

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОДЫ КИЖСКИХ ШХЕР ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА И ТЕНДЕНЦИИ ЕГО ИЗМЕНЕНИЯ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 30 ЛЕТ

М. В. Зобкова* 

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»,
Петрозаводск, Российская Федерация

* **Контакт:** Мария Валентиновна Зобкова, rincalika21@yandex.ru

Аннотация: Представлены результаты оценки современного состояния Кижских шхер Онежского озера по химическим показателям воды в сравнении с фоновым участком открытого плёса озера. Рассмотрен ионный состав воды, содержание биогенных и литофильных элементов, органических и загрязняющих веществ, газовый состав. Выявлено, что вода Кижских шхер является слабоминерализованной, мезотрофной, с низким содержанием органических веществ. В воде этого района выявлено систематическое превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) по содержанию нефтепродуктов (1,2–4,0 раза), что, по всей видимости, связано с интенсивным судоходством в данном районе озера. Отмечены случаи превышения ПДК по содержанию железа общего (1,1–3,6 раз) и меди (1,1–5,8 раз), которые связаны с региональной спецификой вод гумидной зоны, а не с антропогенным влиянием. В настоящее время качество воды в этом районе озера является хорошим. На основе архивных данных была проведена оценка изменения химического состава воды в районе Кижских шхер за последние 30 лет. В результате были установлены статистически значимые изменения ионного состава как на фоновой станции, так и в шхерном районе, снижение содержания всех форм азота и значений соотношения $N_{\text{мин}}/P_{\text{общ}}$, в то же время выявлен рост цветности и концентрации CO_2 и нефтепродуктов. Положительная динамика в содержании нефтепродуктов в районе Кижских шхер вызвана интенсивной нагрузкой от водного транспорта в связи с увеличивающимся туристическим потоком. Выявленные тренды изменения других химических показателей не связаны с локальным антропогенным влиянием и требуют дальнейшего изучения. Вероятно, они объясняются глобальными процессами, такими как снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и изменение климата.

Ключевые слова: химический состав воды, ионный состав, органическое вещество, биогенные элементы, загрязняющие вещества, климатические изменения, антропогенная нагрузка, Онежское озеро

Цитирование: Зобкова М. В. Химический состав воды Кижских шхер Онежского озера и тенденции его изменения за последние 30 лет // Russian Journal of Earth Sciences. — 2026. — Т. 26. — ES1017. — DOI: 10.2205/2026es001059 — EDN: RYALAF

Введение

Кижский архипелаг расположен в северной части Онежского озера и состоит из множества небольших островов, самым известным из которых является о. Кижы. На нем находится Государственный историко-архитектурный музей «Кижы», основанный в 1966 году. Этот северный район Онежского озера характеризуется изрезанной береговой линией, небольшими глубинами и замедленным водообменом [Rossi et al., 2021]. Он относительно изолирован от глубоководной части озера [Онежское озеро. . ., 2010] и характеризуется неустойчивой циркуляцией водных масс, обусловленных системой ветровых течений [Мартьянов и Иешко, 2013]. В то же время близость Кижских шхер к центральному плёсу озера и отсутствие речного стока обуславливают схожесть химического состава воды этих районов Онежского озера [Соловьева и др., 1973; Galakhina

<https://elibrary.ru/RYALAF>

Получено: 28 марта 2025 г.

Принято: 8 сентября 2025 г.

Опубликовано: 21 апреля 2026 г.



© 2026. Коллектив авторов.

et al., 2022]. В 1990 г. архитектурный ансамбль Кижского погоста был включён в Список объектов всемирного культурного наследия ЮНЕСКО, что привело к постепенному росту туристического потока. По сей день Кижские шхеры остаются одним из самых популярных туристических направлений в Карелии. Так, в 2010–2019 гг. музей под открытым небом ежегодно посещали 142–194 тыс. человек [Rossi *et al.*, 2021], в последние годы их численность ещё возросла [Отчет о деятельности. . ., 2023]. В связи с этим территория этого района Онежского озера испытывает многолетнюю антропогенную нагрузку, связанную с хозяйственной деятельностью музея, а также влиянием водного транспорта.

До 1990х годов гидрохимические исследования в Кижских шхерах проводились крайне редко. В 1966–1967 гг. в рамках комплексной экспедиции Института озераведения РАН было установлено, что содержание главных ионов, значения цветности и рН воды Кижского архипелага было близко к таковым в центральном плёсе озера. В то же время концентрация нитратов была ниже (0,03–0,09 мг/л), чем в центре озера (0,10–0,22 мг/л) [Соловьёва и др., 1973], что является закономерным для больших стратифицированных озёр [Dove and Chapra, 2015; Khodzher *et al.*, 2018]. С 1994 г. Институтом водных проблем Севера начал осуществляться ежегодный мониторинг качества воды Кижских шхер, который продлился до 2012 г. В рамках этих исследований в основном велось определение биогенных элементов, взвешенных веществ, перманганатной окисляемости (ПО), цветности и нефтепродуктов. Анализ многолетней динамики содержания общего фосфора ($P_{\text{общ}}$) и значений ПО показал их межгодовое изменение [Galakhina *et al.*, 2022], что, по-видимому, связано с гидродинамическими особенностями циркуляции водных масс в этом районе озера [Мартьянов и Иешко, 2013]. Также в разные годы отмечались превышения ПДК в 1,6–3,6 раз по содержанию нефтепродуктов в воде [Иешко и Мартьянов, 2007; Мартьянов и Иешко, 2010, 2013]. Таким образом, многолетняя антропогенная нагрузка могла оказать влияние на современный химический состав воды в районе Кижских шхер.

С другой стороны, изменение химического состава воды озёр за многолетний период может быть обусловлено не только локальными, но и глобальными процессами. Так, в настоящее время изменение климата является одной из важнейших мировых проблем. Во многих северных умеренных и бореальных регионах из-за потепления увеличилось поступление гумусовых веществ с водосборной территории, что подтверждается ростом содержания органического углерода ($C_{\text{орг}}$), железа общего ($Fe_{\text{общ}}$) и цветности в воде рек и озёр [Clark *et al.*, 2010; Kankaala *et al.*, 2019; Weyhenmeyer *et al.*, 2014]. В воде Петрозаводской губы Онежского озера также фиксировалось увеличение значений цветности, концентрации $Fe_{\text{общ}}$ и CO_2 [Kalinkina *et al.*, 2020]. Ещё одной важной проблемой прошлого века являлось закисление поверхностных вод, которое было связано с техногенными выбросами серы и азота в атмосферу [Moiseenko *et al.*, 2022; Vogt *et al.*, 2024; Wit *et al.*, 2023]. После принятия соответствующих мер по снижению выбросов загрязняющих веществ [Stoddard *et al.*, 1999; Wit *et al.*, 2023] содержание SO_4^{2-} и NO_3^- в атмосферных осадках снизилось в северных промышленных странах [Mazoyer and Houle, 2025]. Это привело к постепенному процессу восстановления поверхностных вод, который все ещё продолжается [Mazoyer and Houle, 2025; Moiseenko *et al.*, 2022]. В результате во многих реках и озёрах Европы и Северной Америки произошли изменения ионного состава воды [Mazoyer and Houle, 2025; Vogt *et al.*, 2024; Wit *et al.*, 2023].

Учитывая спорадический характер предшествующих измерений в районе Кижских шхер Онежского озера, их высокую историко-культурную ценность, а также существенные изменения в антропогенном влиянии на этот район озера, целью данной работы является оценка современного химического состава воды Кижских шхер Онежского озера и тенденции его изменения за последние три десятилетия. При этом к важнейшим задачам исследования относится установление причин этих изменений, будь то многолетняя антропогенная нагрузка, связанная с хозяйственной деятельностью музея-заповедника «Кижы» или климатические изменения, вызванные глобальным потеплением, или снижение выброса загрязняющих веществ в атмосферу.

Материалы и методы

Кижский архипелаг расположен в северной части Онежского озера – второго по площади водного зеркала водоёма Европы. Площадь водосбора озера составляет 53 100 км², зеркала – 9720 км², средняя глубина озера 31 м, а наибольшая – 120 м. Озеро относится к большим стратифицированным водоёмам, его удельный водосбор составляет 5,5, а условный водообмен – 16 год⁻¹ (Озера Карелии, 2013).

Гидрохимические исследования в Кижских шхерах Онежского озера проводились в период открытой воды (весна, лето, осень) 2023–2024 гг. на 9 станциях шхерного района и одной фоновой (С2) в открытой части Онежского озера (табл. 1, рис. 1). Станции Z1, Z2, Z3, Z4 являются постоянными, на них ведётся многолетний мониторинг, что позволяет накапливать большой массив данных по различным гидрохимическим показателям. Выбор других станций обусловлен близостью к возможным источникам антропогенного загрязнения. Так, станция Z(OT) расположена между о. Кижы и материком, куда подходит ближайшая к острову дорога, вследствие чего в этом районе отмечается интенсивное судоходство с целью транспортировки людей и грузов. Станция ZW3 находится недалеко от точки сброса сточных вод из локальных очистных сооружений (ЛОС) Биотал-3 со стороны восточного берега о. Кижы (о. Гоголев), ZW4 – ЛОС УСВ-10 со стороны западного берега острова рядом с грузовым причалом, а ZW5 – ЛОС Биоклер-10 и Лабко в заливе со стороны северной части о. Кижы.

Таблица 1. Станции отбора проб в 2023–2024 гг. и их характеристика

Станция	Описание	Год	Количество проб	Координаты	Глубина, м
C2	Центральная часть Онежского озера (фоновая станция)	2023–2024	10	N 61°49'42,49' E 35°05'38,15'	100,0
Z1	о. Кижы, напротив д. Подъельники	2023–2024	6	N 62°06'14,40'' E 35°11'08,82''	6,0
Z2	о. Кижы, напротив главного пассажирского причала музея-заповедника «Кижы»	2023–2024	6	N 62°04'31,20' E 35°12'54,54'	6,0
Z3	В 2.8 км к СВ от о. Кижы на северном выходе судового пути из Кижских шхер	2023–2024	12	N 62°06'00,00'' E 35°15'00,00''	10,0
Z4	рядом с о. Гриз, на судовом пути к о. Кижы	2023–2024	7	N 62°01'30,38' E 35°12'59,31'	7,5
Z5	о. Кижы, в 0,5 км от пожарной части	2023–2024	12	N 62°04'49,98'' E 35°14'17,88''	8,5
Z(OT)	Рядом с домом Росгвардии, недалеко от кратчайшего водного пути от берега (Оятевщина) до о. Кижы	2023–2024	6	N 62°05'05,40' E 35°11'57,36'	5,0
Z(SN)	Д. Сенная Губа	2023	3	N 62°00'08,54'' E 35°13'27,44''	7,0
ZW	Восточный берег о. Кижы (о. Гоголев)	2023	2	N 62°04'20,40' E 35°13'54,00'	2,3
ZW2	Восточный берег о. Кижы (причал)	2023	2	N 62°04'04,50'' E 35°13'32,94''	2,7
ZW3	Восточный берег о. Кижы (о. Гоголев) у места сброса сточных вод из ЛОС Биотал-3 (3)	2024	3	N 62°04'24,24' E 35°13'54,12'	2,0
ZW4	Западный берег о. Кижы (грузовой причал) у места сброса сточных вод из ЛОС УСВ-10 (1)	2024	3	N 62°05'27,96'' E 35°11'47,76''	2,0
ZW5	Залив в северной части о. Кижы у места сброса сточных вод из ЛОС Биоклер-10 и Лабко (2)	2024	3	N 62°05'33,00' E 35°12'15,48'	1,8

Отбор проб осуществлялся с использованием НИС «Посейдон», на мелководных станциях – с борта маломерного судна. Поскольку район Кижских шхер характеризуется небольшими глубинами, то отбор проб воды с поверхностного и придонного горизонтов проводился только на станциях, где глубина превышала 8 м (С2, Z3, Z5), на остальных – только с поверхностного горизонта. Пробы воды отбирались батометром Рутнера. На каждой станции датчиком CastAway-CTD велось измерение температуры воды.

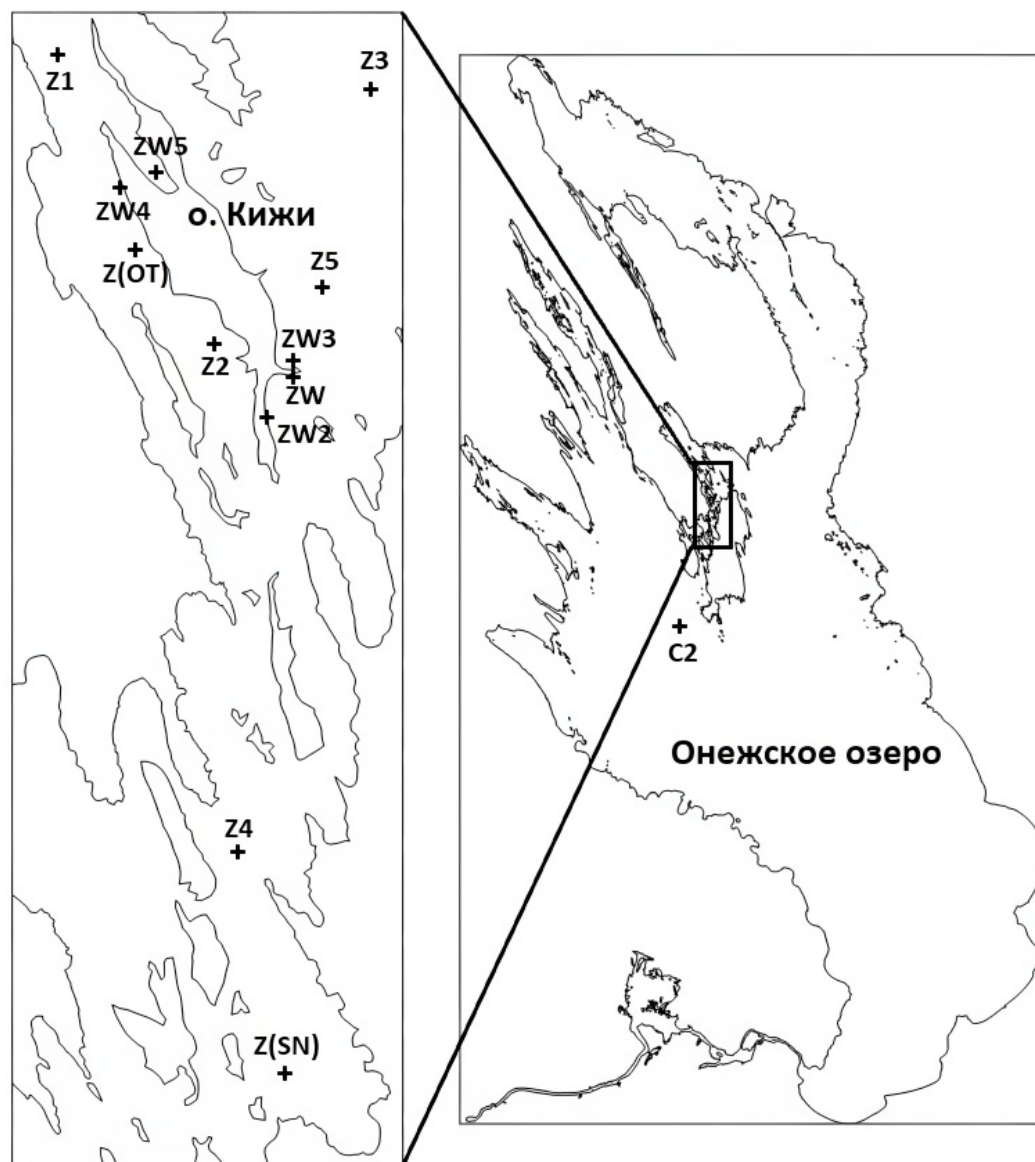


Рис. 1. Карта-схема отбора проб воды в районе Кижских шхер Онежского озера в период открытой воды 2023–2024 гг.

В пробах воды велось определение компонентов ионного состава – Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- ; содержания органического вещества – $\text{C}_{\text{орг}}$, химическое потребление кислорода (ХПК), ПО, цветность (ЦВ), биохимическое потребление кислорода за 5 суток (БПК_5); биогенных элементов – $\text{P}_{\text{общ}}$, минерального фосфора ($\text{P}_{\text{мин}}$), азота общего ($\text{N}_{\text{общ}}$), органического ($\text{N}_{\text{орг}}$), его минеральных форм ($\text{N}_{\text{мин}}$): NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- ; литофильных элементов – $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Mn , Si ; газового состава – CO_2 , O_2 ; загрязняющих веществ – тяжёлых металлов (Zn , Cu , Ni , Pb , Cd , Cr), нефтепродуктов, синтетических поверхностно-активных веществ (СПАВ), а также взвешенного вещества, величин электропроводности и pH воды. Анализ химического состава воды осуществ-

ляли по стандартным методикам [Аналитические, кинетические. . ., 2017]. Определение гумусовых веществ в составе органического вещества осуществлялось на станциях С2 и З3. Для этого разделяли органическое вещество на автохтонную и аллохтонную составляющие сорбцией на диэтиламиноэтилцеллюлозе согласно методике [Лозовик и Мусатова, 2013], а затем из аллохтонного органического вещества выделяли гумусовые вещества согласно методике [Standard Methods. . ., 1998]. Обработку данных химического состава воды осуществляли с помощью программы «Обработка гидрохимической информации и оценка состояния водных объектов (АИС «ОГХИ»)» [Зобков, 2010], что позволяло проводить геохимическую классификацию вод по щёлочности, гумусности и уровню трофии [Лозовик, 2013]. Карты распределения различных химических показателей в районе о. Кизи создавали в программе Surfer 11, интерполяцию данных проводили методом кригинга.

Для оценки изменения содержания химических показателей в воде Кижских шхер и фоновой станции С2 Онежского озера за многолетний период была использована база данных лаборатории гидрохимии и гидрогеологии Института водных проблем Севера КарНЦ РАН, которая содержит 271 запись о химическом составе воды этих районов озера за 1994–2021 гг. В состав базы данных входит информация о ионном составе воды (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-), содержании органических веществ ($\text{C}_{\text{орг}}$, ХПК, ПО, цветность, БПК₅), биогенных ($\text{P}_{\text{общ}}$, $\text{P}_{\text{мин}}$, $\text{N}_{\text{общ}}$, $\text{N}_{\text{орг}}$, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-) и литофильных элементов ($\text{Fe}_{\text{общ}}$, Mn, Si), газового состава (CO_2 , O_2), нефтепродуктов, взвешенного вещества, величинах электропроводности и pH воды.

Выявление различий в содержании химических показателей между отдельными станциями Кижских шхер осуществляли с помощью дисперсионного анализа (независимый тест ANOVA). Для выявления различий между значениями химических показателей в Кижских шхерах и фоновой станции С2 применяли независимый t-test. Наличие трендов в изменении химических показателей за тридцатилетний период выявляли с использованием параметрического теста Пирсона. При этом использовался массив, включающий архивные и новые данные для реперных станций района Кижских шхер (Z1, Z2, Z3, Z4) и на фоновой станции С2. Все статистические тесты проводились с пороговым критерием статистической значимости (p) равным 0,01. Перед проведением параметрических тестов все данные проверялись на нормальность. Поскольку большинство химических и физико-химических показателей поверхностных вод Карелии имеют лог-нормальное распределение [Лозовик, 2006], в случае необходимости проводилось математическое преобразование данных путём их логарифмирования и проверка полученных частотных распределений на нормальность. Для статистической обработки данных использовалось свободно распространяемое ПО SOFA statistics 1.4.6 (<http://www.sofastatistics.com>).

Результаты и их обсуждение

Современное качество воды в районе Кижских шхер Онежского озера

По большинству рассмотренных химических показателей не было выявлено статистически значимой разницы между станциями, расположенными в Кижских шхерах Онежского озера (ANOVA, $p > 0,01$). Поэтому при описании гидрохимической обстановки в исследуемом районе приводятся средние значения для всех станций. Значимые отличия наблюдались только для станции Z(SN) по содержанию $\text{N}_{\text{общ}}$ ($p = 3,431 \times 10^{-3}$; $F = 3,018$), которое в среднем составляло 0,36 мгN/л, в то время как на других станциях оно было ниже (в среднем 0,28 мгN/л), а также для станции Z2 (главный пассажирский причал) по содержанию железа общего ($p = 1,565 \times 10^{-3}$; $F = 3,326$), которое здесь в среднем составляло 0,20 мг/л, в то время как на других станциях Кижских шхер – 0,12 мг/л. Вероятнее всего, это объясняется повышенным содержанием $\text{Fe}_{\text{общ}}$ во взвеси донных отложений, которые постоянно взмучиваются в результате активного судоходства в этой точке отбора проб.

Ионный состав. Согласно многолетним исследованиям вода в Онежском озере является слабо минерализованной [*Онежское озеро. . .*, 2010]. В 2023–2024 гг. в центральном плёсе (станция С2) сумма ионов составляла в среднем 36,4 мг/л, а ионный состав, выраженный в %-экв., был следующим:

$$\frac{\text{Ca}^{2+}(49)\text{Mg}^{2+}(31)\text{Na}^{+}(17)\text{K}^{+}(2,9)}{\text{HCO}_3^{-}(69)\text{SO}_4^{2-}(13)\text{Cl}^{-}(8,4)\text{A}_{\text{орг}}(8,0)\text{NO}_3^{-}(2,2)},$$

где $\text{A}_{\text{орг}}^{-}$ – содержание анионов органических кислот. В Кижских шхерах сумма ионов была близкой к фоновой станции и составляла в среднем 37,4 мг/л. Однако стоит отметить, что по содержанию HCO_3^{-} выявлена статистически значимая разница между шхерной частью и фоновой станцией (t-test: $p = 4,561 \times 10^{-3}$; $t = 3,01$; $df = 39$): в шхерах их концентрация была немного выше, чем в центре озера. Ионный состав шхерного района описывается следующей формулой:

$$\frac{\text{Ca}^{2+}(49)\text{Mg}^{2+}(32)\text{Na}^{+}(16)\text{K}^{+}(2,9)}{\text{HCO}_3^{-}(73)\text{SO}_4^{2-}(13)\text{Cl}^{-}(8,4)\text{A}_{\text{орг}}(5,5)}.$$

Согласно классификации Алёкина воды, как на фоновой станции, так и в Кижских шхерах относились к гидрокарбонатному классу, группе Са, по щёлочности и рН [*Лозовик, 2013*] они характеризовались как среднешёлочностные нейтральные слабощелочные. Электропроводность в центральном плёсе озера и Кижских шхерах была практически идентичной и составляла в среднем 55,7 и 55,0 мкСм/см соответственно.

Газовый состав и взвешенное вещество. Содержание O_2 в центральном плёсе Онежского озера было немного выше, чем в Кижских шхерах (t-test: $p = 2,016 \times 10^{-5}$; $t = -4,849$; $df = 39$; табл. 2). Однако эти различия незначительны и связаны с различным прогревом водных масс в мелководных шхерах и глубоководной станции С2. Процентное насыщение кислородом было высоким и составляло в среднем в центральной части озера 87%, а в Кижских шхерах – 89%. Содержание CO_2 на фоновой станции и в шхерном районе было на одном уровне (табл. 2).

Содержание взвешенных веществ в Кижских шхерах было выше (в среднем $2,9 \pm 1,2$ мг/л), чем на фоновой станции (t-test: $p = 6,879 \times 10^{-4}$; $t = 3,688$; $df = 39$). Это является вполне закономерным поскольку в этом районе происходит активное перемешивание воды и взмучивание донных осадков из-за интенсивного судоходства. Так, количество судов, посетивших о. Кижы в 2018–2022 гг., составило 870–1010, только в 2020 г. во время пандемии COVID-19 оно снижалось в среднем в 2 раза, до 472 судов [*Отчет о деятельности. . .*, 2022; *Отчет о деятельности. . .*, 2023]. В то же время в 2020 г. содержание взвешенных веществ в воде Кижских шхер в среднем составляло 2,1 мг/л, а у главного пассажирского причала (станция Z2) – 2,8 мг/л [*Galakhina et al., 2022*]. В рамках текущего исследования было установлено, что повышенные концентрации взвешенных веществ отмечались на станциях, расположенных на судовом ходу (в среднем на Z1 – 3,1 мг/л, Z4 – 2,9, Z(OT) – 3,3 мг/л). Однако, самое высокое их содержание было связано со станцией Z2 – в среднем 4,9 мг/л с максимальным значением 8,0 мг/л в летний период 2024 г. (рис. 2Б). Кроме того, в шхерах в период открытой воды продукционные процессы протекают более интенсивно, чем центре озера, что приводит к большему новообразованию взвешенного органического вещества, которое также вносит свой вклад в его общее содержание.

Биогенные элементы. Распределение форм биогенных элементов (P, N) в Кижских шхерах и центральной части Онежского озера имело свои особенности. В исследованных районах озера концентрации минерального фосфора и аммония изменялись слабо (табл. 2), а содержание нитритов не превышало 0,002 мгN/л, составляя в среднем 0,001 мгN/л. В то же время в период открытой воды содержание общего фосфора в Кижских шхерах было несколько выше, чем на фоновой станции (8 мкг/л), и в сред-

Таблица 2. Химический состав воды района Кижских шхер Онежского озера и фоновой станции С2 в 2023–2024 гг. (в числителе – среднее значение и стандартное отклонение, в знаменателе – пределы их колебаний)

Показатель	Фоновая станция (С2)	Кижские шхеры (все станции)	ПДК*
Р _{мин} , мкг/л	1,0 ± 0,4	1,5 ± 1,2	-
	0,5 – 1,7	0,5 – 5,0	
Р _{общ} , мкг/л	7,6 ± 2,1	11,7 ± 4,5	-
	4,0 – 11,0	4,0 – 28,0	
N _{общ} , мг/л	0,37 ± 0,03	0,28 ± 0,04	-
	0,31 – 0,41	0,21 – 0,37	
NH ₄ ⁺ , мгN/л	0,03 ± 0,02	0,04 ± 0,02	0,40
	0,01 – 0,07	0,01 – 0,11	
NO ₃ ⁻ , мгN/л	0,16 ± 0,05	0,04 ± 0,03	9,00
	0,10 – 0,24	0,00 – 0,13	
N _{орг} , мг/л	0,17 ± 0,07	0,20 ± 0,05	-
	0,04 – 0,25	0,10 – 0,33	
Si, мгSi/л	0,38 ± 0,07	0,39 ± 0,14	-
	0,21 – 0,47	0,24 – 0,84	
C _{орг} , мгC/л	6,6 ± 0,3	6,5 ± 0,2	-
	6,3 – 7,0	6,0 – 7,1	
ХПК, мгО/л	17,4 ± 1,4	18,1 ± 1,1	-
	15,3 – 19,4	14,7 – 20,6	
ПО, мгО/л	6,8 ± 0,5	7,1 ± 0,4	-
	6,3 – 7,8	6,3 – 8,0	
Цветность, град	28 ± 5	28 ± 5	-
	22 – 40	22 – 40	
БПК ₅ , мгО ₂ /л	0,68 ± 0,23	0,86 ± 0,30	2,10
	0,29 – 1,03	0,30 – 2,02	
CO ₂ , мг/л	2,9 ± 1,4	2,6 ± 0,7	-
	1,1 – 5,6	1,5 – 4,2	
O ₂ , мг/л	11,01 ± 1,26	9,30 ± 0,83	6,0
	8,89 – 12,44	8,07 – 11,39	
Взвешенное вещество, мг/л	1,5 ± 0,7	2,9 ± 1,2	-
	0,6 – 2,8	1,0 – 8,0	
Fe _{общ} , мг/л	0,07 ± 0,02	0,12 ± 0,05	0,10
	0,06 – 0,11	0,07 – 0,36	
Mn, мг/л	0,01 ± 0,00	0,02 ± 0,01	0,01
	0,01 – 0,02	0,01 – 0,04	
Нефтепродукты, мг/л	0,09 ± 0,04	0,06 ± 0,04	0,05
	0,02 – 0,13	0,01 – 0,20	
СПАВ, мг/л	0,01 ± 0,00	0,01 ± 0,01	0,10
	0,01 – 0,01	0,01 – 0,03	
Cu, мкг/л	1,7 ± 1,1	1,7 ± 1,1	1
	0,8 – 3,2	0,8 – 5,8	
Zn, мкг/л	2,5 ± 1,6	2,0 ± 1,7	10
	0,1 – 4,0	0,1 – 5,9	
Pb, мкг/л	0,18 ± 0,06	0,18 ± 0,10	6
	0,14 – 0,26	0,03 – 0,39	
Ni, мкг/л	0,48 ± 0,14	0,69 ± 0,14	10
	0,26 – 0,60	0,48 – 0,96	
Cr, мкг/л	0,37 ± 0,25	0,40 ± 0,24	70
	0,09 – 0,63	0,03 – 0,94	

Примечание: здесь и далее: * – предельно допустимые концентрации (ПДК) для водоёмов рыбохозяйственного назначения [Минсельхоз России, 2016]; прочерк – отсутствие данных.

нем составляло 12 мкг/л, что соответствовало мезотрофному типу вод согласно геохимической классификации [Лозовик, 2013]. На отдельных станциях были отмечены повышенные концентрации Р_{общ}, например, на Z2 весной и летом 2024 г. они составили 21 и 28 мкг/л соответственно, а на станциях Z1 и Z(OT) – 17 мкг/л весной 2024 г. (рис. 2Г-Д). Высокое содержание Р_{общ} встречалось и ранее: на станции Z1 летом и осе-

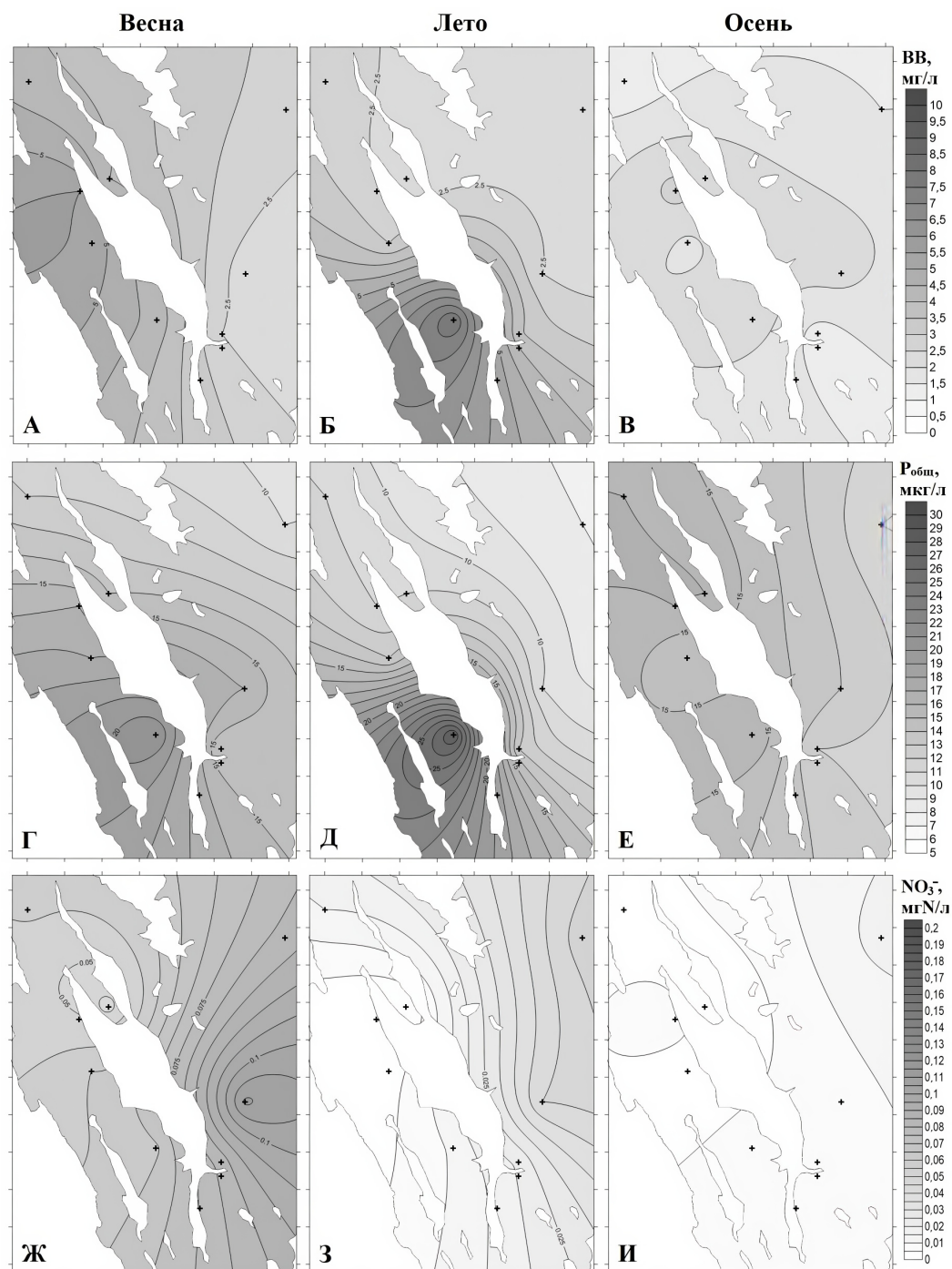


Рис. 2. Содержание взвешенного вещества (ВВ) (А–В), фосфора общего (Г–Е) и нитратов (Ж–И) в районе о. Кижы в различные сезоны 2024 г.

нию 2004 г. – 46 и 35 мкг/л соответственно [Мартъянов и Протасов, 2005], на станции Z2 осенью 2012 г. – 24 мкг/л [Мартъянов и Иешко, 2013]. Стоит отметить, что содержание минерального фосфора на всех станциях района Кижских шхер в текущем исследовании было довольно низкое (табл. 2), то есть основная его часть приходилась на органическую форму ($P_{орг}$), что может свидетельствовать о его природном, а не антропогенном, происхождении. Для незагрязненных вод Карелии характерна высокая доля $P_{орг}$ в составе $P_{общ}$, которая связана с природными соединениями как автохтонного, так и аллохтонного генезиса [Зобкова, 2024; Рыжаков и др., 2016]. При этом $P_{орг}$ может быть представлен не только растворёнными, но и взвешенными формами. По-

этому взмучивающиеся судами донные осадки могут служить причиной повышенных концентрации как взвешенных веществ, так и $P_{\text{общ}}$ в данном районе озера. Стоит отметить, что в период ледостава содержание взвешенных веществ и $P_{\text{общ}}$ в воде Кижских шхер было ниже, чем в период открытой воды 2023–2024 гг. и составляло в среднем $0,3 \pm 0,4$ мг/л и 7 ± 1 мкг/л соответственно [Sidorova et al., 2025].

В Кижских шхерах отмечена сезонная динамика $P_{\text{общ}}$: наблюдалось увеличение его концентрации от весны к осени, что связано, в первую очередь, с увеличением содержания органической формы фосфора в то время как минеральная оставалась неизменной. Кроме того, была отмечена межгодовая динамика содержания общего фосфора: в 2023 г. его концентрация в среднем составляла 9 мкг/л, а в 2024 г. – 14 мкг/л. Стоит отметить, что в 2019–2020 гг. содержание $P_{\text{общ}}$ в этом районе озера также составляло 9 мкг/л [Galakhina et al., 2022]. Межгодовое изменение содержания $P_{\text{общ}}$ отмечалось ранее в период многолетнего проведения мониторинга этого района озера и объясняется, по-видимому, гидродинамическими особенностями циркуляции водных масс в этом районе озера [Мартьянов и Иешко, 2013].

В центральном плёсе Онежского озера (станция С2) было выявлено повышенное, относительно Кижских шхер, содержание нитратов и азота общего (t-test: $\text{NO}_3^- - p = 4,638 \times 10^{-10}$; $t = -8,233$; $df = 39$; $\text{N}_{\text{общ}} - p = 6,225 \times 10^{-9}$; $t = -7,393$; $df = 39$; табл. 2). Стоит отметить, что при этом концентрации остальных форм азота (NH_4^+ , NO_2^- и $\text{N}_{\text{орг}}$) были практически идентичными в исследованных районах озера. Повышенное содержание нитратов в центральной части Онежского озера является природной особенностью больших стратифицированных озёр [Dove and Chapra, 2015; Khodzher et al., 2018] и встречается, например, в Великих Американских озёрах [Dove and Chapra, 2015]. В Кижских шхерах отмечено уменьшение концентрации нитратов от весны к осени вплоть до полного их отсутствия на некоторых станциях (рис. 2Ж–И). На станции С2, хоть и происходило сезонное снижение содержания NO_3^- , однако полного их потребления зафиксировано не было, что связано с замедленным развитием продукционных процессов в этом районе озера за счёт дефицита $P_{\text{мин}}$ [Сабьлина и др., 2010]. Обращают на себя внимание и отличия Кижских шхер от фоновой станции по соотношению $\text{N}_{\text{мин}}/P_{\text{общ}}$, которое позволяет оценить лимитирование биогенных элементов в озере [Dove and Chapra, 2015]. На станции С2 значение соотношения $\text{N}_{\text{мин}}/P_{\text{общ}}$ составляло в среднем 27,8 мг N/мг P, а в шхерном районе оно было почти в 3 раза ниже – в среднем 9,6 мг N/мг P и близко к пороговому значению Редфилда (7,2 мг N/мг P). Низкие значения этого показателя указывают на снижение лимитирования фосфора, что потенциально может привести к постепенному эвтрофированию [Dove and Chapra, 2015] этого района Онежского озера.

Органическое вещество. Содержание органического вещества в исследованных районах Онежского озера было низким (табл. 2), что подтверждается как прямым определением $C_{\text{орг}}$ в воде, так и значениями косвенных показателей его содержания (ПО, ХПК, БПК₅, цветность). Согласно геохимической классификации природных вод [Лозовик, 2013] воды района Кижских шхер и центрального плёса озера относятся к олигогумусным. Концентрация $C_{\text{орг}}$ в Кижских шхерах составляла в среднем 6,5 мг/л, что соответствовало его содержанию на фоновой станции, и значениям, полученным ранее в 2019–2020 гг. [Galakhina et al., 2022]. Стабильно низкое содержание органического вещества в Кижских шхерах, по-видимому, обусловлено отсутствием речного стока, перемешиванием воды с водными массами, поступающими из открытой части озера и удалённостью от крупных источников загрязнения. Чёткой сезонной динамики содержания органического вещества в исследованных районах установлено не было, можно лишь отметить небольшое увеличение значений БПК₅ от весеннего к летнему, а в 2023 г. и к осеннему периоду. Это связано с тем, что сентябрь 2023 г. выдался тёплым и на момент отбора проб во второй половине месяца температура в поверхностном слое воды Кижских шхер варьировала от 14,0 до 14,5 °С.

Содержание гумусовых веществ в Кижских шхерах (станция Z3) и фоновой станции С2 было на одном уровне и составляло в среднем $5,6 \pm 0,2$ мгС/л и $5,4 \pm 0,4$ мгС/л, а их доля от общего $C_{орг}$ достигала в среднем 85% и 84% соответственно. Стоит отметить, что их количество в 2023–2024 гг. было несколько выше, чем в 2019–2020 гг. (в среднем 80% на станциях С2 и Z3). Высокое содержание гумусовых веществ в общем составе органического вещества является вполне закономерным для водоёмов Карелии [Зобкова, 2024].

Литофильные элементы. Статистически значимых отличий в содержании кремния и марганца на фоновой станции и шхерном районе озера установлено не было (табл. 2). Что касается концентрации железа общего, то на станции С2 она была ниже, чем в Кижских шхерах и соответствовала среднемноголетним значениям (0,07 мг/л), установленным для центрального плёса Онежского озера [Лозовик и др., 2020]. Более высокое содержание $Fe_{общ}$ в воде шхер (в среднем $0,12 \pm 0,05$ мг/л) может быть связано с его поступлением с водосборной территории с дождевыми и паводковыми водами. Кроме того, существенный вклад может оказывать и взвешенная форма железа, находящаяся в донных осадках, которые взмучиваются проходящими судами и распределяются в толще воды. Поэтому наибольшие концентрации $Fe_{общ}$, как взвешенных веществ и $P_{общ}$, были установлены летом на станции Z2 рядом с главным пассажирским причалом (до 0,36 мг/л). При этом зимой 2025 г. в Кижских шхерах содержание $Fe_{общ}$ было ниже и составляло $0,07 \pm 0,02$ мг/л [Sidorova et al., 2025]. На всех станциях Кижских шхер установлено превышение ПДК для рыбохозяйственных водоёмов [Минсельхоз России, 2016] по содержанию марганца и на многих станциях – по содержанию $Fe_{общ}$ (табл. 2). В целом, повышенные концентрации $Fe_{общ}$ и Mn являются геохимической особенностью поверхностных вод гумидной зоны [Лозовик, 2006]. В частности, на миграцию железа в водной среде влияют гумусовые вещества, являющиеся сильными комплексообразующими соединениями и способствующими миграции металлов в поверхностных водах [Linnik et al., 2015]. Установлено, что на железо, находящееся в составе гумусовых веществ в водных объектах Карелии, приходится в среднем 53% от $Fe_{общ}$ [Зобкова, 2024].

Загрязняющие вещества. Для оценки качества воды Кижских шхер был проведён анализ содержания в них загрязняющих веществ – нефтепродуктов и СПАВ (табл. 2), а также тяжёлых металлов – Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd (табл. 2). Содержание СПАВ на всех исследованных станциях Онежского озера было низким, слабо изменялось в течение всего периода наблюдений и не превышало ПДК для рыбохозяйственных водоёмов. Повышенные концентрации нефтепродуктов отмечались в различные сезоны на всех исследованных станциях, в почти половине случаев (47% от общего числа проб) было выявлено превышение ПДК по этому показателю. Источниками их поступления могут являться водный транспорт, сточные воды, поверхностный сток в период паводков, а также атмосферные осадки. Ежегодно в музей-заповедник «Кижский» заходят порядка 1000 туристических судов [Отчет о деятельности. . ., 2022; Отчет о деятельности. . ., 2023], на близлежащей акватории часто курсируют маломерные суда (катера), а также суда, перевозящие грузы с материка на остров в районе станции Z(OT). Поэтому, учитывая интенсивную транспортную нагрузку, наблюдаемое превышение ПДК по этому показателю является вполне закономерным. Стоит отметить, что повышенные концентрации нефтепродуктов отмечались в этом районе озера и ранее [Иешко и Мартыанов, 2007; Мартыанов и Иешко, 2010; Протасов и Мартыанов, 2004].

Содержание тяжёлых металлов было весьма низким в исследованных районах Онежского озера (табл. 2). Минимальные концентрации были установлены для кадмия, свинца, хрома и никеля, что является типичным для вод Карельского региона [Лозовик и др., 2020]. Так, содержание Cd не превышало 0,07 мкг/л за весь период наблюдений на всех станциях. Несмотря на то, что значения для некоторых металлов несколько отличались на различных исследованных станциях, они соответствовали

данным полученным в 2019–2020 гг. [Galakhina et al., 2022]. Превышений ПДК по всем тяжёлым металлам кроме меди для района Кижских шхер установлено не было. Содержание Си варьировало в пределах от 0,8 до 5,8 мкг/л и в среднем составляло 1,7 мкг/л (табл. 2), на всех станциях, включая фоновую, было зафиксировано превышение ПДК по этому компоненту. Однако, как и в случае с железом и марганцем, повышенные концентрации меди связаны с региональными особенностями вод Карелии, а не с их загрязнением [Лозовик, 2006].

В период открытой воды 2024 г. для более детальной оценки качества воды в районе Кижских шхер были отобраны пробы воды в точках сброса сточных вод после их предварительной очистки на локальных очистных сооружениях: Биотал-3 (станция ZW3), УСВ-10 (станция ZW4), а также Биоклер-10 и Лабко (станция ZW5) (табл. 1, рис. 1). При сравнении полученных данных о содержании и распределении гидрохимических показателей на станциях ZW3-ZW5 и других станциях исследованного района отличий зафиксировано не было, что подтверждено статистически с помощью параметрического теста ANOVA ($p > 0,01$). Это указывает на незначительное влияние сброса сточных вод с этих очистных сооружений на химический состав воды Кижских шхер.

Многолетние изменения химического состава воды

В Кижских шхерах с помощью теста Пирсона были выявлены изменения химического состава воды за последние 30 лет по большинству рассмотренных показателей за исключением $P_{\text{мин}}$, NH_4^+ , БПК_5 , O_2 , взвешенному веществу и литофильным элементам (табл. 3). Обращает на себя внимание уменьшение содержания всех компонентов ионного состава, кроме гидрокарбонатов, содержание которых возросло ($p = 2,184 \times 10^{-6}$; $R = 0,479$; $df = 90$). При этом также отмечено снижение значений pH воды и рост электропроводности при отсутствии значимого тренда для суммы ионов. Кроме того, в Кижских шхерах было выявлено увеличение концентрации углекислого газа ($p = 1,059 \times 10^{-11}$; $R = 0,634$; $df = 89$). В многолетнем аспекте отмечалось уменьшение содержания $P_{\text{общ}}$, $N_{\text{общ}}$, $N_{\text{орг}}$ и NO_3^- , а также их соотношений. Изменения выявлены и в содержании органического вещества: отмечено снижение значений ХПК ($p = 3,019 \times 10^{-16}$; $R = -0,734$; $df = 92$) и ПО ($p = 4,967 \times 10^{-5}$; $R = -0,238$; $df = 232$), но при этом выявлен рост цветности ($p = 1,130 \times 10^{-10}$; $R = 0,537$; $df = 127$). Также были установлены статистически значимые тренды роста их соотношений (ПО/ХПК, гумусности – $\text{Нум} = \sqrt{\text{ЦВ} \cdot \text{ПО}}$; табл. 3). Кроме того, в Кижских шхерах выявлено увеличение содержания нефтепродуктов ($p = 1,804 \times 10^{-3}$; $R = 0,300$; $df = 104$). Последнее, вероятно, связано с увеличением антропогенной нагрузки от водного транспорта за многолетний период.

В центральном плёсе Онежского озера на фоновой станции также были выявлены многолетние изменения по ряду химических показателей, однако таковых было значительно меньше, чем в Кижских шхерах. Было отмечено уменьшение всех компонентов ионного состава, кроме HCO_3^- , для которого статистически значимого тренда не выявлено (табл. 3). В отличие от шхерного района озера, на станции С2 не зафиксировано изменение значений электропроводности, но отмечено снижение суммы ионов. Концентрация CO_2 имела тенденцию роста ($p = 3,750 \times 10^{-3}$; $R = 0,428$; $df = 48$), что согласуется с ранее опубликованными данными [Kalinkina et al., 2020]. В центральной части озера отмечено уменьшение содержания всех форм азота, при этом статистически значимых трендов для их соотношений с фосфором установлено не было. Среди показателей органического вещества было отмечено увеличение значений цветности ($p = 2,709 \times 10^{-7}$; $R = 0,603$; $df = 59$) и уменьшение БПК_5 ($p = 4,988 \times 10^{-5}$; $R = -0,495$; $df = 59$). В центральном плёсе озера для O_2 , взвешенного вещества и литофильных элементов не было зафиксировано статистически значимых трендов.

Выявленные изменения в ионном составе воды могут быть связаны с уменьшением поступления анионов сильных кислот (сульфатов и нитратов) с атмосферными осадками, которые отмечают многими исследователями в последние годы. Закисление

Таблица 3. Коэффициент корреляции Пирсона, отражающий изменение химических показателей Кижских шхер (станции Z1, Z2, Z3, Z4) и центральной части (станция С2) Онежского озера с 1994 по 2024 г.

Показатель	Преобразование	Число записей	R	
			Кижж	С2
pH	exp(x)	226	-0,321	-0,403
SO ₄ ²⁻	нет	181	-0,813	-0,785
Cl ⁻	нет	183	-0,493	-0,361
HCO ₃ ⁻	нет	178	0,479	0,177
Na ⁺	ln(x)	192	-0,699	-0,387
K ⁺	ln(x)	169	-0,517	-0,370
Mg ²⁺	ln(x)	166	-0,768	-0,727
Ca ²⁺	ln(x)	166	-0,610	-0,680
P _{общ}	ln(x)	330	-0,276	-0,216
P _{мин}	ln(x)	279	0,117	-0,145
N _{общ}	нет	337	-0,661	-0,751
N _{орг}	нет	337	-0,570	-0,664
NO ₃ ⁻	нет	338	-0,359	-0,545
NH ₄ ⁺	ln(x)	347	0,011	-0,333
C _{орг}	ln(x)	123	-0,859	0,220
XПК	ln(x)	151	-0,734	0,232
ПО	ln(x)	331	-0,238	-0,162
ЦВ	нет	226	0,537	0,603
БПК ₅	ln(x)	213	-0,172	-0,495
CO ₂	нет	173	0,634	0,428
O ₂	ln(x)	183	-0,217	-0,165
Взв. в-во	ln(x)	232	-0,014	0,066
Fe _{общ}	ln(x)	217	-0,191	0,326
Si	ln(x)	184	-0,080	0,360
Электропроводность	нет	167	0,699	0,284
Нефтепродукты	ln(x)	123	0,300	-0,304
Mn	ln(x)	186	-0,195	-0,365
NO ₃ ⁻ /P _{общ}	ln(x)	308	-0,348	-0,162
N _{мин} /P _{общ}	ln(x)	325	-0,141	-0,135
ПО/ХПК	нет	147	0,755	-0,385
Hum	нет	225	0,453	0,475
Σ _и	нет	139	-0,098	-0,479

Примечание: голубым цветом выделены значения коэффициента корреляции для статистически значимых трендов; Σ_и – сумма ионов.

поверхностных вод, связанное с антропогенными выбросами серы и азота в атмосферу на протяжении более чем ста лет [Grennfelt et al., 2019] было широко задокументировано в северных странах Европы и Северной Америки [Stoddard et al., 1999; Wit et al., 2023], в том числе и в России [Moiseenko et al., 2022]. Предпринятые меры по уменьшению выбросов этих веществ в атмосферу и последующее снижение содержания SO₄²⁻ и NO₃⁻ в атмосферных осадках [Grennfelt et al., 2019; Wit et al., 2023] привело к постепенному восстановлению водных объектов и интенсивному снижению содержания сульфатов и нитратов в воде многих рек и озер [Moiseenko et al., 2022; Vogt et al., 2024; Wit et al., 2023]. Также отмечалось, что в восстановленных пресноводных экосистемах были выявлены тренды снижения концентраций кальция и магния [Garmo et al., 2014; Mazoyer and Houle, 2025] и увеличение щёлочности воды [Vogt et al., 2024]. Это связано

с тем, что закисление почв способствовало выщелачиванию из них большего количества Ca^{2+} и Mg^{2+} в воду, однако в процессе восстановления в результате снижения поступления анионов сильных кислот уменьшилось и выщелачивание этих катионов [Garmo et al., 2014; Mazoyer and Houle, 2025]. При уменьшении концентрации сульфат-ионов должно происходить увеличение pH воды исследованных водоёмов, однако отмечается, что в ряде водных объектов с высоким содержанием органического вещества гумусовой природы значения pH продолжают снижаться, несмотря на уменьшение содержания сульфатов [Mazoyer and Houle, 2025; Moiseenko et al., 2022], что также отмечено в данной работе в Кижских шхерах и центральной части озера. Более того, восстановление почв после закисления может способствовать росту содержания органического вещества в воде, поскольку снижение содержания сильных кислот в почве приводит к повышению растворимости органического вещества в почвенном растворе и дальнейшему их поступлению в водные объекты [Mazoyer and Houle, 2025].

Как на фоновой станции, так и в Кижских шхерах, отмечается рост величин цветности воды, ранее аналогичный тренд был зафиксирован для Петрозаводской губы Онежского озера [Galakhina et al., 2022; Kalinkina et al., 2020]. В последнее десятилетие во многих в реках и озерах северных и умеренных широт увеличилось содержание органического вещества гумусовой природы, что подтверждается ростом содержания $\text{C}_{\text{орг}}$, $\text{Fe}_{\text{общ}}$ и значений цветности воды [Clark et al., 2010; Kankaala et al., 2019; Weyhenmeyer et al., 2014]. Это явление называют браунификацией и связывают с глобальным потеплением климата, вызванным увеличением выбросов парниковых газов [Kalinkina et al., 2020; Kankaala et al., 2019]. Действительно, увеличение цветности также было зафиксировано в текущем исследовании, как и рост значений Hum и ПО/ХПК , отражающие повышение доли аллохтонного органического вещества в воде относительно автохтонного. Однако, трендов увеличения показателей содержания общего органического вещества ($\text{C}_{\text{орг}}$ или ХПК) на станции С2 выявлено не было; в шхерном районе напротив, отмечается их снижение (табл. 3). Поэтому наблюдаемые изменения скорее всего связаны с изменением компонентов кислотно-основного равновесия (содержания анионов сильных кислот, CO_2 и HCO_3^-) и/или изменениями в качественном составе органического вещества (соотношении фульвовых и гуминовых кислот). Исходя из этого, утверждать, что тренд цветности, отмечаемый в Онежском озере связан с ростом содержания органического вещества, преждевременно, и необходимо продолжить исследования в этом направлении.

За многолетний период изменения коснулись и азотной группы, это касается не только снижения содержания общего азота, но также и изменение вклада различных форм азота в $\text{N}_{\text{общ}}$ (рис. 3). Стоит отметить, что снижение содержания нитратов было отмечено ранее для всех районов Онежского озера [Galakhina et al., 2022]. Общая концентрация азота как в Кижских шхерах, так и центральной части Онежского озера снизилась с 1994–1996 гг. по настоящее время в 1,9 раз. Это связано с уменьшением содержания нитратов и органического азота в этих районах озера. При этом доля $\text{N}_{\text{орг}}$ в общем содержании азота в Кижских шхерах оставалась практически неизменной за все время наблюдений (рис. 3), в то время как вклад NO_3^- в 2023–2024 гг. снизился до 11%, а NH_4^+ увеличился до 15%. Это произошло за счёт снижения содержания нитратов, а не роста ионов аммония. Что касается фоновой станции С2, то в 1994–2009 гг. вклад различных форм азота в его общее содержание был схожим (рис. 3). Наибольшие изменения были зафиксированы в 2023–2024 гг., когда доля $\text{N}_{\text{орг}}$ и NO_3^- практически выровнялась. Снижение содержания нитратов может быть связано как с их более интенсивным биологическим потреблением [Dove and Chapra, 2015], так и с снижением их поступления с атмосферными осадками [Grennfelt et al., 2019; Wit et al., 2023]. Что касается соотношения $\text{N}_{\text{мин}}/\text{P}_{\text{общ}}$, то настораживают его низкие значения в шхерах, хотя статистически значимый тренд снижения этого показателя был установлен только для станции Z2 ($p = 5,653 \times 10^{-3}$; $R = -0,353$; $df = 58$). Если в 1994–1996 гг. на этой станции значение соотношения $\text{N}_{\text{мин}}/\text{P}_{\text{общ}}$ составляло в среднем 10,8 мг N/мг P, то в настоящее время оно снизилось до 4,6 мг N/мг P, то есть опустилось ниже значе-

ния Редфилда (7,2 мг N/ мг P). Это может свидетельствовать о постепенном развитии процессов эвтрофирования на данной станции [Dove and Chapra, 2015], что подтверждается разовыми всплесками роста содержания $P_{\text{общ}}$ (весной 2024 – 21 мкг/л, а летом 2024 – 28 мкг/л).

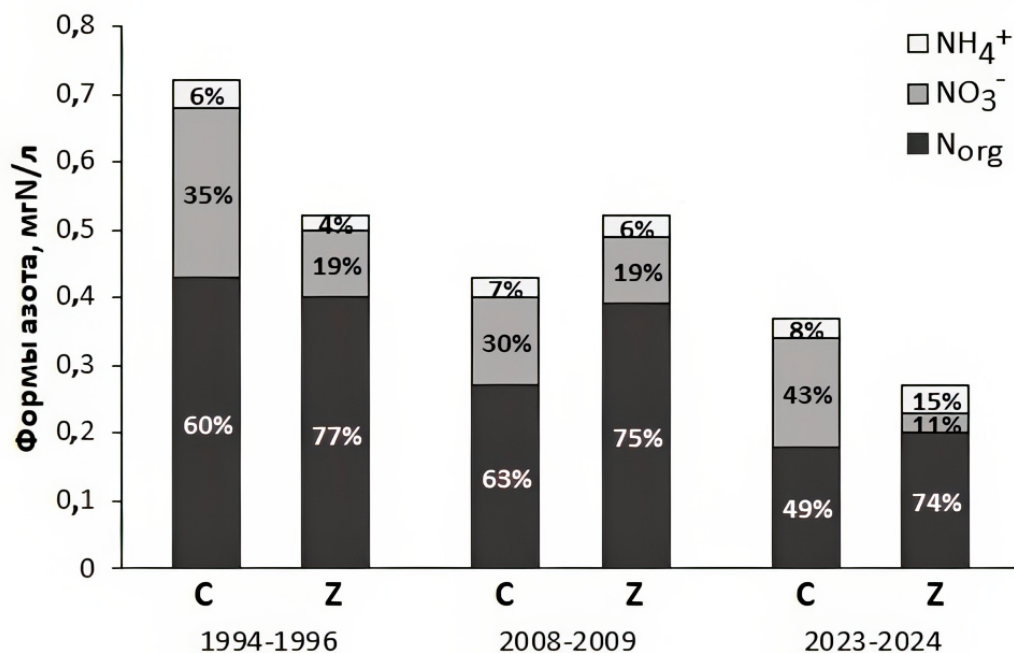


Рис. 3. Изменение содержания различных форм азота и его доли в $N_{\text{общ}}$ в Кижских шхерах (среднее по станциям Z1, Z2, Z3, Z4) и центральной части Онежского озера (ст. С2) в различные периоды с 1994 по 2024 гг.

Выводы

Исследования, проведённые в 2023–2024 г. показали, что вода в районе Кижских шхер Онежского озера близка по химическим показателям к фоновой станции и характеризуется низкой сезонной изменчивостью химического состава. Это объясняется удалённостью Кижского архипелага от основных источников загрязнения, а также водообменом этого шхерного района с центральной частью Онежского озера. Воды в Кижских шхерах являются ультрапресными с низким содержанием органических веществ; по содержанию биогенных элементов относятся к мезотрофным. В период исследований 2023–2024 гг. выявлено систематическое превышение ПДК по содержанию нефтепродуктов и железа общего, а также зафиксированы повышенные концентрации взвешенного вещества и фосфора общего на ряде станций. По-видимому, это связано с интенсивным судоходством и, как следствие, взмучиванием донных осадков в данном районе озера. Химический состав воды в районах сброса очищенных сточных вод не показал значимых отличий с другими станциями Кижских шхер, что свидетельствует об отсутствии явного антропогенного влияния сбросов сточных вод на химический состав воды в данном районе озера.

Анализ изменения химического состава воды Кижских шхер и центральной части Онежского озера показал, что за последние десятилетия произошло снижение содержания анионов сильных кислот (сульфаты, нитраты), что, по всей видимости, привело также к уменьшению содержания катионов, но к росту гидрокарбонатов. Кроме того, было зафиксировано снижение содержания компонентов азотной группы ($N_{\text{общ}}$, $N_{\text{орг}}$, NO_3^-) и соотношения $N_{\text{мин}}/P_{\text{общ}}$, а также рост цветности и концентрации CO_2 . Кроме того, был выявлен рост содержания нефтепродуктов в воде Кижских шхер, который связан с интенсивным судоходством в этом районе озера, вероятно в связи с увеличением туристического потока. Остальные наблюдаемые изменения не являются

ся следствием локального антропогенного влияния, они могут быть вызваны только глобальными процессами, такими как снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу или изменение климата, что требуют дальнейшего изучения.

Благодарности. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-17-20018, <https://rscf.ru/project/23-17-20018/>, проводимого совместно с органами власти Республики Карелия с финансированием из Фонда венчурных инвестиций Республики Карелия (ФВИ РК). Исследования выполнены на научном оборудовании Центра коллективного пользования КарНЦ РАН.

Список литературы

- Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / под ред. П. А. Лозовика и Н. А. Ефременко. — СПб : Нестор-История, 2017. — 272 с.
- Зобков М. Б. Автоматизированная информационная система «Обработка гидрохимической информации и оценка состояния водных объектов (АИС «ОГХИ»)». А.с. РФ прог. ЭВМ РФ на программу для ЭВМ №2010612351 от 31.04.2010. — 2010. — 563 с.
- Зобкова М. В. Оценка автохтонной, аллохтонной и антропогенной составляющих органического вещества в поверхностных водах (на примере водных объектов Карелии) : дис. . . . канд. / Зобкова М. В. — Петрозаводск, 2024. — 20 с.
- Иешко Е. П. и Мартьянов Р. С. Бюллетень экологических исследований на территории музея-заповедника «Кижь» за 2006 год. — Петрозаводск : Музей-заповедник «Кижь», 2007. — 38 с.
- Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию : дис. . . . д-ра / Лозовик П. А. — 2006. — 481 с.
- Лозовик П. А. Геохимическая классификация поверхностных вод гумидной зоны на основе их кислотно-основного равновесия // Водные ресурсы. — 2013. — Т. 40, № 6. — С. 583–592. — <https://doi.org/10.7868/s0321059613060072>.
- Лозовик П. А., Кулик Н. В. и Ефременко Н. А. Литофильные элементы и тяжелые металлы в онежском озере: источники поступления, содержание и трансформация // Труды КарНЦ РАН. — 2020. — № 4. — С. 62–74. — <https://doi.org/10.17076/lim1189>.
- Лозовик П. А. и Мусатова М. В. Методика разделения органического вещества природных вод адсорбцией на диэтиламиноэтилцеллюлозе на автохтонную и аллохтонную составляющие // Вестник МГОУ. Серия: Естественные науки. — 2013. — № 3. — С. 63–68.
- Мартьянов Р. С. и Иешко Е. П. Бюллетень экологических исследований на территории музея-заповедника «Кижь» за 2009 год. — Петрозаводск : Музей-заповедник «Кижь», 2010. — 36 с.
- Мартьянов Р. С. и Иешко Е. П. Бюллетень экологических исследований на территории музея-заповедника «Кижь». 2012 год. — Петрозаводск : Музей-заповедник «Кижь», 2013. — 36 с.
- Мартьянов Р. С. и Протасов Ю. Г. Бюллетень экологических исследований на территории музея-заповедника «Кижь» (Карелия) за 2004 г. — Петрозаводск : Музей-заповедник «Кижь», 2005. — 36 с.
- Минсельхоз России. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (с изменениями на 13 июня 2024 года). Приказ от 13 декабря 2016 года N 552. — 2016. — (дата обращения: 17.03.2025).
- Онежское озеро: Атлас / под ред. Н. Н. Филатова. — Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2010. — 151 с.
- Отчет о деятельности Государственного историко-архитектурного и этнографического музея-заповедника «Кижь». 2021 год / под ред. Е. Б. Базегской. — Петрозаводск : Издательский центр музея-заповедника «Кижь», 2022. — 93 с.
- Отчет о деятельности Государственного историко-архитектурного и этнографического музея-заповедника «Кижь». 2022 год / под ред. Е. Б. Базегской. — Петрозаводск : Музей-заповедник «Кижь», 2023. — 94 с.
- Протасов Ю. Г. и Мартьянов Р. С. Бюллетень экологических исследований на территории музея-заповедника «Кижь» за 2003 г. — Петрозаводск : Музей-заповедник «Кижь», 2004. — 40 с.
- Рыжаков А. В., Зобкова М. В. и Лозовик П. А. Особенности содержания и распределения форм фосфора в водоемах гумидной зоны // Труды КарНЦ РАН. — 2016. — № 9. — С. 33–45. — <https://doi.org/10.17076/lim304>.
- Сабылина А. В., Лозовик П. А. и Зобков М. Б. Химический состав воды Онежского озера и его притоков // Водные ресурсы. — 2010. — Т. 37, № 6. — С. 717–729.

- Соловьева Н. Ф., Расплетина Г. Ф., Форш-Меншуткина Т. Б. и др. Гидрохимия Онежского озера и его притоков. — Л. : Наука, 1973. — 243 с.
- Clark J. M., Bottrell S. H., Evans C. D., et al. The importance of the relationship between scale and process in understanding long-term DOC dynamics // *Science of The Total Environment*. — 2010. — Vol. 408, no. 13. — P. 2768–2775. — <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.02.046>.
- Dove A. and Chapra S. C. Long-term trends of nutrients and trophic response variables for the Great Lakes: Great Lakes nutrient trends // *Limnology and Oceanography*. — 2015. — Vol. 60, no. 2. — P. 696–721. — <https://doi.org/10.1002/lno.10055>.
- Galakhina N., Zobkov M. and Zobkova M. Current chemistry of Lake Onego and its spatial and temporal changes for the last three decades with special reference to nutrient concentrations // *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. — 2022. — Vol. 17. — P. 100619. — <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100619>.
- Garmo Ø. A., Skjelkvåle B. L., Wit H. A. de, et al. Trends in Surface Water Chemistry in Acidified Areas in Europe and North America from 1990 to 2008 // *Water, Air, & Soil Pollution*. — 2014. — Vol. 225, no. 3. — <https://doi.org/10.1007/s11270-014-1880-6>.
- Grennfelt P., Engleryd A., Forsius M., et al. Acid rain and air pollution: 50 years of progress in environmental science and policy // *Ambio*. — 2019. — Vol. 49, no. 4. — P. 849–864. — <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01244-4>.
- Kalinkina N., Tekanova E., Korosov A., et al. What is the extent of water brownification in Lake Onego, Russia? // *Journal of Great Lakes Research*. — 2020. — Vol. 46, no. 4. — P. 850–861. — <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.02.008>.
- Kankaala P., Arvola L., Hiltunen M., et al. Ecosystem responses to increased organic carbon concentration: comparing results based on long-term monitoring and whole-lake experimentation // *Inland Waters*. — 2019. — Vol. 9, no. 4. — P. 489–502. — <https://doi.org/10.1080/20442041.2019.1600938>.
- Khodzher T. V., Domyshева V. M., Sorokovikova L. M., et al. Hydrochemical studies in Lake Baikal: history and nowadays // *Limnology and Freshwater Biology*. — 2018. — No. 1. — P. 2–9. — <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2018-a-1-2>.
- Linnik P. N., Zhezherya V. A., Linnik R. P., et al. Metals in surface water of Ukraine: the migration forms, features of distribution between the abiotic components of aquatic ecosystems, and potential bioavailability // *Russian Journal of General Chemistry*. — 2015. — Vol. 85, no. 13. — P. 2965–2984. — <https://doi.org/10.1134/s1070363215130162>.
- Mazoyer F. and Houle D. Long-term temporal response of eastern canadian lakes chemistry along a large spatial gradient of atmospheric sulfate deposition // *Environmental Pollution*. — 2025. — Vol. 366. — P. 125498. — <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125498>.
- Moiseenko T. I., Bazova M. M., Dinu M. I., et al. Changes in the Geochemistry of Land Waters at Climate Warming and a Decrease in Acid Deposition: Recovery of the Lakes or Their Evolution? // *Geochemistry International*. — 2022. — Vol. 60, no. 7. — P. 685–701. — <https://doi.org/10.1134/s0016702922060039>.
- Rossi P., Shveykovskiy A., Fedorova E., et al. DPSIR Framework (Drivers, Pressures, States, Impacts and Responses) Case-Study of Four UNESCO National Parks and Reserves in Russia and Finland. — University of Oulu, 2021. — 196 p. — <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12886.22089>.
- Sidorova A. I., Zobkova M. V., Fomina Yu. Yu., et al. The state of aquatic ecosystem according to hydrochemical and hydrobiological indicators of the Kizhi skerries area of Lake Onego during the ice period // *Limnology and Freshwater Biology*. — 2025. — No. 4. — P. 515–529. — <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-a-4-515>.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater / ed. by A. D. Eaton, A. E. Greenberg and L. S. Clesceri. — 20th. — Washington, D.C. : American Public Health Association, American Water Works Association, 1998.
- Stoddard J. L., Jeffries D. S., Lükewille A., et al. Regional trends in aquatic recovery from acidification in North America and Europe // *Nature*. — 1999. — Vol. 401, no. 6753. — P. 575–578. — <https://doi.org/10.1038/44114>.
- Vogt R. D., Arle J., Austnes K., et al. Trends and patterns in surface water chemistry in Europe and North America between 1990 and 2020, with a focus on calcium. — Oslo, Norway : ICP Waters report: 156/2024. Norwegian Institute for Water Research, 2024.
- Weyhenmeyer G. A., Prairie Y. T. and Tranvik L. J. Browning of Boreal Freshwaters Coupled to Carbon-Iron Interactions along the Aquatic Continuum // *PLoS ONE*. — 2014. — Vol. 9, no. 2. — e88104. — <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088104>.
- Wit H. A. de, Garmo Ø. A., Jackson-Blake L. A., et al. Changing water chemistry in one thousand Norwegian lakes during three decades of cleaner air and climate change // *Global Biogeochemical Cycles*. — 2023. — Vol. 37, no. 2. — <https://doi.org/10.1029/2022gb007509>.

CURRENT WATER CHEMICAL COMPOSITION OF THE KIZHI SKERRIES OF LAKE ONEGO AND ITS DYNAMICS OVER THE LAST 30 YEARS

M. V. Zobkova** 

Northern Water Problems Institute of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences,
Petrozavodsk, Russian Federation

**Correspondence to: Maria Zobkova, rincalika21@yandex.ru

Abstract: The results of the assessment of the current state of the Kizhi skerries of Lake Onego by the water chemical parameters comparing to the background area of the open central part of Lake Onego were presented. The following parameters were considered: ionic composition, nutrients, organic matter, gas composition (CO₂, O₂), Fe, Mn, pollutants (heavy metals, oils, synthetic surface-active substance). It was found that the water of the Kizhi skerries area is weakly mineralized, mesotrophic with a low content of organic substances. A systematic excess of the maximum permissible concentration for oils (1.2–4.0 times), as well as for Fe (1.1–3.6 times) and Cu (1.1–5.8 times) was fixed. The first one was caused by intensive navigation in this part of the lake, while the second and third ones – by regional water characteristics of the humid zone, and not by anthropogenic influence. Currently, water in this part of the lake is of good quality. Using archival data, an assessment of water chemical composition changes of the Kizhi skerries for the last three decades has been conducted. The ionic composition was changed in the area of the Kizhi skerries and the central part of the lake, which was confirmed by the Pearson's test. The concentration of all nitrogen forms and the values of N_{min}/TP ratio were decreased, but at the same time, the color values and concentrations of oils and CO₂ were increased. Apparently, intensive navigation due to the growing tourist flow has led to increasing of oil concentrations in the area of the Kizhi skerries. Other changes of chemical parameters were not caused by local anthropogenic influence and require further study. They may probably be associated with global processes, such as reducing industrial emissions of contaminants into the atmosphere or climate change.

Keywords: Water chemical composition, organic matter, nutrients, pollutants, climate change, anthropogenic impact, Lake Onega

Citation: Zobkova M. V. (2026), Current Water Chemical Composition of the Kizhi Skerries of Lake Onego and Its Dynamics Over the Last 30 Years, *Russian Journal of Earth Sciences*, 26, ES1017, <https://doi.org/10.2205/2026ES001059>, EDN: RYALAF

Received: March 28, 2025
Accepted: September 8, 2025
Published: April 21, 2026



© 2026. The Authors.

References

- Analytical, Kinetic and Computational Methods in Hydrochemical Practice / ed. by P. A. Lozovik and N. A. Efremenko. — St. Petersburg : Nestor-Istoriya, 2017. — 272 p. — (In Russian).
- Clark J. M., Bottrell S. H., Evans C. D., et al. The importance of the relationship between scale and process in understanding long-term DOC dynamics // *Science of The Total Environment*. — 2010. — Vol. 408, no. 13. — P. 2768–2775. — <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.02.046>.
- Dove A. and Chapra S. C. Long-term trends of nutrients and trophic response variables for the Great Lakes: Great Lakes nutrient trends // *Limnology and Oceanography*. — 2015. — Vol. 60, no. 2. — P. 696–721. — <https://doi.org/10.1002/lno.10055>.
- Galakhina N., Zobkov M. and Zobkova M. Current chemistry of Lake Onego and its spatial and temporal changes for the last three decades with special reference to nutrient concentrations // *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. — 2022. — Vol. 17. — P. 100619. — <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100619>.

- Garmo Ø. A., Skjelkvåle B. L., Wit H. A. de, et al. Trends in Surface Water Chemistry in Acidified Areas in Europe and North America from 1990 to 2008 // *Water, Air, & Soil Pollution*. — 2014. — Vol. 225, no. 3. — <https://doi.org/10.1007/s11270-014-1880-6>.
- Grennfelt P., Engleryd A., Forsius M., et al. Acid rain and air pollution: 50 years of progress in environmental science and policy // *Ambio*. — 2019. — Vol. 49, no. 4. — P. 849–864. — <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01244-4>.
- Ieshko E. P. and Martyanov R. S. Bulletin of Environmental Research on the Territory of the Kizhi Museum-Reserve for 2006. — Petrozavodsk : Kizhi Museum-Reserve, 2007. — 38 p. — (In Russian).
- Kalinkina N., Tekanova E., Korosov A., et al. What is the extent of water brownification in Lake Onego, Russia? // *Journal of Great Lakes Research*. — 2020. — Vol. 46, no. 4. — P. 850–861. — <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.02.008>.
- Kankaala P., Arvola L., Hiltunen M., et al. Ecosystem responses to increased organic carbon concentration: comparing results based on long-term monitoring and whole-lake experimentation // *Inland Waters*. — 2019. — Vol. 9, no. 4. — P. 489–502. — <https://doi.org/10.1080/20442041.2019.1600938>.
- Khodzher T. V., Domysheva V. M., Sorokovikova L. M., et al. Hydrochemical studies in Lake Baikal: history and nowadays // *Limnology and Freshwater Biology*. — 2018. — No. 1. — P. 2–9. — <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2018-a-1-2>.
- Lake Onega: Atlas / ed. by N. N. Filatova. — Petrozavodsk : Karelian Research Centre of the RAS, 2010. — 151 p. — (In Russian).
- Linnik P. N., Zhezherya V. A., Linnik R. P., et al. Metals in surface water of Ukraine: the migration forms, features of distribution between the abiotic components of aquatic ecosystems, and potential bioavailability // *Russian Journal of General Chemistry*. — 2015. — Vol. 85, no. 13. — P. 2965–2984. — <https://doi.org/10.1134/s1070363215130162>.
- Lozovik P. A. Hydrogeochemical Criteria for the State of Surface Waters in the Humid Zone and Their Resistance to Anthropogenic Impact : docthesi / Lozovik P. A. — 2006. — 481 p. — (In Russian).
- Lozovik P. A. Geochemical Classification of Surface Waters in the Humid Zone Based on Their Acid-Base Equilibrium // *Water Resources*. — 2013. — Vol. 40, no. 6. — P. 631–639. — <https://doi.org/10.1134/S0097807813060067>.
- Lozovik P. A., Kulik N. V. and Efremenko N. A. Lithophile elements and heavy metals in lake Onego: Sources, concentrations and transformation // *Proceedings of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*. — 2020. — No. 4. — P. 62–74. — <https://doi.org/10.17076/lim1189>. — (In Russian).
- Lozovik P. A. and Musatova M. V. Separation of organic materials of nature waters into autochthonous and allochthonous components by diethylaminoethyl-cellulose adsorption // *Bulletin of the MSRU. Series: Natural sciences*. — 2013. — No. 3. — P. 63–68. — (In Russian).
- Martyanov R. S. and Ieshko E. P. Bulletin of Environmental Research on the Territory of the Kizhi Museum-Reserve for 2009. — Petrozavodsk : Kizhi Museum-Reserve, 2010. — 36 p. — (In Russian).
- Martyanov R. S. and Ieshko E. P. Bulletin of Environmental Research on the Territory of the Kizhi Museum-Reserve. 2012. — Petrozavodsk : Kizhi Museum-Reserve, 2013. — 36 p. — (In Russian).
- Martyanov R. S. and Protasov Yu. G. Bulletin of Environmental Research on the Territory of the Kizhi Museum-Reserve (Karelia) for 2004. — Petrozavodsk : Kizhi Museum-Reserve, 2005. — 36 p. — (In Russian).
- Mazoyer F. and Houle D. Long-term temporal response of eastern canadian lakes chemistry along a large spatial gradient of atmospheric sulfate deposition // *Environmental Pollution*. — 2025. — Vol. 366. — P. 125498. — <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125498>.
- Ministry of Agriculture of Russia. On Approval of Water Quality Standards for Water Bodies of Fishery Importance, Including Standards for Maximum Permissible Concentrations of Harmful Substances in Waters of Water Bodies of Fishery Importance (as amended on June 13, 2024). Order No. 552 of December 13, 2016. — 2016. — (accessed: 17.03.2025) ; (in Russian).
- Moiseenko T. I., Bazova M. M., Dinu M. I., et al. Changes in the Geochemistry of Land Waters at Climate Warming and a Decrease in Acid Deposition: Recovery of the Lakes or Their Evolution? // *Geochemistry International*. — 2022. — Vol. 60, no. 7. — P. 685–701. — <https://doi.org/10.1134/s0016702922060039>.
- Protasov Yu. G. and Martyanov R. S. Bulletin of Environmental Research on the Territory of the Kizhi Museum-Reserve for 2003. — Petrozavodsk : Kizhi Museum-Reserve, 2004. — 40 p. — (In Russian).
- Report on the Activities of the Kizhi State Historical, Architectural and Ethnographic Museum-Reserve. 2021 / ed. by E. B. Bazegskoy. — Petrozavodsk : Kizhi Museum-Reserve, 2022. — 93 p. — (In Russian).
- Report on the Activities of the Kizhi State Historical, Architectural and Ethnographic Museum-Reserve. 2022 / ed. by E. B. Bazegskoy. — Petrozavodsk : Kizhi Museum-Reserve, 2023. — 94 p. — (In Russian).

- Rossi P., Shveykovskiy A., Fedorova E., et al. DPSIR Framework (Drivers, Pressures, States, Impacts and Responses) Case-Study of Four UNESCO National Parks and Reserves in Russia and Finland. — University of Oulu, 2021. — 196 p. — <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12886.22089>.
- Ryzhakov A. V., Zobkova M. V. and Lozovik P. A. Patterns in the concentration and distribution of phosphorus forms in water bodies of the humid zone // Proceedings of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences. — 2016. — No. 9. — P. 33–45. — <https://doi.org/10.17076/lim304>. — (In Russian).
- Sabylina A. V., Lozovik P. A. and Zobkov M. B. Water chemistry in Onega lake and its tributaries // Water Resources. — 2010. — Vol. 37, no. 6. — P. 842–853. — <https://doi.org/10.1134/S0097807810060102>.
- Sidorova A. I., Zobkova M. V., Fomina Yu. Yu., et al. The state of aquatic ecosystem according to hydrochemical and hydrobiological indicators of the Kizhi skerries area of Lake Onego during the ice period // Limnology and Freshwater Biology. — 2025. — No. 4. — P. 515–529. — <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-a-4-515>.
- Solovyeva N. F., Raspletina G. F., Forsh-Menshutkina T. B., et al. Hydrochemistry of Lake Onega and Its Tributaries. — L. : Nauka, 1973. — 243 p. — (In Russian).
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater / ed. by A. D. Eaton, A. E. Greenberg and L. S. Clesceri. — 20th. — Washington, D.C. : American Public Health Association, American Water Works Association, 1998.
- Stoddard J. L., Jeffries D. S., Lukewille A., et al. Regional trends in aquatic recovery from acidification in North America and Europe // Nature. — 1999. — Vol. 401, no. 6753. — P. 575–578. — <https://doi.org/10.1038/44114>.
- Vogt R. D., Arle J., Austnes K., et al. Trends and patterns in surface water chemistry in Europe and North America between 1990 and 2020, with a focus on calcium. — Oslo, Norway : ICP Waters report: 156/2024. Norwegian Institute for Water Research, 2024.
- Weyhenmeyer G. A., Prairie Y. T. and Tranvik L. J. Browning of Boreal Freshwaters Coupled to Carbon-Iron Interactions along the Aquatic Continuum // PLoS ONE. — 2014. — Vol. 9, no. 2. — e88104. — <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088104>.
- Wit H. A. de, Garmo Ø. A., Jackson-Blake L. A., et al. Changing water chemistry in one thousand Norwegian lakes during three decades of cleaner air and climate change // Global Biogeochemical Cycles. — 2023. — Vol. 37, no. 2. — <https://doi.org/10.1029/2022gb007509>.
- Zobkov M. B. Automated Information System "Processing of Hydrochemical Information and Assessment of Water Body Status (AIS "OGKHI)". RF Certificate of Computer Program No. 2010612351 dated 31.04.2010. — 2010. — 563 p. — (In Russian).
- Zobkova M. V. Assessment of Autochthonous, Allochthonous and Anthropogenic Components of Organic Matter in Surface Waters (Case Study of Water Bodies in Karelia) : Candidate thesis / Zobkova M. V. — Petrozavodsk, 2024. — 20 p. — (In Russian).