopteryx nebulosa*, *Arcynopteryx compacta* и даже *Isogenus nubecula*. Среди ручейников преобладают оксифильные *Rhyacophila nubila*, *Polycentropus flavomaculatus* (Pictet, 1834), *Chaetopteryx villosa* и *Silo pallipes*. Этим ст. 11 сильно отличается от ст. 8 (на р. Карагайлы). На взгляд авторов статьи, причина такого отличия — не только меньшее внешнее воздействие на р. Худолаз, но и то, что на ст. 11 река более полноводна и имеет высокую скорость течения; т. е. имеются условия для разбавления загрязнений и самоочищения реки. Электропроводность на ст. 11 почти в 2 раза меньше, чем на ст. 8.

В верховьях р. Блява (ст. 17) протекает по малонаселенному району. Показатели зообентоса здесь достаточно высокие (обнаружено 49 видов), что свидетельствует о хорошем состоянии водотока (рис. 3; табл. 3). Богатый литореофильный комплекс включает в себя ряд очень чувствительных к загрязнению видов. Это поденки *Baetis rhodani*, *Paraleptophlebia submarginata* (Stephens, 1835) и достаточно редкие в Восточной Европе *Ecdyonurus dispar* (Curtis, 1834) [29, 31]; веснянки *Leuctra fusca*, *Amphinemura borealis*, *Taeniopteryx nebulosa*, *Isoperla difformis*; ручейники *Rhyacophila nubila*, *Goera pilosa* (Fabricius, 1775), *Potamophylax latipennis*.

Однако уже через 5 км — ниже Медногорского комбината — ситуация резко меняется, донные биоценозы оказываются в угнетенном состоянии (рис. 3; табл. 3). При этом расположенные друг за другом (на расстоянии 5 м) участки с быстрым (перекат) и медленным (плес) течением (ст. 18 и 19) по-разному реагируют на загрязнение. На перекате значительно больше видов (13 против 4), больше индекс Вудивисса (8 против 2), ЕРТ (2 против 0). Здесь присутствуют явно оксифильные виды (такие как *Baetis fuscatus* или *Ecdyonurus dispar*), однако встречаются они единично и, возможно, приносятся

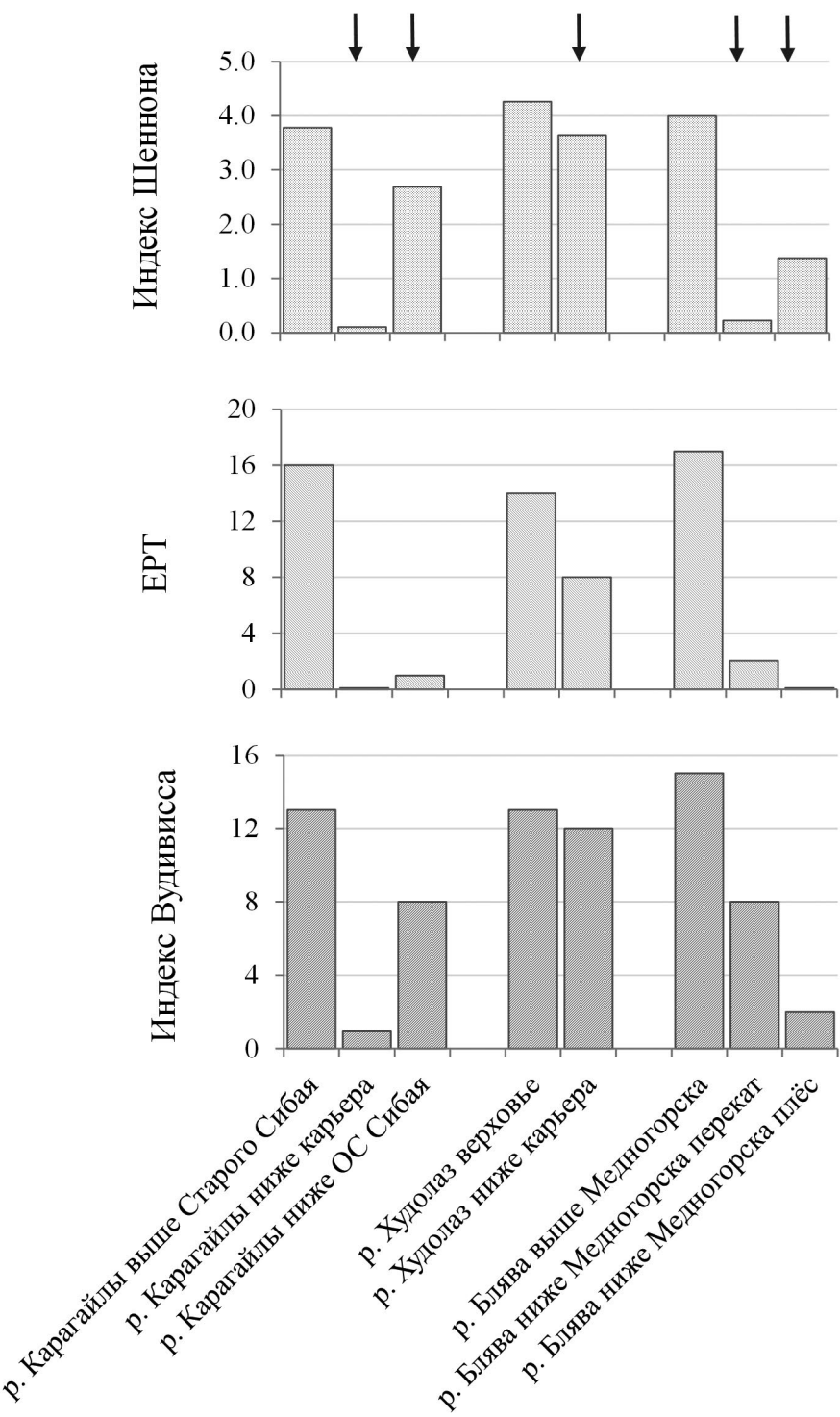


Рис. 3. Биологическая индикация малых рек в августе 2022 г. (стрелками показаны места антропогенного воздействия).

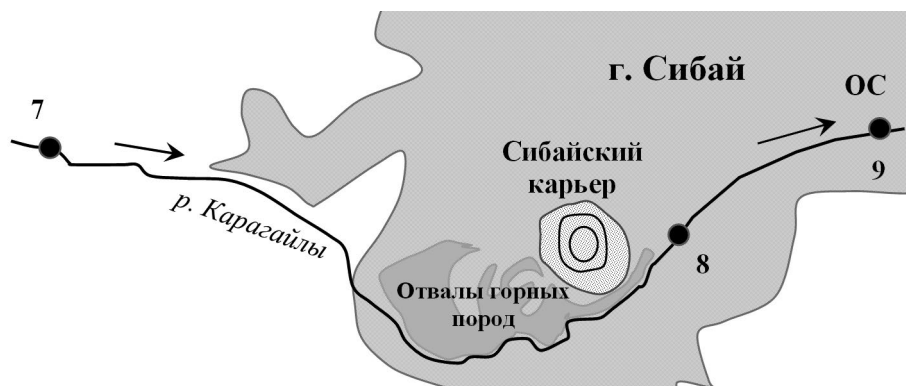


Рис. 4. Пункты обследования (7–9) на р. Карагайлы в августе 2022 г.

течением с верхних участков реки. По показателям численности здесь преобладают разнообразные личинки двукрылых, преимущественно хирономид и мошек. Это литореофильные группы, нуждающиеся в постоянном течении, такие как *Rheocricotopus* sp., *Eukiefferiella* gr. *claripennis* (Lundbeck, 1898). Очевидно, что здесь создаются более благоприятные кислородные условия и не происходит заиливание, как на плесе. Индекс Шеннона на перекате снижен из-за того, что здесь наблюдается доминирование *Orthocladus* sp. (относящегося к семейству Chironomidae). Он составляет 98% общей численности донных беспозвоночных на данной станции. Представители огромного и не до конца изученного транспалеарктического рода *Orthocladus* практически неразличимы на стадии личинок, однако известно, что почти все они – обитатели текучих вод и в значительной степени требовательны к количеству растворенного в воде кислорода [15].

Основной источник загрязнения р. Блявы в г. Медногорске – отвалы пустых пород и некондиционных руд медно-серного комбината. При прохождении через них атмосферных осадков и инфильтрации грунтовых вод образуются агрессивные высокоминерализованные поверхностные воды, содержащие тяжелые металлы (медь, железо, марганец, цинк) в концентрациях, в десятки и сотни раз превышающих ПДК [14]. Результаты наблюдений Росгидромета также дают основание считать, что Блява – одна из самых загрязненных малых рек в регионе [11].

Биотестирование [10, 12] показало, что вода Блявы ниже Медногорского медно-серного

комбината обладает высокой мутагенной активностью – способна вызывать генетические изменения в живых организмах.

Комплексная оценка качества воды по биологическим показателям

Выше рассмотрены отдельные биологические показатели качества воды. Основной среди них, по мнению авторов статьи, – индекс Вудивисса, он включает в себя сразу две характеристики: видовое богатство (число видов) и индикаторные группы организмов. В то же время этот показатель не лишен недостатков. С одной стороны, в нем в упрощенной форме используется индикаторная значимость организмов, а с другой – представлено только число видов, а не видовое разнообразие, учитывающее еще и выровненность сообщества. Логическим дополнением к индексу Вудивисса могут быть индекс видового разнообразия Шеннона и показатель ЕРТ. Они позволяют уменьшить отмеченные выше недостатки индекса Вудивисса.

Поэтому предлагаем на основе этих трех индексов составить один комплексный показатель. Для этого значения параметров из табл. 3 выразим в долях (%) относительно их наибольших величин. Результаты по трем рассматриваемым параметрам представлены в табл. 4. Средние для каждой станции значения составят комплексный показатель качества воды (КПК).

На рис. 5 представлены ранжированные значения КПК. Вертикальными линиями отмечены границы классов качества воды, выделенные по аналогии с используемыми в Росгидромете [11]:

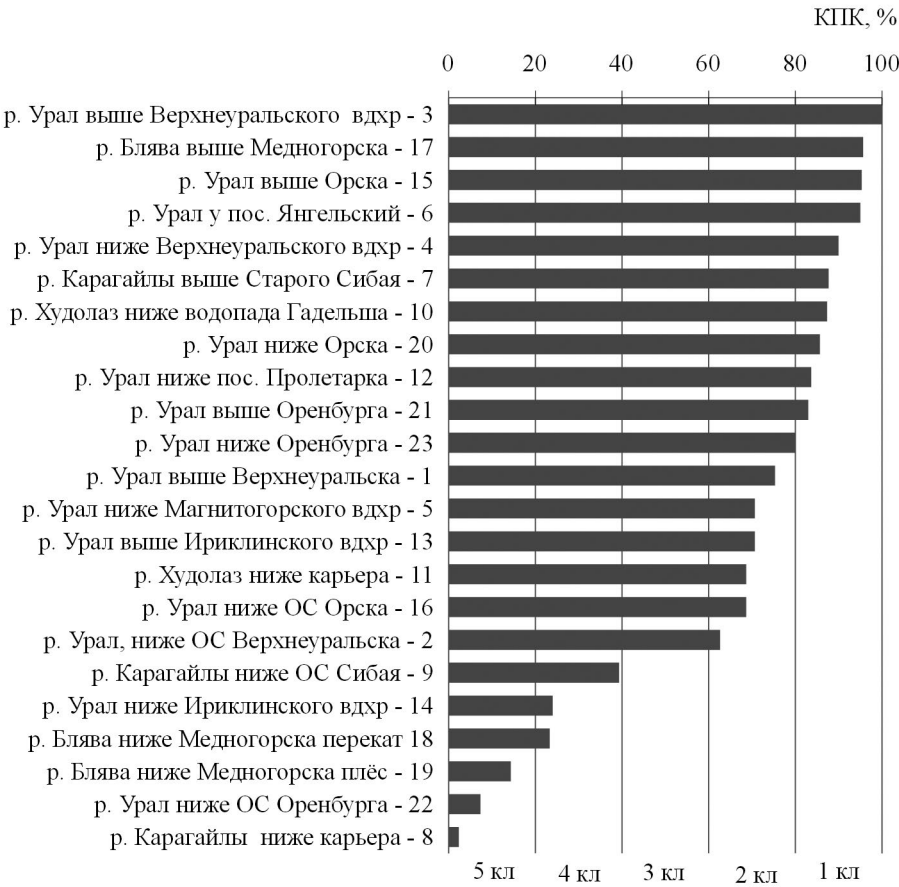


Рис. 5. Ранжирование изученных участков рек по степени загрязнения (по показателю КПК, %).

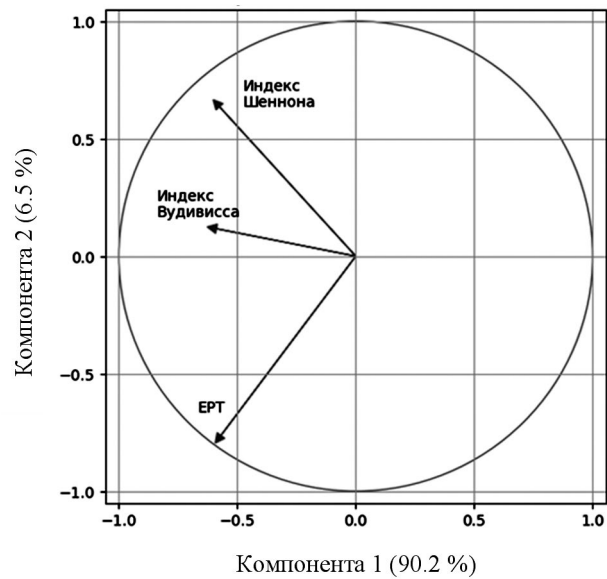


Рис. 6. Коэффициенты корреляции индексов качества воды с двумя главными компонентами (в скобках указаны величины наблюдаемой дисперсии).

1-й класс – условно чистая, 2-й – слабо загрязненная, 3-й – загрязненная, 4-й – грязная, 5-й класс – экстремально грязная вода.

Видно, что 10 обследованных участков рек относятся к 1-му классу качества воды (условно чистые), 7 участков – ко 2-му (слабо загрязненные), 3 участка – к 4-му (грязные) и еще 3 участка – к 5-му классу (экстремально грязные). К последним относятся малые реки Карагайлы и Блява в районе медно-серных комбинатов, а также р. Урал ниже выпуска сточных вод ОС Оренбурга.

Использование метода главных компонент

Для интегральной оценки экологического состояния участков рек на основе рассмотренных выше индексов (табл. 4) использован стандартный способ – метод главных компонент [38]. Применение данного метода позволяет выделить небольшое количество независимых факторов

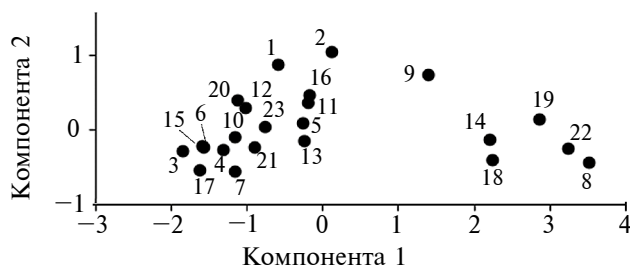


Рис. 7. Положение станций отбора проб в пространстве первых двух главных компонент.

(компонент), с помощью которых можно объяснить значительную часть вариаций исходных данных. Выделяемые таким образом факторы, как правило, хорошо увязываются с процессами, реально наблюдаемыми в природных системах. Перед проведением расчетов выполнялась нормализация данных.

Для рассматриваемого массива исходных данных первая компонента объясняет 90% дисперсии. Все три экологических индекса демонстрируют с ней отрицательную корреляцию Пирсона (рис. 6): индекс Шеннона — -0.58 , индекс Вудивисса — -0.59 , индекс ЕРТ — -0.57 , — что позволяет охарактеризовать ее как показатель экологического неблагополучия: чем выше значения первой компоненты, тем ниже качество воды и тем выше степень ее загрязнения. Вторая по значимости компонента описывает лишь 6.5% вариации системы, поэтому ею можно пренебречь.

В пространстве, заданном двумя главными компонентами на рис. 7, точки отбора проб группируются в два разных по размеру кластера: пять точек справа относятся к сильно загрязненным участкам рек (значения первой главной компоненты >2), тогда как остальные точки располагаются либо на чистых, либо на умеренно загрязненных участках (значения главной компоненты <0). Точка 9 занимает промежуточное положение между двумя кластерами.

При сравнении рис. 7 и 5 можно видеть, что три крайние правые точки (8, 22, 19) на рис. 7 занимают три нижние строчки на рис. 5 — как наиболее загрязненные. Следующие три точки (19, 18, 14) на рис. 7 занимают три следующие строчки выше на рис. 5 и относятся к 4-му классу качества воды. Наоборот, точки, расположенные

слева на рис. 7 (3, 17, 15), занимают верхнее положение на рис. 5 как наиболее чистые.

Таким образом, результаты оценки качества воды, полученные обоими методами (с помощью комплексного показателя КПК и методом главных компонент), дали очень близкие результаты. Коэффициент корреляции Спирмена составил 0.99 — между КПК и значением главной компоненты 1.

ВЫВОДЫ

В ходе исследования р. Урал летом 2022 г. выявлены отдельные речные участки, на которых донные биоценозы угнетены или подавлены. Это места ниже выпуска сточных вод ОС городов, ниже металлургических комбинатов, крупных или эвтрофируемых водохранилищ.

Особенно сильное воздействие испытывают обитатели малых водотоков; сообщества на плесах подвержены большей трансформации, чем на перекатах.

Вместе с тем р. Урал обладает высокой самоочищающей способностью, поэтому изученные участки в большинстве характеризуются как достаточно чистые, благоприятные для развития донных беспозвоночных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеевнина М.С., Поздеев И.В.* Санитарная гидро-биология с основами водной токсикологии. Учеб. пособие. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2016. 205 с.
2. *Алимов А.Ф.* Элементы теории функционирования водных экосистем. СПб.: Наука, 2000. 147 с.
3. *Баканов А.И.* Использование комбинированных индексов для мониторинга пресноводных водоемов по зообентосу // Вод. ресурсы. 1999. Т. 26. № 1. С. 108–111.
4. *Барышев И.А., Сидорова А.И., Георгиев А.П., Калинин Н.М.* Биомасса популяции, продукция за вегетационный период и биоресурсное значение инвазивного *Gmelinoides fasciatus* (Crustacea: Amphipoda) в Онежском озере // Биология внутрен. вод. 2021. № 4. С.433–436.
<https://doi.org/10.31857/S0320965221040057>

5. Биоиндикация экологического состояния равнинных рек. М.: Наука, 2007. 402 с.
6. Вода России. Речные бассейны. Екатеринбург: АКВА-ПРЕСС, 2000. 536 с.
7. Вудивисс Ф. Биотический индекс реки Трент. Макробиологические и биологическое обследование // Научные основы контроля качества поверхностных вод по гидробиологическим показателям: Тр. совет.-англ. семинара. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 132–161.
8. Гареев А.М., Фатхутдинова Р.Ш. Основные этапы изучения гидролого-экологических характеристик водотоков в бассейне реки Урал (в пределах Российской Федерации) // Вод. хоз-во России. 2017. № 5. С. 4–15. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2017-5-1>
9. Гидробиология реки Урал. Челябинск: Южно-Уральское кн. изд-во, 1971. 147 с.
10. Жгарева Н.Н., Соловых Г.Н., Иванова И.Ю., Кольчугина Г.Ф. Некоторые гидрохимические и гидробиологические показатели антропогенного загрязнения реки Бьява в районе г. Медногорска // Вестн. Оренбургского гос. ун-та. 2009. № 6. С. 124–128.
11. Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник. 2021. Ростов н/Д, 2022. 162 с.
12. Кольчугина Г.Ф. Использование биотестирования в оценке потенциальной опасности генотоксичности водной среды: (на примере рек Бьява и Кураганка) // Здоровье населения и среда обитания. 2013. № 6. С. 19–20.
13. Крайнева Т.С., Паньков Н.Н. Фауна и сообщества донных беспозвоночных реки Урал в пределах Айтуарской степи (Оренбургский государственный степной заповедник) // Вестн. Пермского ун-та. Сер. Биология. 2021. № 4. С. 275–288. <https://doi.org/10.17072/1994-9952-2021-4-275-288>
14. Куксанов В.Ф., Грошев И.В., Григорьева О.В. Эколого-гигиеническая характеристика воздействия тяжелых металлов на компоненты природной среды г. Медногорска // Вестн. ОГУ. 2006. № 5. С. 89–65.
15. Макаренченко Е.А., Макаренченко М.А. Хирономиды // Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий / Под ред. С.Я. Цалолыхина. Т. 4. Высшие насекомые. Двукрылые. СПб.: Зоол. ин-т РАН, 1999. С. 210–295, 670–857.
16. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М., 1975. 239 с.
17. Мумбаева С.С., Килякова Ю.В., Мирошникова Е.П., Аринжанов А.Е. Гидробиологическая характеристика реки Урал // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. Сб. материалов Всерос. науч.-методич. конф. Оренбург: ОГУ, 2022. С. 3524–3527.
18. Мэгарран Э. Экологическое разнообразие и его измерение. М.: Мир, 1992. 181 с.
19. Одум Ю. Экология. М., 1986. Т. 1. 328 с.
20. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий / Под ред. С.Я. Цалолыхина. СПб.: Наука, 1994–2004. Т. 1–6.
21. Палатов Д.М., Новичкова А.А., Быков А.Д. Результаты гидробиологических исследований в среднем течении реки Оки // Тр. Окского гос. природ. биосфер. заповедника. 2019. Т. 38. С. 267–292.
22. Панкратова В.Я. Личинки и куколки комаров подсемейств Pedonominae и Tanypodinae. Определитель по фауне СССР. Л.: Наука. 1977. Вып. 112. 154 с.
23. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / Под ред. В.А. Абакумова. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 239 с.
24. Семенченко В.П. Принципы и системы биоиндикации текучих вод. Минск: Орех, 2004. 125 с.
25. Смирнова Т.П. Роль химико-биологических факторов в формировании экологического состояния малых рек в зоне влияния горно-обогатительных комбинатов. Автореф... дис. кан. хим. наук. Казань: КНИТУ, 2009. 21 с.
26. Тесленко В.А., Жильцова Л.А. Определитель веснянок (Insecta, Plecoptera) России и сопредельных стран. Имаго и личинки. Биол.-почв. ин-т ДО РАН. Владивосток: Дальнаука, 2009. 382 с.
27. Чертопруд М.В. Разнообразие и классификация реофильных сообществ макробентоса средней полосы Европейской России // Журн. общей биологии. 2011. Т. 72. № 1. С. 51–73.
28. Чертопруд М.В. Родниковые сообщества макробентоса Московской области // Журн. общей биологии. 2006. Т. 67. № 5. С. 376–384.
29. Чертопруд М.В., Палатов Д.М. Фауна реофильных насекомых Московской области: отряды поденки (Ephemeroptera), веснянки (Plecoptera) и ручейники (Trichoptera) // Материалы V Всерос. симпозиума по амфибиотическим и водным насекомым. Ярославль, 2013. С. 236–242.
30. Чибилев А.А. Бассейн Урала: история, география, экология. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 312 с.
31. Bauernfeind E., Soldán T. The Mayflies of Europe. Ollerup: Apollo Books, 2012. 781 pp.

32. Cairns J., Pratt J.R. A history of biological monitoring using benthic macroinvertebrates // Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates. NY.: Chapman Hall, 1993. P. 10–27.
33. Friberg N., Bonada N., Bradley D.C., Dunbar M.J., Edwards F.K., Grey J., Hayes R.B., Hildrew A.G., Lamouroux N., Trimmer M., Woodward G. Biomonitoring of Human Impacts in Freshwater Ecosystems. The Good, the Bad and the Ugly // Advances Ecol. Res. 2011. V. 44. P. 1–68.
34. Goncharov A.V., Baturina N.S., Maryinsky V.V., Chalov S.R. Ecological assessment of the Selenga River basin, the main tributary of Lake Baikal, using aquatic macroinvertebrate communities as bioindicators // J. Great Lakes Res. 2020. V. 46. № 1. P. 53–61.
<https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.11.005>
35. Kaufmann P.R., Hughe R.M., Paulse S.G., Peck D.V., Seeliger C.W., Weber M., Mitchell R.M. Physical habitat in the conterminous US streams and rivers, part 2: a quantitative assessment of habitat condition // Ecol. Indic. 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109047>
36. Mason C.F. Biology of Freshwater Pollution. 4th ed. N.Y.: Prentice Hall, 2002. 400 p.
37. Nekhaev I.O., Palatov D.M. From the Black sea to the White sea: the first record of the invasive mollusk *Physella acuta* in the extreme north of Europe // Russian J. Biol. Invasions. 2016. V. 7. № 4. P. 351–354.
<https://doi.org/10.1134/S2075111716040056>
38. Pearson K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space // Philosophical Magazine. 1901. V. 2. P. 559–572.
39. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O. et al. Scikit-Learn: Machine Learning in Python // J. Machine Learning Res. 2011. V. 12. P. 2825–2830.
40. Sidorov D.A., Gontcharov A.A., Palatov D.M. Unexpected finding of the invasive baikalian amphipod *Gmelinoides fasciatus* in a cold spring of the Southern Pamir mountains // Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems. 2013. V. 411. № 12. P. 1–8.
41. Woodiwiss F.S. Comparative study of biological-ecological water quality assessment methods // Summary Report. Commission of the European Communities. Severn Trent Water Authority. UK, Nottingham, 1978. 45 p.
42. Woodiwiss F.S. The biological system of stream classification used by the Trent River Board // Chem. Industry. 1964. V. 11. P. 443.

УДК 550.42

ФТОР В ВОДАХ ГИПЕРСОЛЕННЫХ ВОДОЕМОВ (МЕРТВОЕ МОРЕ, ОЗЕРО УРМИЯ)

© 2024 г. А. В. Савенко^а,*, В. С. Савенко^а

^а Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

*e-mail: Alla_Savenko@rambler.ru

Поступила в редакцию 17.05.2023 г.

После доработки 17.07.2023 г.

Принята к публикации 08.10.2023 г.

Определена концентрация фтора в водах Мертвого моря и оз. Урмия, равная соответственно 5.3 ± 0.1 и 10.5 ± 0.1 мг/л, что в пересчете на массу солевого остатка составляет 15.9 и 26.0 мг F/кг безводных солей. Содержание фтора в солевом остатке вод изученных гиперсоленых водоемов существенно ниже такового для нормальной морской воды (37.1 мг F/кг). По экспериментальным данным, воды Мертвого моря и оз. Урмия сильно недосыщены по CaF_2 , в связи с чем спонтанное хемогенное осаждение флюорита в них невозможно.

Ключевые слова: фтор, флюорит, степень насыщения, гиперсоленые водоемы, Мертвое море, оз. Урмия.

DOI: 10.31857/S0321059624020061 **EDN:** CIBIAO

В настоящее время установлено, что фтор, влияя на активность ферментных систем растений, животных и микроорганизмов, играет важную роль в функционировании биоты на глобальном уровне — в масштабе всей биосферы. С учетом того, что в живые организмы, включая человека, фтор поступает в основном из водной среды, это обстоятельство придает изучению водной миграции фтора большое научное и практическое значение.

Один из малоизученных аспектов гидрохимии фтора связан с выяснением закономерностей его накопления в высокоминерализованных бессточных водоемах суши. В некоторых гиперсоленых водоемах содержание фтора достигает десятков миллиграмм на литр [2, 3, 12] и даже до ~ 200 мг/л как, например, в бессточных озерах, расположенных в зоне Эфиопского рифта [23]. При столь высоких концентрациях фтора можно ожидать осаждения труднорастворимого фторида кальция (флюорита), растворимость которого часто лимитирует содержание фтора в природных водах [5, 15], однако прямые доказательства образования в гиперсоленых водоемах хемогенного флюорита не найдены. Небольшое число определений фтора в водах соляных озер при полном отсутствии сведений о степени их насыщения в отношении CaF_2 не позволяет уверенно судить о геохимических закономерностях

поведения фтора в процессе озерного галогенеза и, в частности, о возможности образования хемогенного флюорита.

Целью настоящей работы послужило определение содержания фтора в водах двух крупных гиперсоленых водоемов — Мертвого моря и оз. Урмия, близких по величине минерализации, но сильно различающихся по содержанию кальция, а также экспериментальная оценка степени насыщения вод изучаемых объектов по CaF_2 .

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Мертвое море, расположенное на границе Израиля и Иордании, представляет собой бессточный бассейн с минерализацией воды >300 г/л и специфическим химическим составом, в котором преобладает хлорид магния (53%) при значительно меньших вкладах хлоридов натрия (28%), кальция (14%), калия (5%) и крайне небольшом содержании сульфатов и бикарбонатов ($<1\%$) [19]. В геохимическом отношении Мертвое море исследовано достаточно хорошо [14, 18, 20, 22, 24], однако данные о содержании фтора отсутствуют.

В бессточном оз. Урмия, находящемся на территории Ирана в тектонической депрессии на восточной окраине Курдских гор, величина

Таблица 1. Основной солевой состав природных вод Мертвого моря и оз. Урмия и их искусственных аналогов, соответствующих разбавлению 1 : 1

Вода	Минерализация, г/л	Концентрация, г-экв/л						
		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Мертвое море								
Природная	333.1	6.4819	0.0041	0.0055	0.9453	0.2171	4.2787	1.0273
Искусственная 1 : 2	166.4	3.2410	0.0020	0	0.4726	0.1086	2.1394	0.5136
Оз. Урмия								
Природная	404.0	5.6392	1.7572	0.0984	1.2690	0.3624	5.7649	0.0075
Искусственная 1 : 2	199.0	2.8237	0.8786	0	0.6345	0.1814	2.8827	0.0038

минерализации подвержена сезонной изменчивости: от 80–150‰ (85–170 г/л) весной до 260–280‰ (310–340 г/л) поздней осенью [16]. В засушливый период 1998–2019 гг. объем воды в озере сократился в ~60 раз, и минерализация достигла 330‰ (~400 г/л) при доминировании в составе растворенных компонентов хлорида магния (74%) и второстепенном вкладе сульфатов натрия (21%), калия (5%) и кальция (<1%) [1, 24]. Имеющиеся сведения по содержанию фтора в воде оз. Урмия показывают отсутствие его прямой связи с величиной минерализации. Так, концентрация фтора изменялась от 3 мг/л в 1967 г. до 12 мг/л в 1985 г. [13] и находилась в интервале 12.4–18.6 мг/л в 2020 г. [17] при минерализации вод в местах отбора проб в эти периоды соответственно 282–288, 215 и 328–334 г/л. Следует отметить, что в приведенных работах содержатся только указания на способ определения фтора без подробного описания методики.

Исследуемые пробы воды были отобраны по просьбе авторов статьи в октябре 2017 г. Е.В. Якушевым из прибрежных акваторий в северных частях Мертвого моря и оз. Урмия. Предварительно в этих пробах был определен основной солевой состав (табл. 1). Содержание главных катионов, хлоридов и сульфатов измерено методом капиллярного электрофореза [4] при разбавлении в 500 раз, ионов HCO₃⁻ ≈ Alk — объемным ацидиметрическим методом. Погрешность анализов, вычисленная как отношение разности эквивалентных концентраций главных анионов и катионов к их общему содержанию, была ≤1%.

Содержание фтора определяли с помощью измерительной электрохимической цепи, состо-

ящей из фторидного ионоселективного электрода “Элит-221” и хлорсеребряного электрода сравнения с насыщенным раствором KCl. Прямые потенциометрические измерения проводили в пробах воды Мертвого моря и оз. Урмия, разбавленных в 5 раз. При таком же разбавлении анализировали фтор методом добавок, описанным, например, в [8, 11].

При прямой потенциометрии для калибровки измерительной электрохимической цепи использовали растворы с концентрацией фтора 0.4–4.0 мг/л и таким же солевым фоном, как в исследуемых пробах воды из Мертвого моря и оз. Урмия. Калибровочные растворы были приготовлены следующим образом.

Для моделирования воды Мертвого моря в мерную колбу на 250 мл вносили навески солей в количествах 6.87 г NaCl, 2.03 г KCl, 54.36 г MgCl₂×6H₂O, 7.13 г CaCl₂ и 0.037 г Na₂SO₄, чтобы после доведения до метки дистиллированной водой раствор имитировал природную пробу воды, разбавленную в 2 раза. Модельный аналог разбавленной в 2 раза воды оз. Урмия содержал 9.27 г NaCl, 3.38 г KCl, 50.93 г MgCl₂×6H₂O, 0.037 г MgSO₄×7H₂O и 0.053 г CaCl₂ на 250 мл. Составы искусственных аналогов вод Мертвого моря и оз. Урмия приведены в табл. 1. Далее в мерные колбы на 50 мл с 20 мл одного из модельных растворов добавляли разные аликвоты (2, 5, 10 и 20 мл) раствора NaF с концентрацией 10 мг F/л и доводили до метки дистиллированной водой. Полученные стандартные растворы содержали 0.4, 1.0, 2.0 и 4.0 мг F/л и по основному солевому составу соответствовали разбавленной в 5 раз воде Мертвого моря или оз. Урмия.

Определение степени насыщения вод по CaF_2 (Ω_{CaF_2}) проводили путем сравнения стехиометрических произведений активностей ионов Ca^{2+} и F^- в воде Мертвого моря или оз. Урмия в естественном состоянии и в равновесии с CaF_2 :

$$\begin{aligned}\Omega_{\text{CaF}_2} &= \frac{a_{\text{Ca}^{2+}} a_{\text{F}^-}^2}{a_{\text{Ca}^{2+}\text{sat}} a_{\text{F}^-\text{sat}}^2} = \\ &= \frac{[\Sigma\text{Ca}^{2+}][\Sigma\text{F}^-]^2 \bar{\gamma}_{\text{Ca}^{2+}} \bar{\gamma}_{\text{F}^-}^2}{[\Sigma\text{Ca}^{2+}]_{\text{sat}} [\Sigma\text{F}^-]_{\text{sat}}^2 \bar{\gamma}_{\text{Ca}^{2+}\text{sat}} \bar{\gamma}_{\text{F}^-\text{sat}}^2} \approx \\ &\approx \left(\frac{[\Sigma\text{F}^-]}{[\Sigma\text{F}^-]_{\text{sat}}} \right)^2,\end{aligned}\quad (1)$$

где a_i , $[\Sigma i]$ и $\bar{\gamma}_i$ — активность, общая концентрация и общий коэффициент активности растворенного компонента i (подстрочный индекс “sat” обозначает принадлежность к раствору, насыщенному по фториду кальция). Последнее приближенное равенство в (1) обусловлено тем, что растворение CaF_2 практически не изменяет концентрацию растворенного кальция и значения общих коэффициентов активности растворенных компонентов.

Твердая фаза фторида кальция в экспериментах по установлению степени насыщения

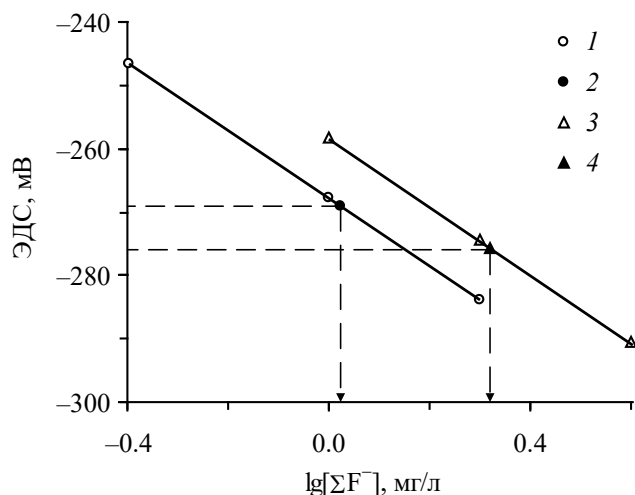


Рис. 1. Определение содержания фтора в пробах воды Мертвого моря и оз. Урмия методом прямой потенциометрии при разбавлении 1 : 5. Мертвое море: 1 — калибровочные растворы на искусственном аналоге, 2 — природная вода; оз. Урмия: 3 — калибровочные растворы на искусственном аналоге, 4 — природная вода.

вод Мертвого моря и оз. Урмия по CaF_2 была представлена образцом гидротермального кристаллического флюорита из Забайкалья, растертый в агатовой ступке до состояния “пудры” с размером частиц < 50 мкм. К 20 мл воды Мертвого моря или оз. Урмия добавляли по 0.5 г растертого флюорита и перемешивали суспензии на шейкере в течение 3 недель по 7 ч в сутки до установления постоянной концентрации фтора, соответствующей состоянию насыщения. Затем после трехдневного отстаивания растворы отфильтровывали через мембранный фильтр с диаметром пор 0.22 мкм и определяли в них концентрацию фтора методом прямой потенциометрии. В силу высокого содержания фторидов в насыщенных по CaF_2 водах Мертвого моря и оз. Урмия измерения проводили в пробах, разбавленных в 50 раз, и такое же разбавление применяли при приготовлении калибровочных растворов.

Для использованного в экспериментах образца флюорита предварительно была определена величина термодинамического произведения растворимости $L_{\text{CaF}_2}^0$ в разбавленных растворах CaCl_2 — KCl :

$$L_{\text{CaF}_2}^0 = a_{\text{Ca}^{2+}\text{sat}} a_{\text{F}^-\text{sat}}^2. \quad (2)$$

В пластиковые емкости вносили по 0.8 г тонко растертого флюорита и добавляли по 80 мл растворов CaCl_2 — KCl с переменной концентрацией Ca^{2+} и постоянной ионной силой, равной 0.08. Суспензии в течение 3 недель перемешивали на шейкере по 7 ч в сутки (постоянные концентрации растворенного фтора достигались через 3–4 дня) и после отстаивания отфильтровывали через мембранный фильтр 0.22 мкм для определения содержания фтора методом прямой потенциометрии.

Погрешность прямых потенциометрических измерений и метода добавок составила ± 0.02 мг F/л. Поскольку кислотность анализируемых растворов не достигала областей значимого влияния недиссоциированных молекул HF^0 ($\text{pH} < 3.0$) или гидроксил-ионов ($\text{pH} > 8.5$) [9, 11], для создания оптимальной величины pH при измерениях содержания фтора (~ 6.3) было достаточно добавления ацетатного солевого буфера.

Таблица 2. ЭДС измерительной электрохимической цепи в пробах воды Мертвого моря и оз. Урмия, разбавленных в 5 раз, и в калибровочных растворах с таким же основным солевым составом

Раствор	ЭДС, мВ	$\lg[\Sigma F^-]$, мг/л	$[\Sigma F^-]$, мг/л
Мертвое море			
Калибровочный раствор 1	–246.5	–0.398	0.4
Калибровочный раствор 2	–267.8	0.000	1.0
Калибровочный раствор 3	–284.0	0.301	2.0
Природная вода 1 : 5*	–269.1	0.025	1.06 ± 0.02
Пересчет на неразбавленную природную воду*			5.3 ± 0.1
оз. Урмия			
Калибровочный раствор 1	–258.3	0.000	1.0
Калибровочный раствор 2	–274.5	0.301	2.0
Калибровочный раствор 3	–290.6	0.602	4.0
Природная вода 1 : 5*	–275.6	0.322	2.10 ± 0.02
Пересчет на неразбавленную природную воду*			10.5 ± 0.1

* Среднее значение по пяти измерениям.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Значения ЭДС измерительной электрохимической цепи в калибровочных растворах и разбавленных в 5 раз водах изучаемых объектов приведены в табл. 2. Полученная по этим данным концентрация фтора в разбавленных пробах воды Мертвого моря и оз. Урмия составила 1.06 ± 0.02 и 2.10 ± 0.02 мг/л (рис. 1). Это соответствует содержанию растворенных фторидов 5.3 ± 0.1 и 10.5 ± 0.1 мг/л в природных водах Мертвого моря и оз. Урмия с минерализацией 333 и 404 г/л, или 15.9 и 26.0 мг F/кг безводных солей, что существенно меньше такового в солевом остатке нормальной морской воды (37.1 мг F/кг).

Результаты определения величины произведения растворимости флюорита, использован-

ного в экспериментах, представлены в табл. 3. Согласно имеющимся данным о константах устойчивости фторидных комплексов [7, 21], в разбавленных растворах $\text{CaCl}_2\text{--KCl}$ явлениями комплексообразования можно пренебречь и для нахождения термодинамического произведения растворимости $L_{\text{CaF}_2}^0$ в (2) достаточно учесть коэффициенты активности свободных ионов кальция $\gamma_{\text{Ca}^{2+}}$ и фтора γ_{F^-} :

$$L_{\text{CaF}_2}^0 = [\Sigma \text{Ca}^{2+}]_{\text{sat}} [\Sigma \text{F}^-]_{\text{sat}}^2 \gamma_{\text{Ca}^{2+}} \gamma_{\text{F}^-}^2,$$

$[\Sigma \text{Ca}^{2+}]$ и $[\Sigma \text{F}^-]$ – молярные концентрации кальция и фторидов. Значения коэффициентов активности этих ионов, рассчитанные по полумпирическому уравнению Дэвиса – уравнению третьего приближения теории Дебая–Хюккеля [10]:

Таблица 3. Растворимость природного кристаллического флюорита CaF_2 в разбавленных растворах $\text{CaCl}_2\text{--KCl}$ при температуре $23 \pm 1^\circ\text{C}$

Навеска CaF ₂ , г	Объем, мл			Ионная сила <i>I</i>	γ _{Ca²⁺}	γ _{F⁻}	[ΣCa ²⁺] _{sat}	[ΣF ⁻] _{sat}	<i>L</i> _{CaF₂} ⁰ × 10 ⁻¹¹
	H ₂ O	1.06 М CaCl ₂	3.2 М KCl						
							мМ		
0.8	78	0	2.0	0.08	0.462	0.824	0.36	0.749	6.34
0.8	78	0.4	1.6	0.08	0.462	0.824	5.58	0.188	6.19
0.8	78	0.8	1.2	0.08	0.462	0.824	10.88	0.135	6.23
0.8	78	1.2	0.8	0.08	0.462	0.824	16.13	0.112	6.35
0.8	78	1.6	0.4	0.08	0.462	0.824	21.68	0.096	6.27
0.8	78	2.0	0	0.08	0.462	0.824	26.90	0.086	6.25
Среднее									6.27±0.08

$$\lg \gamma_i = -\frac{0.5115 z_i^2 \sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} + 0.1 z_i^2 I,$$

где z_i – заряд свободного иона i , I – ионная сила раствора, составляют соответственно 0.462 и 0.824. Отсюда по данным проведенных экспериментов получим величину термодинамического произведения растворимости природного кристаллического $\text{CaF}_2 = (6.27 \pm 0.08) \times 10^{-11}$ при $23 \pm 1^\circ\text{C}$, которая удовлетворительно согласуется со справочными данными для химически чистого $\text{CaF}_2 = (2.6\text{--}4.0) \times 10^{-11}$ при температуре 25°C [6, 7, 21]. Это позволяет считать использованную в экспериментах фазу флюорита вполне репрезентативной.

Данные измерений насыщенности по флюориту (табл. 4) показывают, что концентрация растворенного фтора в водах Мертвого моря и оз. Урмия, находящихся в равновесии с CaF_2 , составляет соответственно 30.3 ± 0.1 и 369 ± 1 мг/л, в 5.7 и 35 раз превышая естественное содержание этого элемента (5.3 ± 0.1 и 10.5 ± 0.1 мг/л). Расчет по уравнению (1) дает степень насыщения вод Мертвого моря и оз. Урмия по флюориту, равную 0.031 и 0.0008, что означает невозможность хемогенного образования CaF_2 в обоих водоемах в настоящее время. Если более высокое содержание фторидов в воде оз. Урмия по сравнению с таковым в Мертвом море может быть связано с особенностями мобилизации фтора на водосборе, то

чрезвычайно малая величина степени насыщения по CaF_2 определенно обусловлена очень низким содержанием растворенного кальция.

ВЫВОДЫ

Концентрация растворенных фторидов в водах Мертвого моря и оз. Урмия с минерализацией 333 и 404 г/л составляет 5.3 ± 0.1 и 10.5 ± 0.1 мг/л, или 15.9 и 26.0 мг F/кг безводных солей, что существенно меньше содержания фтора в солевом остатке нормальной морской воды (37.1 мг F/кг).

Согласно данным экспериментов, спонтанное хемогенное осаждение флюорита как в Мертвом море, так и в оз. Урмия невозможно: в равновесии с кристаллическим CaF_2 концентрация растворенных фторидов в водах указанных водоемов находится соответственно на уровне 30.3 ± 0.1 и 369 ± 1 мг/л, а степень насыщения по этому минералу равна 0.031 и 0.0008.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрулионис Н.Ю., Завьялов П.О. Лабораторные исследования основного компонентного состава гипергалинных озер // Морской гидрофизич. журн. 2019. Т. 35. № 1. С. 16–36.
2. Бектуров А.Б., Мазурова А.Л., Мун А.И. К вопросу о поведении йода, брома и фтора в процессе осад-

Таблица 4. ЭДС измерительной электрохимической цепи в насыщенных по флюориту CaF_2 пробах воды Мертвого моря и оз. Урмия, разбавленных в 50 раз, и в калибровочных растворах с таким же основным солевым составом

Раствор	ЭДС, мВ	$\lg [\Sigma \text{F}^-]$, мг/л	$[\Sigma \text{F}^-]$, мг/л
Мертвое море			
Калибровочный раствор 1	–305.5	–0.301	0.5
Калибровочный раствор 2	–321.5	0.000	1.0
Калибровочный раствор 3	–337.4	0.301	2.0
Насыщенная по CaF_2 природная вода 1:50*	–309.9	–0.217	0.607 ± 0.002
Пересчет на неразбавленную воду, насыщенную по CaF_2 *			30.3 ± 0.1
оз. Урмия			
Калибровочный раствор 1	–305.5	0.477	3.0
Калибровочный раствор 2	–318.1	0.699	5.0
Калибровочный раствор 3	–337.5	1.041	11.0
Насыщенная по CaF_2 природная вода 1:50*	–327.7	0.868	7.38 ± 0.02
Пересчет на неразбавленную воду, насыщенную по CaF_2 *			369 ± 1

* Среднее значение по измерениям в трех экспериментах.

- кообразования в водоеме // Вестн. АН Казахской ССР. 1967. № 2. С. 24–32.
3. *Егорова Е.Н.* О фторе в боратах и борных рудах Индерского района // Зап. Всерос. минерал. об-ва. 1940. Ч. 69. № 4. С. 458–471.
 4. *Комарова Н.В., Каменцев Я.С.* Практическое руководство по использованию систем капиллярного электрофореза “Капель”. СПб.: Вода, 2006. 212 с.
 5. *Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швеиц В.М.* Геохимия подземных вод: теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. 672 с.
 6. *Кумок В.Н., Кулешова О.М., Карабин Л.А.* Производство растворимости. Новосибирск: Наука, 1983. 326 с.
 7. *Лурье Ю.Ю.* Справочник по аналитической химии. М.: Химия, 1989. 447 с.
 8. *Никольский Б.П., Матерова Е.А.* Ионоселективные электроды. М.: Химия, 1980. 240 с.
 9. *Покровский О.С., Савенко В.С.* Определение константы диссоциации фтористоводородной кислоты в морской воде с помощью фторидного ионоселективного электрода // Океанология. 1993. Т. 33. № 1. С. 149–152.
 10. *Робинсон Р., Стокс Р.* Растворы электролитов. М.: ИЛ, 1963. 646 с.
 11. *Савенко В.С.* Введение в ионометрию природных вод. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 77 с.
 12. *Седельников Г.С., Андриясова Г.М.* Фтор, бром, йод в рассолах Кара-Богаз-Гола // Изв. АН Туркменской ССР. 1968. № 4. С. 51–56.
 13. *Asem A., Mahmoudi A.* One and a half centuries of physicochemical data of Urmia Lake, Iran: 1852–2008 // Int. J. of Science and Knowledge. 2013. V. 2. № 1. P. 57–72.
 14. *Bentor Y.K.* Some geochemical aspects of the Dead Sea and the question of its age // Geochim. Cosmochim. Acta. 1961. V. 25. № 4. P. 239–260.
 15. *Edmunds W.M., Smedley P.L.* Fluoride in natural waters // Essentials of Medical Geology: Revised Edition. Ch. 13. Dordrecht: Springer, 2013. P. 311–336.
 16. *Kelts K., Shahrabi M.* Holocene sedimentology of hypersaline Lake Urmia, northwestern Iran // Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 1986. V. 54. № 1–4. P. 105–130.
 17. *Kheiri R., Mehrshad M., Pourbabae A.A., Ventosa A., Amoozegar M.A.* Hypersaline Lake Urmia: A potential hotspot for microbial genomic variation // Sci. Rep. 2023. V. 13. № 374. P. 1–11.
 18. *Lerman A.* Model of chemical evolution of a chloride lake – The Dead Sea // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1967. V. 31. № 12. P. 2309–2330.
 19. *Livingstone D.A.* Data of geochemistry, Sixth ed. Ch. G. Chemical composition of rivers and lakes // U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 1963. № 440-G. P. G1–G64.
 20. *Nissenbaum A.* Minor and trace elements in Dead Sea water // Chem. Geol. 1977. V. 19. № 1–4. P. 99–111.
 21. *Smith R.M., Martell A.E.* Critical stability constants. V. 4. Inorganic complexes. N.Y.: Plenum Press, 1976. 257 p.
 22. *Stiller M., Lensky N., Gavrieli I.* Recent Evolution of the Dead Sea Chemical Composition: 2005–2015. Tech. Rep. Jerusalem, 2018. 54 p.
 23. *Von Damm K.L., Edmond J.M.* Reverse weathering in the closed-basin lakes of the Ethiopian rift // Am. J. Sci. 1984. V. 284. № 7. P. 835–862.
 24. *Yakushev E.V., Andrulionis N.Yu., Jafari M., Lahijani H.A.K., Ghaffari P.* How climate change and human interaction alter chemical regime in salt lakes, case study: Lake Urmia, Aral Sea, the Dead Sea, and Lake Issyk-Kul // Lake Urmia: A Hypersaline Waterbody in a Drying Climate. The Handbook of Environmental Chemistry. Switzerland: Springer Nature, 2021. https://doi.org/10.1007/698_2021_811

УДК 556.314

ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗНОТИПНЫХ ОЗЕР БОЛЬШОГО СОЛОВЕЦКОГО ОСТРОВА¹

© 2024 г. К. В. Титова^{а, *}, Н. М. Кокрятская^а, С. С. Попов^а, О. Ю. Морева^а, А. А. Слобода^а,
С. И. Климов^а, В. М. Быков^а, Н. С. Прилуцкая^а

^аФедеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Н.П. Лавёрова УрО РАН,
Архангельск, 163020 Россия

*e-mail: ksyu-sev@mail.ru

Поступила в редакцию 06.04.2023 г.

После доработки 27.09.2023 г.

Принята к публикации 27.09.2023 г.

Проведены комплексные гидрохимические исследования девяти разнотипных озер Большого Соловецкого острова (Архангельская область) (июль 2022 г.). Выбор объектов обусловлен морфометрическими особенностями водоемов, удаленностью от моря и возможным наличием антропогенной нагрузки. Определены основные гидрохимические показатели (температура, электропроводность/минерализация, pH, цветность, щелочность, ионный состав, жесткость, содержание кислорода, сероводорода, органического углерода, биогенных элементов, тяжелых металлов, метана). Выявлена низкая жесткость вод, а также минерализация с доминированием хлорид-ионов и натрия. Показано, что гидрохимические условия, в целом, благоприятны для протекания биогеохимических процессов. При низком и среднем содержании органического вещества (от 8 до 30 мг/л) в его составе доминировали гумусовые кислоты, обуславливающие повышенную цветность вод (за исключением оз. Нижний Перт). По уровню трофии исследованные озера отнесены к категории олиготрофных (одно из них дистрофное), мезотрофных и эвтрофных. Антропогенная нагрузка обусловила статус мезотрофного водоема, а высокая трофность определялась природными факторами (заболоченностью водосборов и относительно недавним отделением их от моря).

Ключевые слова: Соловецкие острова, водные объекты, гидрохимические показатели, трофический статус.

DOI: 10.31857/S0321059624020078 **EDN:** CHPMXT

ВВЕДЕНИЕ

Глобальная система мониторинга окружающей среды по пресной воде GEMS/Water создана в 1978 г. для сбора данных о качестве воды по всему миру, для оценки состояния и тенденций изменения качества воды во внутренних водоемах, для поддержки устойчивого развития водных ресурсов. С ее помощью странам предлагается защищать и восстанавливать пресноводные и морские экосистемы, чтобы сохранить их для будущих поколений [27, 32]. По количеству озер большой интерес для Северо-Запада России имеет Большой Соловецкий остров. Всего на Соловецком архипелаге их насчитывается 376,

причем 337 из них расположено именно на этом острове [16], где часть озер соединена каналами. Уникальная озерно-канальная система имеет важное природоохранное значение. Органично вписываясь в природный ландшафт архипелага, эта система совершенствует природную среду острова, препятствуя заболачиванию приозерных лугов и лесов, улучшая гидрологические и гидрохимические показатели озер путем увеличения их проточности [13]. Гидрохимические исследования озер Соловецкого архипелага немногочисленны. В 1980–1990-е гг. сотрудники МГУ им. М.В. Ломоносова проводили подобные работы. Современный этап исследований связан с работами сотрудников Института экологических проблем Севера УрО РАН (с 2001 по 2007 г.). В этот период были проведены промеры глубин 16 озер Большого Соловецкого острова (Красное, Валдай, Щучье, Большое Карзино, Плотничье, Круглое Орлово, Средний Перт, Питьевое, Святое и др.). Для определения гидро-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 22-27-20144 “Сукцессионные процессы при переходе лимнической экосистемы от морской к континентальной с учетом воздействия природных и антропогенных факторов (на примере водоемов Большого Соловецкого острова”).

химических особенностей внутренних водоемов на семи озерах (Щучье, Большое Карзино, Плотище, Круглое Орлово, Средний Перт, нижний Перт, Святое) были отобраны смешанные пробы воды из верхнего слоя. Изученные озера имели слабокислую реакцию среды, содержание в них соединений фосфора, железа, тяжелых металлов было $\leq$ ПДК [16]. В настоящее время с появлением новых приборных методов отбора и определения гидрохимических показателей достоверность полученных результатов повышается. В июле 2020 г. были проведены рекогносцировочные исследования трех озер Большого Соловецкого острова (Святого, Питьевого и Среднего Порта). Отбор проб осуществлялся на 18 выбранных участках этих трех озер только из поверхностного и придонного слоев. Воды исследованных озер отнесены к категории ультрапресных с очень низкой минерализацией и жесткостью. На ионном составе сказывалось островное положение водоемов. В воде всех исследованных озер были превышены ПДК по железу (в 1.5–2.0 раза) и также норматив по цветности (в 2–5 раз), что связано с естественными причинами – заболоченностью водосборных площадей [20].

Целью данного исследования было проведение комплексных гидрохимических исследований нескольких озер Большого Соловецкого острова и оценка их экологического состояния.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования были выбраны девять озер, расположенных на территории Большого Соловецкого острова: Лесное (Исаковское), Большое Куможье, Варваринское, Святое, Средний Перт, Питьево, Биосадское (Игуменское), Банное (рис. 1). Водоемы отличались удаленностью от моря и наличием возможной антропогенной нагрузки (озера Банное и Святое находятся на территории пос. Соловецкого). У каждого из них есть сток воды либо в соседнее озеро, либо непосредственно в море. Часть озер относится к озерно-канальной системе: Святое, Банное, Питьево, Средний Перт; другие – Лесное, Большое Куможье, Варваринское, Биосадское – образуют малые озерные системы; только оз. Нижний Перт в настоящее время является обособленным водоемом.

Визуальный осмотр возможных источников антропогенного воздействия на исследуемые озера дал следующие результаты. Для озер Питьевого и Средний Перт таковыми могли быть прогулки на гребных лодках (рекреационная нагрузка); для оз. Нижний Перт – расположение на его берегу Ботанического сада и купание местных жителей и туристов; для оз. Большое Куможье – рыбная ловля на удочку (нагрузка минимальна); для оз. Лесного (Игуменского) – расположение на берегу Исаковского скита; для оз. Банного – вторичное загрязнение от донных отложений (наличие на его берегах водорослевого комбината (в настоящее время не действует) и муниципальной бани) и поступление вод со взлетно-посадочной полосы; для оз. Биосадского – сток вод со взлетно-посадочной полосы; для Святого – поступление вод с этого же объекта посредством Питьевого канала, а также нагрузка со стороны жителей пос. Соловецкого и гостиничного комплекса. В оз. Святом отмечено купание жителей и туристов, а также крупного рогатого скота и собак. На южном берегу водоема расположена дизельная электростанция, обеспечивающая электроэнергией все объекты поселка, и резервуары с топливом для ее функционирования. На оз. Варваринском ан-

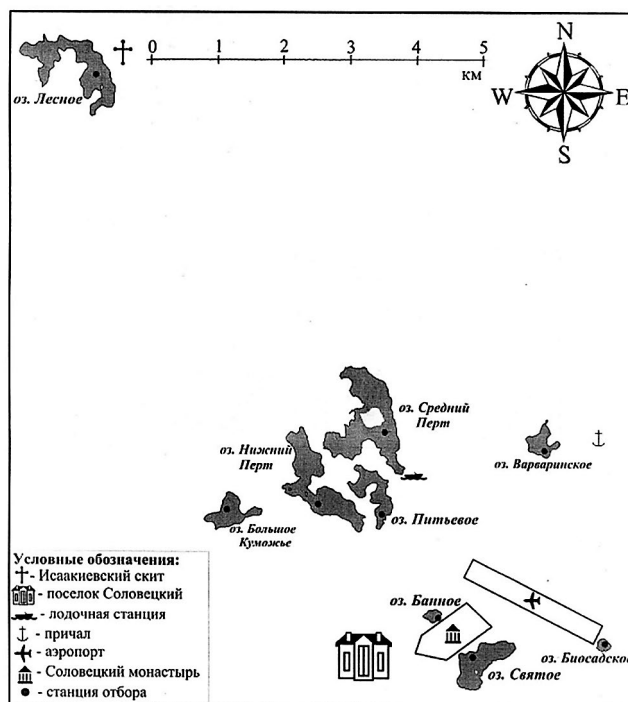


Рис. 1. Картограмма территории расположения объектов исследования и станций отбора проб.

Таблица 1. Некоторые морфометрические характеристики исследуемых озер

Озеро	Координаты станций, град.		Длина, м	Ширина, м	Площадь, км ²	Глубина макс, м	Высота над уровнем моря, м
	с.ш.	в.д.					
Банное	65.03007	35.70633	239	164	0.026	2.2	4
Биосадское	65.02717	35.75161	189	140	0.021	9.0	18
Большое Куможье	65.04244	35.64893	749	430	0.141	8.8	11
Варваринское	65.04920	35.73495	500	280	0.094	9.0	9
Лесное	65.09282	35.61352	1661	585	0.439	23.0	4
Нижний Перт	65.04308	35.67365	1727	378	0.423	14.0	14
Питьевое	65.04195	35.69098	980	400	0.174	10.0	17
Святое	65.02560	35.71560	880	380	0.230	10.1	7
Средний Перт	65.05122	35.69176	1510	930	0.586	14.3/7.5*	17

*Числитель — максимальная глубина, знаменатель — глубина станции отбора.

тропогенное воздействие минимально — рыбная ловля на удочку, жилых строений на берегах не обнаружено.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования озер в июле 2022 г. начались с промерных работ. Их проводили на надувной гребной лодке с использованием комплекса эхолот “Garmin Fishfinder 140” и GPS-навигатора “Garmin Etrex 10” с параллельной фиксацией координат и глубины водоема в конкретной точке. Для всех озер были определены глубоководные участки (в случае обнаружения нескольких ям в озере выбирался участок на наибольшем расстоянии от втекающих или вытекающих ручьев и каналов), на которых в дальнейшем проводились исследования. На основе этих измерений и анализа топографических карт, спутниковых снимков Яндекс-Карт, расчета площадей озер с помощью программы Surfer получены характеристики, представленные в табл. 1.

Более детальная батиметрическая съемка сделана для двух озер — Святого и Нижний Перт (рис. 2, 3). Промеры глубин выполнялись с помощью эхолота “Humminbird GPS-Fishfinder 363”. Точность определения местоположения в зависимости от открытости местности менялась от 5–6 до 7–8 м. Ошибки измерения оценивались по пересекающимся галсам и учитывались при камеральной обработке. Измеренные данные подвергались критическому анализу, контролю

на выбросы и при необходимости — фильтрационному сглаживанию.

Измерены содержание кислорода и температура с помощью портативного оксиметра “HQ30D.99 Hach Lange” с люминесцентным датчиком и кабелем до 30 м. На основе этих данных определены горизонты отбора проб воды с помощью горизонтальных поликарбонатных батометров на 2 и 5 л в соответствии с ГОСТ [3]. В случае необходимости применялась консервация образцов. Они доставлялись в полевую лабораторию в пос. Соловецкий и стационарную в г. Архангельск с соблюдением сроков и способов хранения. Измерены *in situ* значения pH (pH-метр “HI 83141 Hanna”) и электропроводность (кондуктометр “HI 8733 Hanna”).

В условиях экспедиционной и стационарных лабораторий с применением стандартных и апробированных методик фотометрически определены следующие характеристики: цветность по хром-кобальтовой шкале на спектрофотометре “Unico 1201” [1]; содержания биогенных элементов (аммония, нитритов, нитратов, фосфатов, кремния) согласно [18], железа и марганца (фотометрически и методом атомно-абсорбционной спектроскопии (спектрометр “NovAA-315 SA”)), сероводорода [17]; ионный состав (хлорид, сульфат, натрий, калий, кальций, магний) на жидкостном хроматографе “LC-20 Prominence”; щелочность; содержание гидрокарбонатов [2], органического углерода (анализатор “TOC-Lcsp”), тяжелых металлов (спектрометр “NovAA-315 SA”).

Минерализация (мг/л) воды рассчитана сложением концентраций ионов [5, 6, 28]. Для определения класса воды проведен перерасчет концентраций в единицы мг-экв/л для каждого иона, рассчитано их процентное соотношение [22, 29]. Жесткость определялась сложением эквивалентных концентраций ионов кальция и магния.

В виду неоднородности выборки полученных результатов по измеренным параметрам, содержанию компонентов в воде в качестве

усредненного значения приводились медианные значения величин, рассчитанные с помощью программы Excel. Коэффициент корреляции r^2 оценивали по методу Спирмена (статистически значимо при $p < 0.05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изученные авторами настоящей статьи озера можно отнести по классификации П.В. Иванова [7] к следующим категориям по их площади (км²): озерки (0.01–0.1) — Биосадское (0.02) < Банное (0.03); очень малые озера (0.1–1) — Варваринское (0.09) < Большое Куможье (0.14) < Питьевое (0.17) < Святое (0.23) < Нижний Перт (0.42) < Лесное (0.44) < Средний Перт (0.59). По максимальной глубине (м) озера классифицируют так: с очень малой глубиной (<3.12) — Банное (2.2); средней (6.25–12.5) — Большое Куможье (8.8) < Варваринское (9.0) < Биосадское (9.0) < Питьевое (10) < Святое (10.1); повышенной (12.5–25) — Нижний Перт (14.0) < Средний Перт (14.3) < Лесное (23.0). Сопоставляя максимальную глубину с площадью озера, можно отметить увеличение глубины с возрастанием площади [7]. Глубина и площадь водоема связаны с происхождением котловины — ледникового или ледниково-тектонического. Ярусность расположения водоемов (табл. 1) обусловлена постледниковым поднятием острова на несколько миллиметров в год [13].

По классификации в [7, 23, 26] воды исследованных озер по усредненным величинам минерализации в период летней стратификации отнесены к категориям: ультрапресные (<100 мг/л) — Биосадское (19) < Средний Перт (28) = Питьевое (28) < Святое (33) < Большое Куможье (36) < Нижний Перт (38) < Банное (39), пресные (100–500 мг/л) — Лесное (102) < Варваринское (115). При этом изменения электропроводности и минерализации вод для озер были невелики, за исключением озер Варваринского и Лесного. Для одних озер (Святое, Банное, Варваринское, Лесное) электропроводность вод увеличивается от поверхности к придонным слоям, а для других (Питьевое, Средний и Нижний Перт) отмечена противоположная тенденция. В водной толще озер Большое Куможье и Биосадское средние слои воды

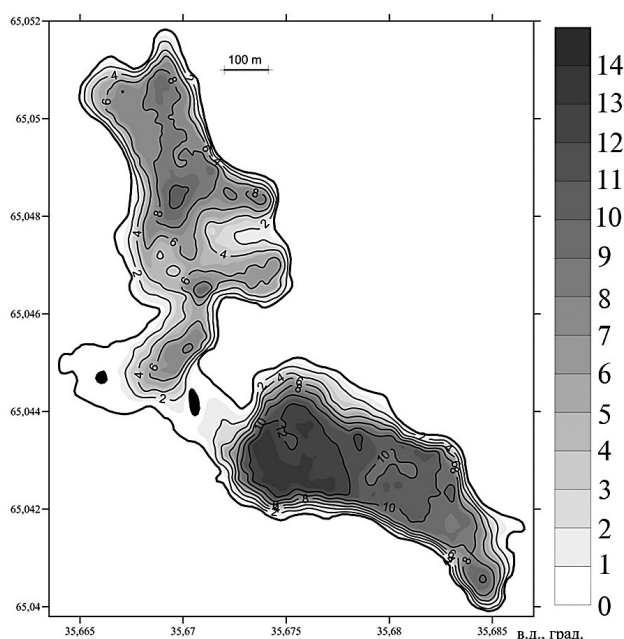


Рис. 2. Батиметрическая карта оз. Нижний Перт.

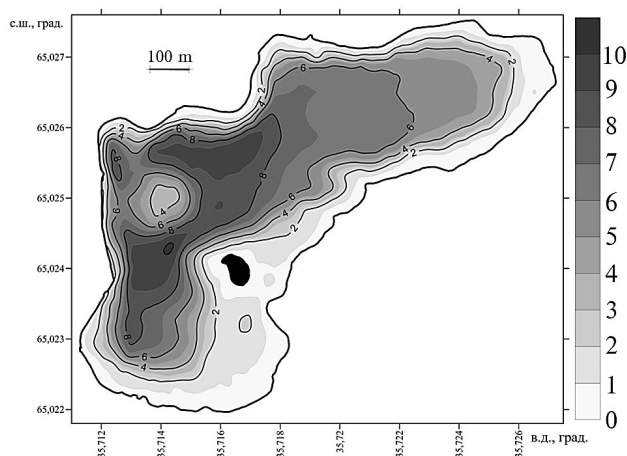


Рис. 3. Батиметрическая карта оз. Святого.

Таблица 2. Концентрация основных ионов в воде исследуемых озер, Белого моря и дождевых осадков (числитель – среднее значение (медиана), знаменатель – минимальное-максимальное значения; %-экв рассчитан от суммы анионов и катионов отдельно)

Озеро	Единицы измерения	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+
Банное	мг/л	<u>12.20</u> 11.59–12.81	<u>8.64</u> 8.57–8.72	<u>4.80</u> 4.70–4.89	<u>6.57</u> 6.51–6.63	<u>3.98</u> 3.90–4.05	<u>1.88</u> 1.86–1.91	<u>0.74</u> 0.72–0.77
	%-экв	<u>36.78</u> 35.63–12.81	<u>44.82</u> 44.37–45.27	<u>18.40</u> 17.69–19.10	<u>43.21</u> 43.05–43.44	<u>30.08</u> 29.93–33.28	<u>23.78</u> 23.78–23.79	<u>2.90</u> 2.83–2.95
Биосадское	мг/л	<u>0.61</u> 0.61–1.22	<u>7.72</u> 5.72–8.17	<u>2.92</u> 1.93–3.61	<u>5.20</u> 5.14–5.49	<u>1.88</u> 1.00–1.80	<u>1.12</u> 1.02–1.33	<u>0.29</u> 0.25–0.30
	%-экв	<u>4.00</u> 3.34–6.44	<u>75.40</u> 69.33–76.84	<u>20.60</u> 19.03–24.23	<u>59.30</u> 51.92–61.68	<u>15.20</u> 12.92–20.75	<u>23.70</u> 23.36–25.55	<u>1.80</u> 1.76–1.92
Большое Куможье	мг/л	<u>10.98</u> 9.76–10.98	<u>9.34</u> 9.28–9.70	<u>2.19</u> 2.17–2.21	<u>8.14</u> 7.86–8.20	<u>3.34</u> 3.15–3.40	<u>1.88</u> 1.82–1.93	<u>0.54</u> 0.49–0.56
	%-экв	<u>36.45</u> 34.10–36.99	<u>54.25</u> 53.72–56.08	<u>9.30</u> 9.18–9.81	<u>51.14</u> 50.18–52.16	<u>24.07</u> 23.33–24.96	<u>22.78</u> 22.46–23.05	<u>2.00</u> 1.85–2.07
Варваринское	мг/л	<u>35.68</u> 32.33–60.39	<u>38.25</u> 36.80–45.00	<u>1.94</u> 0.86–2.20	<u>29.93</u> 28.96–33.30	<u>4.85</u> 4.14–10.64	<u>3.34</u> 3.29–4.16	<u>1.68</u> 1.61–1.86
	%-экв	<u>34.72</u> 32.02–43.51	<u>62.87</u> 55.71–65.21	<u>2.41</u> 0.79–2.77	<u>69.40</u> 60.98–71.44	<u>13.25</u> 11.18–22.41	<u>15.05</u> 14.60–15.18	<u>2.30</u> 2.01–2.38
Лесное	мг/л	<u>20.74</u> 18.91–26.84	<u>40.21</u> 32.25–56.20	<u>3.96</u> 3.68–4.21	<u>25.35</u> 21.32–37.04	<u>6.08</u> 5.59–6.67	<u>4.20</u> 3.71–4.99	<u>1.34</u> 1.12–1.75
	%-экв	<u>21.88</u> 20.85–24.39	<u>72.82</u> 69.76–75.00	<u>5.30</u> 4.16–5.97	<u>61.56</u> 59.86–66.97	<u>16.99</u> 13.87–18.16	<u>19.56</u> 17.29–20.02	<u>1.89</u> 1.81–2.03
Нижний Перт	мг/л	<u>10.98</u> 10.98–10.98	<u>10.27</u> 10.11–10.37	<u>2.94</u> 2.82–3.11	<u>7.96</u> 7.79–8.00	<u>3.36</u> 3.29–3.39	<u>1.86</u> 1.86–1.91	<u>0.67</u> 0.66–0.77
	%-экв	<u>33.92</u> 33.54–34.38	<u>54.49</u> 54.31–54.79	<u>11.52</u> 11.22–12.07	<u>50.32</u> 49.48–50.81	<u>24.45</u> 24.03–24.76	<u>22.68</u> 22.53–23.25	<u>2.55</u> 2.47–2.85
Питьевое	мг/л	<u>6.10</u> 6.10–6.10	<u>8.02</u> 3.72–8.16	<u>3.66</u> 1.83–3.91	<u>5.97</u> 3.04–6.30	<u>2.46</u> 1.39–2.52	<u>1.55</u> 0.81–1.60	<u>0.54</u> 0.44–0.63
	%-экв	<u>24.99</u> 24.51–41.17	<u>56.23</u> 43.14–56.60	<u>18.78</u> 15.69–19.97	<u>49.38</u> 47.13–49.86	<u>23.40</u> 22.93–24.78	<u>24.39</u> 24.07–24.64	<u>2.83</u> 2.38–4.02
Святое	мг/л	<u>6.71</u> 6.71–7.32	<u>8.16</u> 7.93–8.32	<u>5.52</u> 5.17–5.98	<u>6.00</u> 5.96–6.10	<u>4.00</u> 3.78–4.38	<u>1.79</u> 1.71–1.86	<u>0.83</u> 0.78–0.87
	%-экв	<u>24.90</u> 24.16–25.22	<u>50.40</u> 48.60–51.84	<u>24.96</u> 23.83–26.77	<u>41.38</u> 39.85–42.69	<u>31.76</u> 30.50–33.28	<u>23.53</u> 23.30–23.68	<u>3.33</u> 3.27–3.46
Средний Перт	мг/л	<u>6.71</u> 6.71–6.71	<u>7.81</u> 3.95–8.86	<u>3.68</u> 2.03–4.26	<u>5.88</u> 3.14–6.86	<u>2.45</u> 1.58–2.65	<u>0.85</u> 0.82–1.66	<u>0.59</u> 0.39–0.66
	%-экв	<u>27.05</u> 24.54–41.74	<u>54.10</u> 42.22–55.67	<u>18.85</u> 16.05–19.80	<u>50.90</u> 46.07–55.38	<u>26.54</u> 22.61–26.66	<u>23.60</u> 14.80–23.90	<u>3.28</u> 2.89–3.37
Белое море	мг/л	<u>101</u>	<u>13890</u>	<u>1900</u>	<u>7455</u>	<u>501</u>	<u>1115</u>	<u>240</u>
	%-экв	<u>0.38</u>	<u>90.47</u>	<u>9.15</u>	<u>72.29</u>	<u>5.59</u>	<u>20.74</u>	<u>1.38</u>
Дождевая вода (Соловки)	мг/л	<u>0.35</u>	<u>9.61</u>	<u>1.71</u>	<u>4.60</u>	<u>1.92</u>	<u>1.02</u>	<u>0.36</u>
	%-экв	<u>1.84</u>	<u>86.75</u>	<u>11.42</u>	<u>51.03</u>	<u>24.71</u>	<u>21.88</u>	<u>2.38</u>
Дождевая вода (суша)	мг/л	<u>0.75</u>	<u>0.30</u>	<u>0.55</u>	<u>0.30</u>	<u>0.49</u>	<u>0.17</u>	<u>0.06</u>
	%-экв	<u>38.18</u>	<u>26.24</u>	<u>35.58</u>	<u>24.20</u>	<u>46.01</u>	<u>26.20</u>	<u>2.89</u>

отличаются наименьшими по всей толще величинами электропроводности.

Для всех исследованных озер доминирующим анионом был хлорид-ион, доминирующим катионом — натрий (табл. 2). При этом для озер подзон северной тайги и лесотундры характерны слабоминерализованные карбонатно-кальциевые воды [7]. Таковыми были они и для исследованных водоемов северотаежной зоны на территории Архангельской области [9]. Основные источники поступления ионов — атмосферные осадки и поверхностно-грунтовые воды [4]. В дождевой, болотной и подземной водах, отобранных в районе проводимых исследований, доминирующие ионы — хлорид и натрий, что характерно для вод Белого моря, омывающего Соловецкие острова (табл. 2). Минерализация отобранной болотной воды составляла 12, подземной воды — 30, дождевой воды — 19.5 мг/л. Для сравнения была отобрана дождевая вода в окрестностях г. Архангельска, минерализация которой составила 2 мг/л, а доминирующими ионами в ней были гидрокарбонат/сульфат и кальций. При этом абсолютные концентрации хлорид-ионов в пробах этих вод отличались в 30 раз, сульфатов — незначительно — в 3 раза.

Воды всех исследованных озер относились к категории очень мягких — жесткость ≤ 1.5 ммоль/л [7] (табл. 2): Биосадское (0.15) < Средний Перт (0.17) < Питьевое (0.25) < Нижний Перт = Большое Куможье (0.32) < Святое = Банное (0.35) < Варваринское (0.52) < Лесное (0.65). Можно отметить, что на величину жесткости вод сказывалась их удаленность от моря.

Для большинства микроорганизмов оптимальные для жизнедеятельности — близкие к нейтральным среды. pH воды Соловецких озер в среднем менялось от 4.00 до 7.53. По этому показателю воды исследованных водоемов можно отнести [14] к следующим категориям: кислые (pH 3–5) — Биосадское (4.00); слабокислые (5–6.5) — Святое (5.52), Питьевое (5.79), Банное (6.00), Нижний Перт (6.10), Лесное (6.12), Большое Куможье (6.31); нейтральные (6.5–7.5) — Средний Перт; слабощелочные (7.5–8.5) — Варваринское. Во всех случаях снижение pH отмечено от поверхностных к придонным слоям воды.

Значительную часть органического вещества поверхностных вод в северных районах России составляют гуминовые и фульвовые кислоты. Гумусовые (гуминовые и фульвовые) кислоты, присутствующие в болотных водах, — источники обогащения вод ионами водорода, что приводит к снижению pH [11]. Количества же гумусовых кислот и железа определяют цветность вод. Этот показатель, в свою очередь, оказывает влияние на прозрачность вод и протекание микробиологических процессов. Исследованные озера по степени окрашенности (цветности) (град) их вод [21] относились к следующим группам: слабоокрашенные (20–39) — Нижний Перт; среднеокрашенные (40–59) — Питьевое, Средний Перт, Банное, Варваринское; темноокрашенные (100–199) — Святое, Биосадское; исключительно темноокрашенные (>200) — Большое Куможье, Лесное. Сравнивая водоемы этих градаций по гумусности (табл. 3), можно отметить, что для слабоокрашенных вод оз. Нижний Перт их цветность обуславливается в основном содержанием

Таблица 3. Классификация вод исследованных озер по гумусности

Озеро	По цветности, град [11]	По содержанию органического вещества, мг/л [10]	По содержанию общего железа, мг/л [12]
Банное	Олигомеzogумусное	Мезогумусное	Мезогумусное
Биосадское	Мезополигумусное	Мезогумусное	Мезогумусное
Большое Куможье	Полигумусное	Мезополигумусное	Полигумусное
Варваринское	Мезополигумусное	Мезогумусное	Полигумусное
Лесное	Полигумусное	Мезополигумусное	Полигумусное
Нижний Перт	Олигомеzogумусное	Мезогумусное	Ультраолигогумусное
Питьевое	Мезополигумусное	Мезогумусное	Мезогумусное
Святое	Мезополигумусное	Мезогумусное	Полигумусное
Средний Перт	Мезополигумусное	Мезогумусное	Мезогумусное

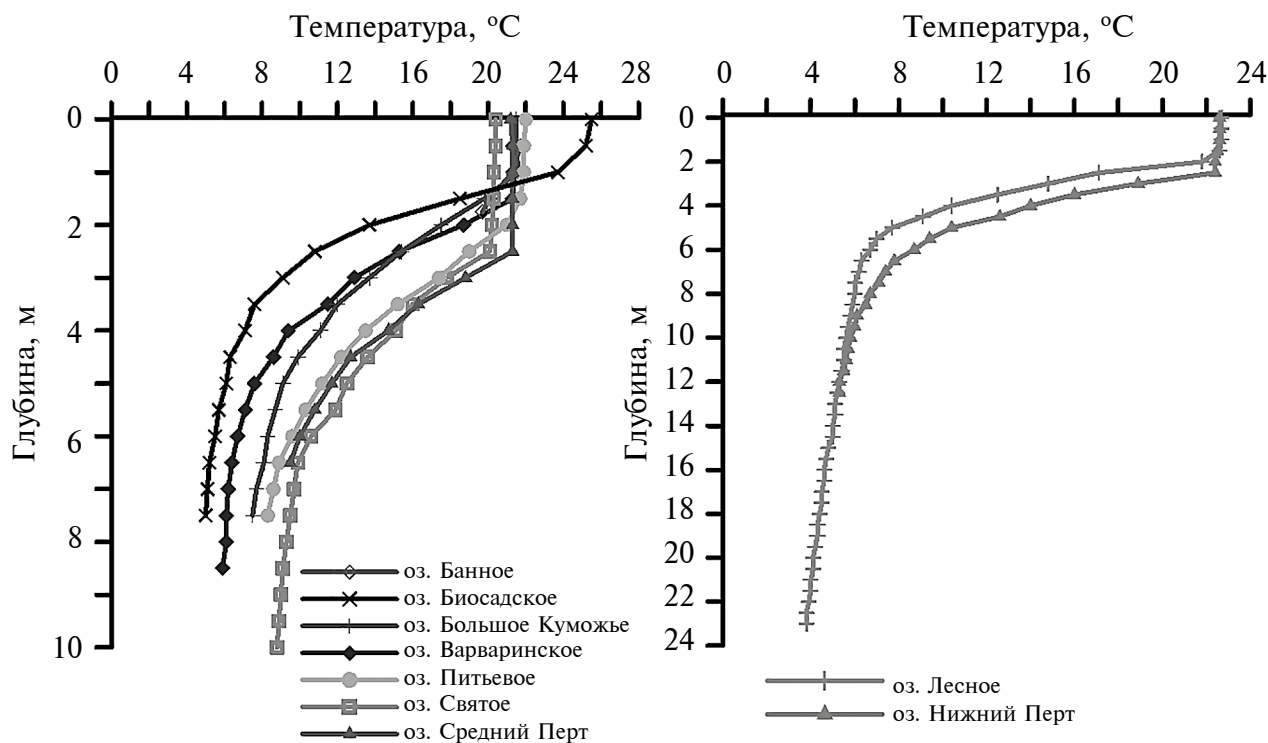


Рис. 4. Вертикальное распределение температуры в исследованных озерах Большого Соловецкого острова.

органического вещества, для самых окрашенных (озера Большое Куможье и Лесное) – значителен вклад железа; для среднеокрашенных озер, за исключением оз. Варваринского, оба показателя обуславливают их цветность.

Содержание марганца ≤ 0.02 мг/л для всех озер, кроме Святого (0.16), Большое Куможье (0.22) и Варваринское (0.22). Концентрации других тяжелых металлов, а также нефтепродуктов для всех исследованных озер не превышали нормативы.

По усредненному содержанию органического вещества (мг/л) водоемы классифицировались следующим образом [7]: с низким содержанием (7.5–15) – Нижний Перт (8) < Питьево (8.5) < Средний Перт (8.9) < Банное (9.9) < Варваринское (12.7); средним (15–30) – Святое (16.7) < Биосадское (18.5) < Большое Куможье (27.6) < Лесное (30.0).

Температура поверхностного слоя в летний период 2022 г. для исследованных озер менялась от 20 до 25 °C (рис. 4). Из-за закрытости

лесом, особенностей котловин и глубины водоемов в них наблюдалась обратная температурная стратификация вод, за исключением оз. Банного. Для озера Лесного (высококрасочное и глубокое) и Нижний Перт (слабоокрашенное и глубокое), а также Биосадского (темноокрашенное средней глубины) ко дну наблюдалось снижение температуры до 4–5 °C. Наиболее прогретыми оставались воды оз. Банного – 19 °C. Самый большой градиент температуры отмечен для воды озера Биосадского (20 °C) и Лесного (19 °C). Для всех озер (за исключением Банного) достаточно отчетливо выражен слой термоклина, мощность которого различна. Меньше всего этот слой в озерах Святом и Средний Перт.

Содержание кислорода в поверхностном слое озерных вод в летний период составляло 8.0–9.6 мг/л (рис. 5). Пересыщение вод кислородом отмечалось для озера Варваринского, Большое Куможье и Нижний Перт. Для всех озер отмечено снижение концентрации кислорода от поверхности ко дну. В придонном слое зафиксировано значимое содержание кислорода для озера

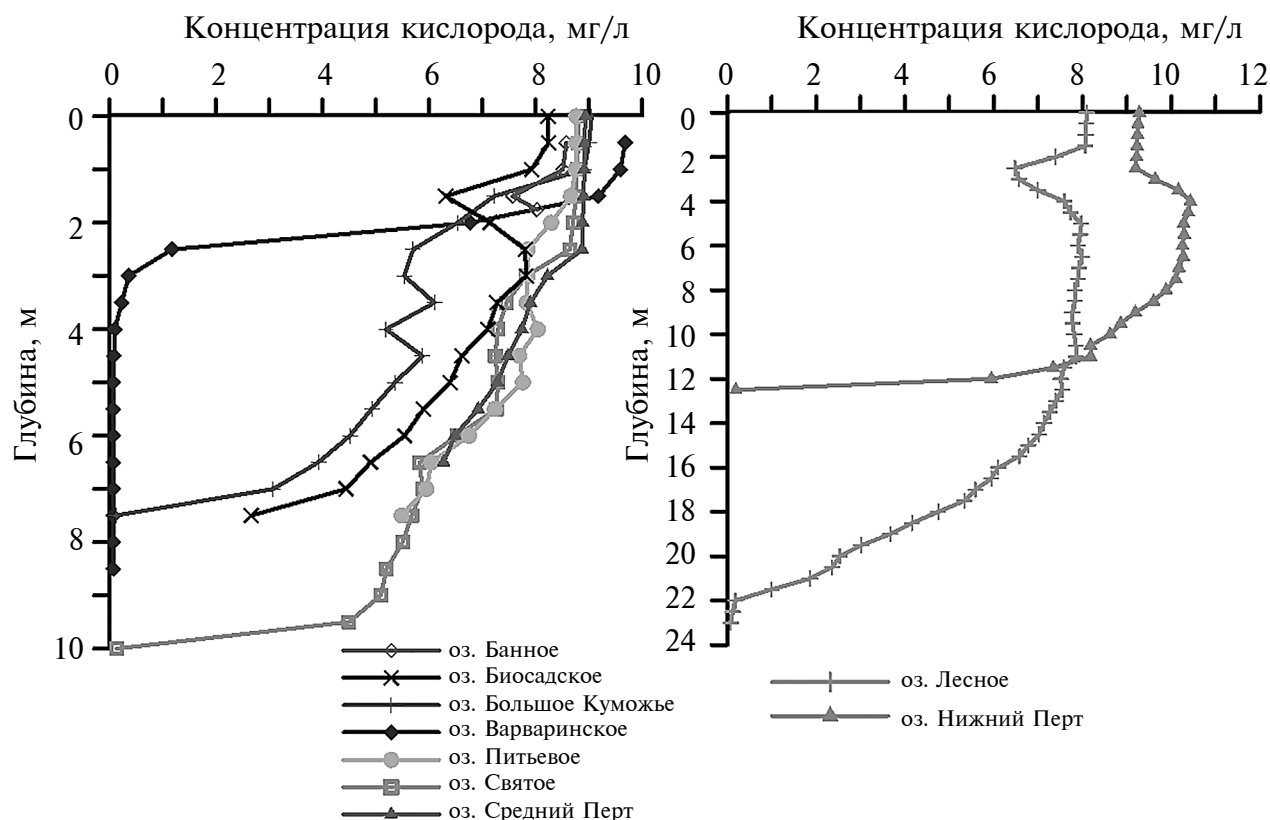


Рис. 5. Вертикальное распределение концентраций кислорода в исследованных озерах Большого Соловецкого острова.

Банного (8) (малой глубины), Средний Перт (6.3), Питьевого (5.5 мг/л) (проточность, озерно-канальная система) и немного меньшее для оз. Биосадского (2.6 мг/л). Полное исчерпание кислорода в придонном горизонте отмечено для озера Лесного, Нижний Перт, Большое Куможье и Святого. Только для оз. Варваринского выявлено наличие границы аэробно-анаэробных условий на горизонте 3 м.

При небольших концентрациях сульфатов в воде исследуемых водоемов в целом содержание сульфидов >5 мкг/л (ПДК для рыбохозяйственных водоемов) [15] выявлено в водах озера Святого (12), Большое Куможье, Лесном (21) и Варваринском (до 376 мкг/л в анаэробной зоне), что свидетельствует о процессе сульфатредукции в них [25].

Исследованные озера также различались по щелочности и содержанию гидрокарбонатов (табл. 2): для оз. Биосадского эти показатели стремились к нулю, были близки для

вод озера Питьевого, Средний Перт, Святого (0.10–0.11 ммоль/л и 6.1–6.7 мг/л соответственно); Нижний Перт, Банного, Большое Куможье (0.18–0.19 ммоль/л и 11–11.5 мг/л); наибольшие значения этих показателей отмечены для озера Лесного (0.32–0.40 ммоль/л и 19.5–24.4 мг/л) и Варваринского (0.53–0.99 ммоль/л и 32–60 мг/л).

Содержание биогенных элементов – один из основных показателей трофических условий в озере. Содержание кремния определяется степенью выветривания из кремнийсодержащих пород и минералов – наибольшим его количество было в водах оз. Лесного (табл. 4). Из соединений минерального азота в водах всех исследованных озера, за исключением оз. Варваринского, преобладающими были нитраты. Минимальные их количества отмечены для воды оз. Святого, что связано с потреблением их фитопланктоном, а максимальные – в оз. Средний Перт. Значительный вклад органической составляющей в общее количество сое-

Таблица 4. Концентрация биогенных элементов в воде исследуемых озер (числитель – среднее значение (медиана), знаменатель – значение в поверхностном–придонном слоях)

Озеро	$P_{\text{мин}}$, мкг/л	$P_{\text{вал}}$, мкг/л	$N-NO_2$, мкг/л	$N-NO_3$, мкг/л	$N-NH_4$, мкг/л	$N_{\text{вал}}$, мкг/л	Si, мкг/л
Банное	<u>30.78</u> 26.05–35.52	<u>35.65</u> 22.15–38.65	<u>3.11</u> 3.14–3.08	<u>118.40</u> 119.8–117.0	<u>21.55</u> 20.87–22.23	<u>334.1</u> 370.0–298.3	<u>1090</u> 1116–1065
Биосадское	<u>5.47</u> 1.48–17.17	<u>5.48</u> 8.55–15.50	<u>5.16</u> 4.59–7.34	<u>82.60</u> 66.40–97.00	<u>33.44</u> 21.84–67.67	<u>347.4</u> 237.0–528.4	<u>844</u> 503–1887
Большое Куможье	<u>32.86</u> 13.62–75.18	<u>49.24</u> 24.76–76.72	<u>8.12*</u> 8.23–9.91	<u>89.45</u> 79.70–134.3	<u>36.08</u> 28.28–98.28	<u>566.2*</u> 508.3–558.1	<u>2101</u> 781–3420
Варваринское	<u>89.45</u> 7.40–686.1	<u>92.40</u> 34.78–750.0	<u>4.48</u> 2.41–8.12	<u>144.8</u> 11.70–163.1	<u>321</u> 25.16–2726	<u>601.5</u> 382.8–2900	<u>1297</u> 161–3097
Лесное	<u>44.26</u> 13.62–108.6	<u>73.74</u> 44.25–108.2	<u>8.46</u> 8.00–13.80	<u>165.8</u> 110.1–266.5	<u>35.98</u> 23.20–138.5	<u>622.7**</u> 629.5–945.5	<u>3528</u> 2365–4436
Нижний Перт	<u>1.04</u> 0.30–1.78	<u>27.34</u> 24.66–35.78	<u>0.98</u> 0.73–1.23	<u>109.6</u> 109.5–137.4	<u>30.62</u> 18.92–40.17	<u>283.0</u> 228.4–324.2	<u>844</u> 684–1007
Питьевое	<u>2.07</u> 2.66–2.96	<u>29.81</u> 21.86–66.02	<u>1.32</u> 1.23–1.90	<u>116.8</u> 116.8–119.6	<u>27.45</u> 19.10–46.60	<u>225.8</u> 208.4–221.1	<u>1120</u> 1118–1340
Святое	<u>13.92</u> 5.03–49.43	<u>34.14</u> 26.69–54.25	<u>4.17</u> 3.36–7.84	<u>77.30</u> 72.20–90.20	<u>33.70</u> 22.80–141.5	<u>396.5</u> 362.3–480.4	<u>1747</u> 1094–2500
Средний Перт	<u>1.78</u> 1.78–1.78	<u>18.98</u> 34.62–9.64	<u>7.17</u> 5.15–8.40	<u>132.5</u> 132.5–187.5	<u>25.70</u> 18.70–30.00	<u>350.1</u> 477.1–350.0	<u>1224</u> 1224–1563

*Медиана не попадает в интервал для поверхностного и придонного слоев из-за содержания элементов в срединных слоях воды.

Таблица 5. Классификация вод исследованных озер по трофности [7, 8, 24, 30, 31, 33, 34]

Озеро	Классификация		
	по содержанию общего азота, мкг/л	по содержанию общего фосфора, мкг/л	по прозрачности воды, м
Банное	Олиготрофное	Олиготрофное	Мезотрофное
Биосадское*	Олиготрофное	Олиготрофное	Эвтрофное
Большое Куможье	Мезотрофное	Эвтрофное	Эвтрофное
Варваринское	Эвтрофное	Гиперэвтрофное	Эвтрофное
Лесное	Мезотрофное	Эвтрофное	Эвтрофное
Нижний Перт	Ультраолиготрофное	Олиготрофное	Олиготрофное
Питьевое	Ультраолиготрофное	Олиготрофное	Мезотрофное
Святое	Олиготрофное	Мезотрофное	Мезотрофное
Средний Перт	Олиготрофное	Олиготрофное	Мезотрофное

*По использованным классификациям выделены только три категории (олиго-, мезо- и эвтрофный водоем). Озеро по остальным критериям – дистрофное.

динений азота был в основном отмечен для вод гумифицированных водоемов с высокой цветностью воды. Накопление аммонийной формы азота зафиксировано в озерах Варваринском (до 2700 мкг/л), Лесном и Святом в анаэробных условиях. Это можно объяснить активными процессами минерализации органического вещества и отсутствием окисления аммония в бескислородных слоях. На основе полученных данных была проведена классификация исследуемых водоемов по трофности (табл. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Атмосферные осадки, грунтово-подземные и озерные воды на территории Большого Соловецкого острова отнесены к категории хлоридно-натриевых, что подтверждает значительное влияние морского окружения. При этом по жесткости озерные воды не выходили за границы “мягких”, бóльший вклад в эту величину вносили ионы кальция, что говорит об утрате к настоящему времени непосредствен-

ной взаимосвязи изучаемых озер с Белым морем.

В исследованных проточных водоемах озерно-канальной системы кислород сохранялся до дна; исключение — оз. Святое, где к придонным слоям отмечено его полное исчерпание. Исчезновение кислорода в придонных слоях воды было характерно для водоемов, не связанных каналами. Значительная бескислородная зона зафиксирована для оз. Варваринского. Продукты анаэробных процессов деструкции органического вещества выявлены в водоемах с бескислородными слоями.

За исключением оз. Нижний Перт с почти бесцветной водой, окраска воды в водоемах, отнесенных к категории средне- и темноокрашенных, в связи с заболоченностью острова была обусловлена в большей степени наличием гумусовых кислот, для высокоцветных водоемов дополнительный вклад в этот показатель вносило железо. Несмотря на разную цветность, для всех исследуемых озер характерно низкое и среднее содержание органического вещества.

Все исследуемые водоемы со средней цветностью воды отнесены к мезотрофным, по мере усиления окраски увеличивался и трофический статус вплоть до эвтрофного. Олиготрофное — только оз. Нижний Перт. Исходя из таких показателей, как минерализация, содержание органического вещества и биогенных элементов, оз. Биосадское на момент исследований отнесено к дистрофным водоемам. Варваринское озеро отнесено к гиперэвтрофным. Уровень трофии исследуемых водоемов обусловлен в основном естественным развитием озер и особенностями их водосборов, а не антропогенным воздействием. Для оз. Варваринского статус обусловлен наличием плотностной стратификации, предположительно, из-за наименьшего времени его отделения от моря, а также его морфометрическими особенностями (небольшая площадь зеркала и глубина ~9 м).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 31868-2012. Вода. Методы определения цветности. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.
2. ГОСТ 31957-2012. Вода. Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов. М.: Стандартинформ, 2013. 30 с.
3. ГОСТ Р 59024-2020. Вода. Общие требования к отбору проб. Национальный стандарт Российской Федерации. Дата введения 2022-06-01. М.: Росин-т стандартизации, 2023. 57 с.
4. Грицевская Г.Л., Кябелева Г.К., Николаева Л.А., Семенов В.Н. Гидрология и гидрохимия Соловецких озер // Соловецкие острова. Материалы по комплексному изучению озер. Тр. СевНИОРХ. Т. 6. Петрозаводск: Изд-во Карелия, 1972. С. 5–44.
5. Жинжакова Л.З., Чередник Е.А. Ионный состав поверхностных вод Кабардино-Балкарского государственного заповедника в период летнего интенсивного таяния ледников // Chronos. 2022. Т. 7. № 10 (72). С. 87–91.
6. Загорюлько Н.А. Особенности основного ионного состава поверхностных вод бассейна р. Куды // Вестн. ИрГТУ. 2014. № 2 (85). С. 61–67.
7. Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ, 2007. 395 с.
8. Китаев С.П. Характеристика экологического фона жизни рыб озер Балтийского Кристаллического щита: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск: ПетрГУ, 1970. 28 с.
9. Кокрятская Н.М., Чупаков А.В., Титова К.В., Чупакова А.А., Забелина С.А., Морева О.Ю., Неверова Н.В., Жибарева Т.А. Гидролого-гидрохимические характеристики меромиктического железо-марганцевого пресноводного озера Светлое (Архангельская область) // Журн. Сиб. федерал. ун-та. Сер. биология. 2019. Т. 12. № 2. С. 147–159. DOI: 10.17516/1997-1389-0036
10. Лозовик П.А. Геохимическая классификация поверхностных вод гумидной зоны на основе их кислотноосновного равновесия // Вод. ресурсы. 2013. Т. 40. № 6. С. 583–592. DOI: 10.7868/S0321059613060072
11. Лозовик П.А., Сабылина А.В., Коваленко В.Н. и др. Гидрохимическая характеристика малых озер Карелии // Антропогенные изменения экосистем малых озер (причины, последствия, возможность управления). СПб.: Гидрометеиздат, 1991. Кн. 1. С. 34–37.
12. Лозовик П.А., Шкиперова О.Ф., Зобков М.Б., Платонов А.В. Геохимические особенности поверхностных вод Карелии и их классификация по химическим показателям // Тр. КарНЦ РАН. 2006. № 9. С. 130–143.

13. *Натытник А.А., Никишин Н.А.* Озерно-канальные водохозяйственные системы Соловецких островов – памятники истории и культуры в гидросфере // Изучение памятников истории и культуры в гидросфере. 1990. Вып. 1. С. 124–140.
14. *Никаноров А.М.* Гидрохимия: Учебник. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 444 с.
15. Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 “Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения”. (Рег. Минюст России 13.01.2017 № 45203). М.: Минсельхоз, 2016. 91 с.
16. Природная среда Соловецкого архипелага в условиях меняющегося климата / Под ред. *Ю.Г. Шварцмана, И.Н. Болотова*. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 184 с.
17. РД 52.24.450-2010. Массовая концентрация сероводорода и сульфидов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с N,N-диметил-п-фенилендиамином. Ростов н/Д: Росгидромет, 2010. 50 с.
18. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М.: ВНИРО, 2003. 202 с.
19. *Субетто Д.А., Шевченко В.П., Лудикова А.В., Кузнецов Д.Д., Сапелко Т.В., Лисицын А.П., Евзеров В.Я., Ван Беек П., Суо М., Субетто Г.Д.* Хронология изоляции озер Соловецкого архипелага и скорости современного озерного осадконакопления // ДАН. 2012. Геология. Т. 446. № 2. С. 183–190.
20. *Титова К.В., Жибарева Т.А., Морева О.Ю., Собко Е.И., Слобода А.А., Попов С.С., Прилуцкая Н.С.* Гидрохимические и гидробиологические исследования озер Большого Соловецкого острова // Успехи современного естествознания. 2020. № 11. С. 125–131.
21. *Фортунатов М.А.* Цветность и прозрачность воды Рыбинского водохранилища как показатель его режима // Тр. Ин-та биологии водохранилищ АН СССР. 1959. Вып. 2 (25). С. 246–357.
22. *Хатчинсон Д.* Лимнология: Географические, физические и химические характеристики озер / Пер. с англ. *Г.В. Цыцарина и Г.Г. Шинкар.* М.: Прогресс, 1969. 592 с.
23. *Atabieva F.A., Vishnevetskaya E.V.* Variability of mineralization of the rivers of the central Caucasus // Int. Applied Fundamental. Res. 2022. № 7. P. 13–16. doi:10.17513/mjpf.13406
24. *Carlson R.E.* A Trophic State Index for Lakes // Limnol. Oceanogr. 1977. V. 22. № 2. P. 361–369. doi:10.4319/lo.1977.22.2.0361
25. *Fedorov Y.A., Mikhailenko A.V., Dotsenko I.V.* Sulfide sulfur in water objects with different mineralization // Water Resour. 2019. V. 46. № 2. P. 59–64. doi: 10.1134/S0097807819080086
26. *Ferreira-Pego C., Babio N., Maraver F., Vitoria I., Salas-Salvado J.* Water mineralization and its importance for health // Nutri Salud. 2016. V. 23. № 1. P. 4–18.
27. Global drinking water quality index development and sensitivity analysis report. Ontario: United Nations Environ. Programme, GEMS/Water, 2007. 60 p.
28. *Kondakova O.V., Savkin V.M., Dvurechenskaya S.Y., Marusin K.V.* Water balance and patterns of mineralization of closed lake Chany // Geogr. Natural Resour. 2020. V. 41. № 1. P. 51–58. doi: 10.1134/S1875372820010072
29. *Pavlov V.E., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Khvostov I.V.* Fifty-year variations in water ionic composition in small tributaries of the southern Baikal // Water Resour. 2014. V. 41. № 5. P. 553–555. doi: 10.1134/S009780781405008X
30. *Razumovsky V.L.* Assessment of long-term changes in the trophic status of two reservoirs // IOP Conf. Ser.: earth and environmental science: the VIII all-Russian scientific-practical conference with international participation “Modern problems of reservoirs and their catchments”. Perm, 2021. Article number 012040. doi: 10.1088/1755-1315/834/1/012040
31. *Rivera C.A., Zapata A., Villamil W., Leon-Lipez N.* Trophic assessment of four tropical reservoirs using phytoplankton genera // Acta Limnologica Brasiliensia. 2022. V. 34. e26. <https://doi.org/10.1590/S2179-975X11820>
32. UN Environment Programme. <https://www.unenvironment.org/> (дата обращения: 15.03.2023)
33. *Vidovic M.* Assessment of the Trophic Status by Monitoring of Reservoir’s Water Quality // J. Water Resour. Protection. 2015. № 7. P. 1–13. doi:10.4236/jwarp.2015.71001
34. *Xinyi F., Yihong Y., Lin M., Xiaoying L., Zhehui H., Jiajie L., Liu L., Fushun W.* Coupling effects of hydrological characteristics and nutrient load in sediments on the trophic state of reservoirs // Acta Geochimica. 2021. V. 4. № 4. P. 640–649. doi:10.1007/s11631-021-00478-y

УДК 504.06

ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОПЛАСТИКА В ВОДНОЙ ТОЛЩЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА¹

© 2024 г. Д. А. Тихонова^{a, b, *}, С. Г. Каретников^a, Е. В. Иванова^a, Е. П. Шалунова^b

^a Институт озерадения РАН — обособленное структурное подразделение “Санкт-Петербургский
Федеральный исследовательский центр Российской академии наук”

Санкт-Петербург, 196105 Россия

^b Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199034 Россия

*e-mail: tdasha94@mail.ru

Поступила в редакцию 16.05.2023 г.

После доработки 25.09.2023 г.

Принята к публикации 08.10.2023 г.

Исследовано вертикальное распределение микропластика в Ладожском озере в условиях прямой плотностной стратификации с наличием слоя температурного скачка и при гомотермии. С использованием насосной фильтровальной установки отобраны пробы воды на разных водных горизонтах (0–70 м) в различных гидрологических условиях и проведен сравнительный анализ концентраций частиц микропластика размером 60–5000 мкм. Частицы микропластика анализировались под оптическим микроскопом, а также методом спектроскопии комбинационного рассеяния света. На основе полученных данных сделан вывод о том, что в условиях плотностной стратификации концентрации частиц микропластика в слое скачка и над ним повышены по сравнению с нижележащими слоями (50 ± 40.2 и 15.9 ± 13 частиц/м³ соответственно). В условиях гомотермии вертикальное распределение микропластика в поверхностном слое и водной толще носит более равномерный характер (17.3 ± 17.8 и 12.7 ± 15.6 частиц/м³ соответственно).

Ключевые слова: микропластик, вертикальное распределение микропластика, слой температурного скачка, Ладожское озеро.

DOI: 10.31857/S0321059624020089 **EDN:** CHLEDF

ВВЕДЕНИЕ

Во всем мире активно развиваются исследования в области оценки загрязнения микропластиком различных водных объектов. Однако большинство исследований содержания микропластика в воде сфокусированы на анализе поверхностного слоя воды, в то время как вертикальное распределение частиц в водной толще изучено мало, в связи с чем представляет большой интерес. Необходимость изучения содержания микропластика на разных водных горизонтах обусловлена тем, что со временем на частицах микропластика образуется биопленка из колоний микроорганизмов, что влияет на гидрофобность и плавучесть данных частиц и ведет к их опусканию с поверхности в более глубокие слои [15, 16]. Малоизученными все еще остаются механизмы по-

ведения частиц микропластика в водной толще, а также влияние различных факторов на их распределение на разных водных горизонтах.

В последнее время исследования вертикального распределения микропластика в водной толще проводились преимущественно в морях и океанах [4, 6, 7, 10, 17, 21, 22, 26], реках [9, 12, 18, 19], и совсем мало исследований в данной области приходится на озера [18, 25]. В связи с этим проведение подобных работ на пресноводных объектах представляет особый интерес. В то же время лишь в малом количестве исследований рассматривается распределение микропластика в водной толще с учетом стратификации водных объектов [6, 26]. Также отсутствуют однозначные выводы о том, на каких водных горизонтах концентрируется большее количество частиц микропластика: ряд работ указывает на повышенные содержания микропластика в поверхностном слое водной толщи [21, 22], в то время как другие исследования не обнаруживают подобных закономерностей [9, 26].

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН (тема FFZF-2024-0002 “Современные угрозы водным объектам и инновационные методы их сохранения, восстановления и рационального использования”).

Цель данной работы — изучение содержаний микропластика на разных водных горизонтах Ладожского озера с учетом термических условий. В Ладожском озере наблюдается разнообразие гидрологических условий, связанное с большими размерами озера и значительными глубинами (до 230 м). В определенные сезоны года (преимущественно в весенний и летний периоды) в озере наблюдается так называемый слой температурного скачка или термоклин. Слой температурного скачка является пограничной областью между теплой водой перемешанного слоя и более холодными водами в нижних слоях. Авторы предположили, что в слое скачка могут задерживаться частицы микропластика, так как из-за высокого градиента плотности в данном слое также происходит концентрация осаждающихся органических веществ с верхнего слоя [3]. В настоящей работе впервые проведен анализ концентраций микропластика над слоем скачка и под ним для анализа потенциального влияния данного слоя на вертикальное распределение исследуемых частиц. Полученные данные сравниваются с содержаниями микропластика в водной толще в условиях гомотермии и свободного перемешивания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор проб

Пробы воды отбирались с помощью фильтровальной установки, разработанной в Институте озероведения РАН — СПб ФИЦ РАН [2]. Установка предполагает использование бытового вибрационного электрического насоса малой мощности. К водозаборной части насоса прикрепляется шланг с фильтровальной установкой, которая опускается на требуемую глубину отбора, при этом сам насос находится в поверхностном слое воды. Таким образом, данная установка позволяет отбирать пробы с различных глубин водной толщи.

В установку помещалась металлическая сетка с размером ячеек 60 мкм. Объем профильтрованной воды фиксировался с помощью электронного счетчика и учитывался при расчете концентраций частиц микропластика на 1 м³. После окончания фильтрации установка поднималась

на борт судна, вымывание пробы при подъеме устройства исключалось за счет наличия в конструкции обратного клапана. Фильтр с пробой вынимался из установки и помещался в емкость с дистиллированной водой, места крепления сетки тщательно промывались дистиллированной водой в ту же емкость. До этапа обработки пробы хранились в холодильнике.

Пробы отбирались в 2020–2022 гг. в весенний (июнь) и осенний (октябрь) гидрологические сезоны, когда в озере меньше взвеси, препятствующей фильтрации большого объема воды и, следовательно, способствующей понижению точности измерений. Отобрано 140 проб в 25 точках на различных водных горизонтах: 0, 5, 10, 15, 30, 35, 45, 50, 65, 70 м в зависимости от глубины озера в точке отбора и от вертикального распределения температуры воды. При наличии слоя температурного скачка пробы отбирались в поверхностном слое, на верхней границе слоя скачка или внутри него, а также под ним. При гомотермии пробы отбирались по всему столбу воды на разных горизонтах. Глубины озера в точках отбора были от 15 м (в южной и западной части) до 80–100 м (в северной части). В шхерных районах северной части Ладоги глубины озера в точках отбора были от 10 до 53 м (рис. 1). Объем проб составлял 100–1000 л, в периоды наличия большого количества фитопланктона прокачивалось меньшее количество литров в связи с забиванием фильтра взвесью. При малом объеме пробы в одной точке (до 500 л) пробы отбирались в двух-трех повторностях.

Параллельно с отбором проб воды на микропластик проводились измерения вертикального распределения температуры в водной толще с помощью STD-зонда при различных гидрологических условиях. В весенний гидрологический сезон измерения проводились с учетом наличия слоя температурного скачка. За значимые вертикальные градиенты температуры воды, характеризующие наличие слоя вертикального температурного скачка, были приняты изменения температуры $\geq 0.5^\circ\text{C}/\text{м}$, предложенные в [1]. Слой температурного скачка при проведенных наблюдениях находился на глубинах 5–15 м. В осенний период исследования проводились в условиях свободной плотностной конвекции с отсутствием слоя скачка.

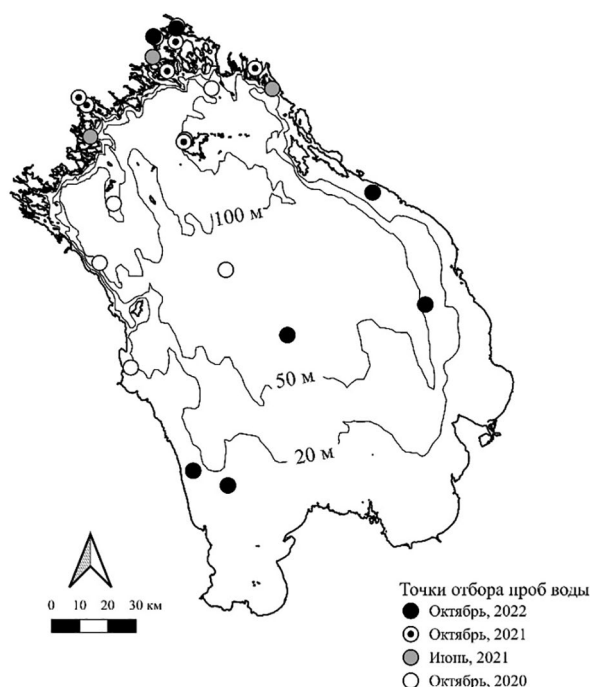


Рис. 1. Картограмма глубин Ладожского озера с точками отбора проб воды.

В условиях наличия слоя температурного скачка была отобрана 31 проба воды, при этом 16 из них были отобраны над данным слоем и 15 под ним. В условиях гомотермии было отобрано 109 проб, из них 45 проб в поверхностном слое и 64 пробы на разных горизонтах водной толщи.

Лабораторная подготовка проб воды

Наличие большого объема взвеси в пробе затрудняет дальнейший анализ. Для растворения органической взвеси образец смывался с сетки в стеклянную колбу, куда добавлялся реактив Фентона (30%-ный раствор перекиси водорода и Fe(II)-катализатор [20]). Далее проба выдерживалась на водяной бане при температуре 75°C в течение 40–60 мин в зависимости от количества органического материала, после чего отстаивалась в течение суток. Далее проба фильтровалась на металлическую сетку с размером ячеек 60 мкм. Полученный осадок смывался дистиллированной водой на чашку Петри, чашка накрывалась металлической сеткой и оставлялась при комнатной температуре до полного испарения жидкости, после чего проба анализировалась под микроскопом. Если проба визуально содержала

небольшое количество органического материала, она сразу смывалась с сетки на чашку Петри для последующего анализа.

Идентификация частиц микропластика

Предварительная идентификация частиц микропластика, а также определение их формы, размера и цвета выполнялись при помощи оптических микроскопов “Euler Professor 770T” с увеличением 40× и 100×. Для непрозрачных фрагментов использовался дополнительный источник отраженного света. Идентификация частиц проводилась по общепринятым критериям: отсутствие клеточной структуры, единообразная толщина и цвет частиц и др. [13]. Частицы идентифицировались в диапазоне 60–5000 мкм, нижняя граница определяемых частиц была обусловлена размером сетки-фильтра. Частицы размером 60–100 мкм анализировались при увеличении 100×, более крупные частицы (>100 мкм) в основном анализировались при увеличении 40×.

После предварительной визуальной идентификации на оптическом микроскопе проводился выборочный анализ химического состава наиболее подходящих по размеру частиц методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (рамановской спектроскопии) в геометрии обратного рассеяния света на спектрометрах “Horiba Jobin-Yvon LabRam HR800” (длины волн лазера, используемые в эксперименте для съемки разных частиц были 325, 488, 514 нм) и “SENTERRA” (Bruker) (длины волн лазера, используемые в эксперименте для съемки разных частиц были 488, 532, 785 нм). Интерпретация проводилась на основании сравнения с имеющимися спектрами в базах данных Horiba JY Raman Library FORENSIC V2, а также OMNIC Spectra 2.03.391 и Spectral ID v. 9.1. Исследования проведены с использованием оборудования ресурсных центров Научного парка СПбГУ “Геомодель” и “Оптические и лазерные методы исследования вещества”.

Контроль внешнего загрязнения

Для предотвращения внешнего загрязнения при отборе и лабораторной обработке проб минимизировалось применение пластиковых предметов и синтетических тканей. Во время работы

с пробами использовались лабораторные халаты и фиксировался цвет одежды. Для подготовки проб для анализа применялась стеклянная посуда и металлические сетки.

На этапе пробоподготовки проводился контроль внешнего загрязнения. Параллельно с основными пробами проводился анализ холостых проб (по одной холостой пробе для ряда проб, отобранных в одной точке). Для холостых проб воды использовалась дистиллированная вода, холостая проба обрабатывалась аналогично основным пробам. При анализе холостой пробы подсчитывались частицы, попадающие в образец в результате побочного загрязнения.

Статистический анализ и визуализация данных

Диаграммы и графики построены в программах Microsoft Excel 2019 и Grapher 7. Для создания карты точек отбора проб использовалась программа QGIS 3.14.15. При статистическом анализе характер распределения данных был проверен при помощи критерия Шапиро–Уилка. При отсутствии нормального распределения данных равенство выборок поверхностный слой – водная толща, а также выборок значений над и под слоем температурного скачка анализировалось при помощи U-критерия Манна–Уитни. Расчеты проводились при помощи веб-сайта Statistics Kingdom [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Контроль внешнего загрязнения

Всего в холостых пробах обнаружено 43 волокна и 2 фрагмента частиц, принятых за микропластик. Данные частицы были красными (32%), прозрачными (26%), синими (24%), черными (16%) и зелеными (2%). Количество обнаруженных в холостых пробах частиц вычиталось из абсолютных значений в каждой пробе. Также в пробах из Ладожского озера обнаружено 47 синих, 17 голубых, 1 белый и 47 зеленых фрагментов, идентифицированных по визуальным характеристикам как краска с научно-исследовательских судов, с которых происходил отбор проб. Данные частицы не учитывались при расчете итоговых концентраций микропластика.

Вертикальное распределение микропластика в водной толще

Во всех пробах воды было обнаружено 697 частиц, предварительно идентифицированных как микропластик. Среди обнаруженных частиц во всей водной толще Ладожского озера значительно преобладали волокна – 618 частиц (89%), также встречались пленки – 62 частицы (9%) и, редко, фрагменты – 17 частиц (2%).

Среднее содержание микропластика в поверхностном слое (0–5 м) составило 26 ± 29.6 , в водной толще – 14 ± 15.1 частиц/м³. U-критерий Манна–Уитни показал существенные различия между концентрациями микропластика в поверхностном слое и водной толще ($p = 0.02302$).

По цвету микроволокна были прозрачными (30%), красными (27%), черными (25%), синими (17%) и зелеными (1%). Среди фрагментов преобладали красные (69%), также встречались серые (19%), белые (6%), и черные (6%). Пленки преимущественно были прозрачные (95%); желтые, синие и красные пленки встречались в единичном экземпляре.

Большая часть анализируемых частиц микропластика имела размер в диапазоне от 60 до 1000 мкм (57%) (рис. 2). Количество частиц увеличивается с уменьшением их размера.

Методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) получены спектры полимеров для 43 частиц микропластика (22 волокна, 11 пленок и 10 фрагментов). Для девяти частиц, принятых по морфологическим характеристикам за краску с корпуса научно-исследовательских судов, двух волокон и одной пленки определены только спектры красителя. Спектры КРС еще десяти волокон и одного фрагмента не удалось расшифровать из-за сильной флуоресценции или отсутствия соответствующих референсных спектров в библиотеке спектрометра.

Наиболее часто встречающиеся типы полимеров – полипропилен (35%) и полиэтилентерефталат/полиэстер (35%). Также встречаются частицы полиамидов (14%), полистирола и сополимеров стирола (9%), полиэтилена (как вы-

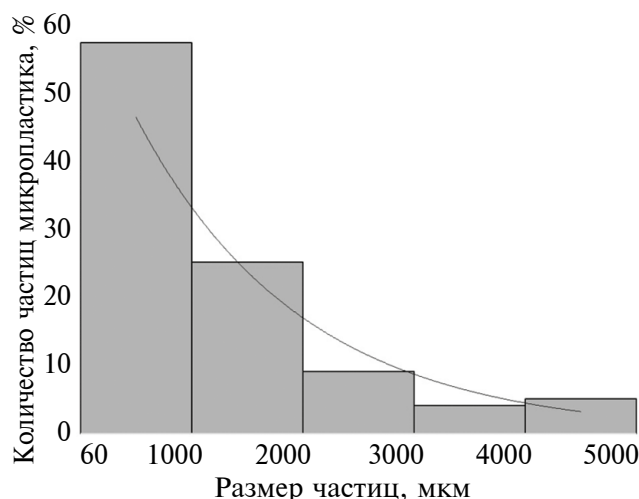


Рис. 2. Диапазон размеров частиц микропластика в водной толще Ладожского озера.

сокой, так и низкой плотности) (5%), полиакрилонитрила (2%).

Среди волокон преобладали полиэтилен-терефталат/полиэстер (55%) и полипропилен (27%), реже встречались сополимеры стирола (14%) и полиакрилонитрил (4%). Для фрагментов распределение полимеров было следующим: полиэтилен-терефталат (30%), полиамид (30%), полиэтилен (20%), полипропилен (10%) и полистирол (10%). Среди пленок преобладал полипропилен (73%), остальная часть (27%) — полиамид.

У частиц с большой долей вероятности — краски от научно-исследовательских судов в полученных спектрах КРС отмечались пики, позволяющие говорить о наличии диоксида титана, фталоцианиновых синих и зеленых пигментов, используемых в красках. Для одной пленки также был идентифицирован только спектр пигмента (медь фталоцианиновый синий пигмент “Heliogen blue 7087”). Для двух волокон удалось определить только спектр красителя данного волокна (пигмент “Reactive black 5” и пигмент “Orange” марки “Dominion Color Corporation”). Совпадение по большинству пиков может говорить о присутствии в волокнах близкого по составу пигмента той же группы/класса, который, возможно, отличается наличием/отсутствием ряда заместителей.

Фрагменты полиэтилена, полипропилена и полиамида обнаружены на разных глубинах, в том числе на глубине 70 м. Волокна полиэтилен-терефталата встречались и в поверхностном слое, однако больше волокон данного типа обнаружено в водной толще.

Вертикальное распределение микропластика в водной толще в условиях прямой плотностной стратификации и гомотермии

Среднее содержание микропластика над слоем скачка составило 50 ± 40.2 , под слоем скачка — 15.9 ± 13 частиц/м³ (рис. 3). U-критерий Манна–Уитни подтвердил значимое различие между содержаниями микропластика над и в слое температурного скачка и содержаниями данных частиц под термоклином ($p = 0.004$).

При гомотермии среднее содержание частиц микропластика — 17.3 ± 17.8 частиц/м³ в поверхностном слое (0–5 м) и 12.7 ± 15.6 частиц/м³ в водной толще (рис. 4). U-критерий Манна–Уитни подтвердил отсутствие значимых различий между выборками содержаний микропластика в верхнем слое и в водной толще ($p = 0.13$).

Таким образом, результаты исследования показали, что повышенные содержания микропластика в поверхностном слое наблюдаются только при условиях плотностной стратификации, в то время как при гомотермии вертикальное распределение частиц носит более равномерный характер.

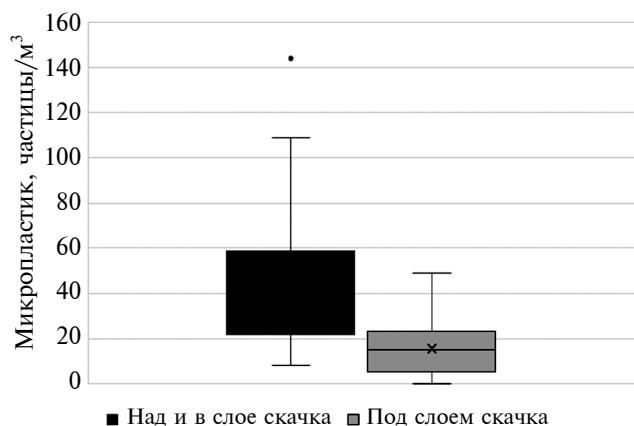


Рис. 3. Распределение частиц микропластика в водной толще при наличии слоя температурного скачка.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На вертикальное распределение частиц микропластика существенное влияние оказывает вертикальный водообмен. Вертикальные движения воды в водоеме обусловлены разницей температуры разных слоев и, как следствие, разницей в плотностной структуре воды. Для каждого гидрологического сезона характерно определенное вертикальное распределение температуры воды. Для весеннего и осеннего гидрологических сезонов характерна гомотермия, а для летнего и зимнего — плотностная стратификация.

Условия отбора проб влияют на характер распределения микропластика в водной толще. В периоды весенней и осенней гомотермии происходит интенсивное перемешивание воды (свободная конвекция), в связи с чем гидрологические факторы не должны оказывать влияния на дифференциацию распределения частиц микропластика. При исследовании Ладожского озера пробы в основном отбирались при данных условиях, для которых также характерно минимальное количество минеральной и органической взвеси в воде, что позволяет прокачать через фильтровальную установку как можно больший объем воды. При данных условиях (при отсутствии слоя температурного скачка) частицы микропластика распределялись относительно равномерно как в поверхностном слое, так и в толще воды. В пробах,

которые были отобраны в условиях формирования слоя вертикального температурного скачка, наибольшее количество микропластика было зафиксировано в данном слое и в поверхностном слое. По результатам некоторых исследований вертикального распределения микропластика в водной толще [21–22], содержание частиц на поверхности оказалось значительно выше, чем в водной толще. По данным [9, 26], распределение микропластика неоднородно. Лишь некоторые исследования вертикального распределения микропластика учитывали разницы температуры и плотности водных горизонтов. Так, в Балтийском море содержание микропластика было выше в приповерхностном и придонном слоях, а также в слоях скачка температуры и солености [26]. В Тихом океане микропластик концентрировался под перемешанным слоем [6]. В исследовании оз. Толлензе корреляция между температурой и содержанием микропластика не обнаружена [25]. Указанные различия могут быть объяснены вариациями гидрологических условий и характеристик водных объектов, а также влиянием неучтенных факторов.

Зафиксировано, что в Ладожском озере содержание микропластика в поверхностном слое выше, чем в водной толще, однако с учетом гидрологических условий это подтверждается только для данных, полученных при наличии слоя температурного скачка. Таким образом, повышенное содержание микропластика в поверхностном слое может быть обусловлено именно наличием термоклина в сезон отбора проб. Необходимы дальнейшие исследования вертикального распределения микропластика в водной толще также в летний и зимний гидрологические сезоны, что позволит лучше понять влияние ветровой конвекции, а также плотностной стратификации на перемещение микропластика в водной толще. Однако работы в эти сезоны сопряжены с определенными трудностями в связи с быстрым забиванием сетки органической и минеральной взвесью летом и отсутствием в Ладожском озере постоянного ледового покрова зимой.

На скорость оседания частиц микропластика в толщу воды может также влиять их плотность, форма и размер [11]. Так, при исследовании

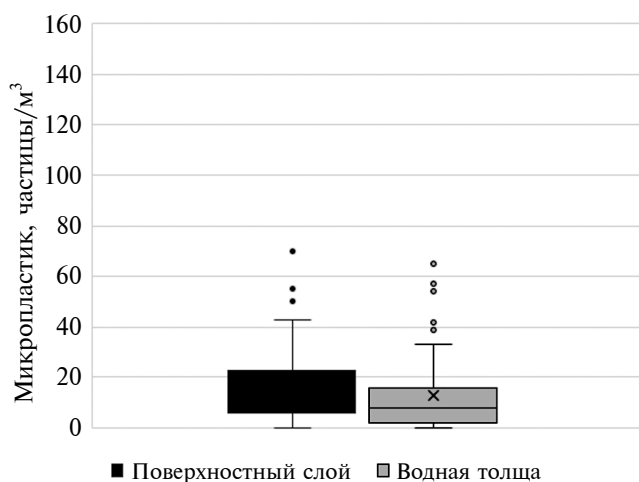


Рис. 4. Распределение частиц микропластика в водной толще при гомотермии.

оз. Толлензе в Германии большее содержание фрагментов было отмечено в поверхностном слое, в то время как волокна распределялись в водной толще относительно равномерно [25]. В оз. Мичиган и р. Милуоки волокна также распределялись в водной толще независимо от их плотности [18]. По результатам исследования, в Ладожском озере во всей водной толще преобладают волокна, а фрагменты встречаются реже и на разных водных горизонтах. Фрагменты, идентифицированные как хлопья краски с научного судна, также встречаются на разных глубинах, несмотря на то что часто краска и фрагменты конструкционного материала от лодок и кораблей являются отрицательно плавучими видами пластика, такими как алкиды и полиакрилаты [8]. Несмотря на их высокую плотность, они в большом количестве встречаются и в поверхностном слое, где поверхностное натяжение обеспечивает их плавучесть [23]. В данном исследовании не обнаружено закономерностей в плотностном распределении частиц микропластика в водной толще. В дальнейших работах по изучению вертикального распределения микропластика в водной толще целесообразно провести оценку зависимостей содержания частиц микропластика на разных глубинах от их плотности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При растущем интересе к исследованию микропластика в водных объектах остаются малоизученными механизмы вертикального распределения частиц в водной толще. Формирование выводов о загрязнении водных объектов микропластиком только на основании информации о содержании данных частиц в поверхностном слое воды может приводить к пере- или недоучету общего содержания микропластика в водном объекте.

Использование насосной фильтровальной установки дает возможность отбирать пробы воды для определения концентраций микропластика на различных водных горизонтах. Учет вертикальной термической стратификации озера при оценке концентраций микропластика на разных горизонтах позволил исследовать вертикальное распределение частиц микропластика

в Ладожском озере. Впервые обнаружено, что в Ладожском озере распределение микропластика в водной толще зависит от плотностной структуры воды. При наличии слоя температурного скачка микропластик концентрируется в этом слое и над ним, в отличие от нижележащих слоев. В условиях гомотермии и свободной конвекции распределение микропластика в водной толще носит равномерный характер. Таким образом, авторами сделан предварительный вывод о влиянии слоя температурного скачка на характер вертикального распределения частиц, однако для подтверждения данной теории необходимы дополнительные исследования в летний и зимний гидрологические сезоны в условиях устойчивой плотностной стратификации озера. Особое внимание следует также уделить определению плотности частиц микропластика, зафиксированных на разных глубинах, для определения влияния характеристик частиц на их вертикальное распределение в озере.

Авторы выражают благодарность ресурсным центрам Научного парка СПбГУ “Геомодель” и “Оптические и лазерные методы исследования вещества” за выполнение работ на их оборудовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Науменко М.А., Гузиватый В.В. Методические подходы и результаты анализа климатического сезонного хода параметров устойчивой стратификации димиктического озера (на примере центральной части Ладожского озера) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 1. С. 52–62.
2. Поздняков Ш.Р., Каретников С.Г., Иванова Е.В., Тихонова Д.А., Лапенков А.Е., Гузева А.В. Опыт использования фильтрационной установки для изучения вертикального распределения микропластика в водной толще // Рос. журн. приклад. экологии. 2021. № 4 (28). С. 41–45.
3. Садчиков А.П., Остроумов С.А. Эпилимнион, металимнион и гипolimнион мезотрофной водной экосистемы: функциональная роль вертикальной структуры экосистемы водоема по гидрохимическим и биологическим параметрам // Экол. химия. 2019. Т. 28. № 6. С. 291–296.
4. Bagaev A., Mizyuk A., Khatmullina L., Isachenko I., Chubarenko I. Anthropogenic fibres in the Baltic Sea

- water column: Field data, laboratory and numerical testing of their motion // *Sci. Total Environ.* 2017. V. 599–600. P. 560–571. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.185
5. Burns E.E., Boxall A.B.A. Microplastics in the aquatic environment: Evidence for or against adverse impacts and major knowledge gaps // *Environ. Toxicol. Chem.* 2018. V. 37. № 11. P. 2776–2796.
 6. Choy C.A., Robison B.H., Gagne T.O., Erwin B., Firl E., Halden R.U., Hamilton J.A., Katija K., Lisin S.E., Rolsky Ch., Van Houtan K.S. The vertical distribution and biological transport of marine microplastics across the epipelagic and mesopelagic water column // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. 7843.
 7. Dai Z., Zhang H., Zhou Q., Tian Y., Chen T., Tu C., Fu C., Luo Y. Occurrence of microplastics in the water column and sediment in an inland sea affected by intensive anthropogenic activities // *Environ. Pollution.* 2018. V. 242. P. 1557–1565.
 8. Fuente de la R., Dróto G., Hernández-García E., López C., van Sebille E. Sinking microplastics in the water column: simulations in the Mediterranean Sea // *Ocean Sci.* 2021. V. 17. P. 431–453.
 9. Dris R., Gasperi J., Rocher V., Tassin B. Synthetic and non-synthetic anthropogenic fibers in a river under the impact of Paris Megacity: sampling methodological aspects and flux estimations // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 618. P. 157–164.
 10. Egger M., Sulu-Gambari F., Lebreton L. First evidence of plastic fallout from the north pacific garbage patch // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. 7495.
 11. Enders K., Lenz R., Stedmon C.A., Nielsen T.G. Abundance, size and polymer composition of marine microplastics ≥ 10 mm in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution // *Marine Pollution Bull.* 2015. V. 100. № 1. P. 70–81.
 12. Eo S., Hong S.H., Song Y.K., Han G.M., Shim W.J. Spatiotemporal distribution and annual load of microplastics in the Nakdong River, South Korea // *Water Resear.* 2019. V. 160. P. 228–237.
 13. Guide to Microplastic Identification // Marine & Environmental Research Institute. 2015. 13 p.
 14. Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R.C., Thiel M. Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification // *Environ. Sci. Technol.* 2012. V. 46. № 6. P. 3060–3075.
 15. Kaiser D., Kowalski N., Waniek J.J. Effects of biofouling on the sinking behavior of microplastics // *Environ. Res. Lett.* 2017. V. 12. № 12. 124003.
 16. Kooi M., Nes van E.H.V., Scheffer M., Koelmans A.A. Ups and Downs in the Ocean: Effects of Biofouling on Vertical Transport of Microplastics // *Environ. Sci. Technol.* 2017. V. 51. № 14. P. 7963–7971.
 17. Kooi M., Reisser J., Slat B., Ferrari F.F., Schmid M.S., Cunsolo S., Brambini R., Noble K., Sirks L.-A., Linders T.E.W., Schoeneich-Argent R.I., Koelmans A.A. The effect of particle properties on the depth profile of buoyant plastics in the ocean // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. 33882.
 18. Lenaker P.L., Baldwin A.K., Corsi S.R., Mason S.A., Renneau P.C., Scott J.W. Vertical distribution of microplastics in the water column and surficial sediment from the Milwaukee River basin to Lake Michigan // *Environ. Sci. Technol.* 2019. V. 53. P. 12227–12237.
 19. Liedermann M., Gmeiner P., Pessenlehner S., Haimann M., Hohenblum P., Habersack H. A methodology for measuring microplastic transport in large or medium rivers // *Water.* 2018. V. 10. № 4. 414.
 20. Masura J., Baker J., Foster G., Arthur C. Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment: Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48 // NOAA Marine Debris Program. 2015. 31 p.
 21. Reisser J., Slat B., Noble K., du Plessis K., Epp M., Proietti M., Sonnevile de J., Becker T., Pattiaratchi C. The vertical distribution of buoyant plastics at sea: an observational study in the North Atlantic Gyre // *Biogeosci.* 2015. V. 12. № 4. 1249.
 22. Song Y.K., Hong S.H., Eo S., Jang M., Han G.M., Isobe A., Shim W.J. Horizontal and vertical distribution of microplastics in Korean coastal waters // *Environ. Sci. Technol.* 2018. V. 52. P. 12188–12197.
 23. Song Y.K., Hong S.H., Jang M., Kang J.-H., Kwon O.Y., Han G.M., Shim W.J. Large Accumulation of Micro-sized Synthetic Polymer Particles in the Sea Surface Microlayer // *Environ. Sci. Technol.* 2014. V. 48. № 16. P. 9014–9021.
 24. Statistics Kingdom. 2017. [Электронный ресурс]. <https://www.statskingdom.com/index.html> (дата обращения: 23.05.2023)
 25. Tamminga M., Fischer E.K. Microplastics in a deep, dimictic lake of the North German Plain with special regard to vertical distribution patterns // *Environ. Pollution.* 2020. V. 267. 115507.
 26. Zobkov M.B., Esiukova E.E., Zyubinc A.Y., Samusev I.G. Microplastic content variation in water column: The observations employing a novel sampling tool in stratified Baltic Sea // *Marine Pollution Bull.* 2019. V. 138. P. 193–205.