

УДК 556.314

## ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТРЕХ СОСЕДНИХ ОЗЕР БОЛЬШОГО СОЛОВЕЦКОГО ОСТРОВА

© 2025 г. К. В. Титова<sup>1,\*</sup>, А. А. Слобода<sup>1</sup>, И. С. Елисеева<sup>1</sup>,  
В. М. Быков<sup>1</sup>, Н. М. Кокрятская<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. акад. Н.П. Лавёрова Уральского отделения РАН, Архангельск, Россия

\*e-mail: ksyu\_sev@mail.ru

Поступила в редакцию 30.01.2024 г.

После доработки 15.10.2024 г.

Принята к публикации 28.12.2024 г.

Представлены результаты оценки современного состояния озер, относящихся ранее к одной системе (Верхний, Средний и Нижний Перт) и разделенных более 500 лет назад. Оценка по гидрохимическим показателям дана на основе историко-географического анализа данных, а также результатов исследования, выполненного в июле 2023 г. При включении оз. Средний Перт в озерно-канальную систему произошло изменение направления стока его вод. Озеро Нижний Перт стало менее проточным. В нетронутом виде осталось только оз. Верхний Перт. Показано, что это малые водоемы ледниково-тектонического происхождения со значительной максимальной глубиной. Основными источниками поступления ионов в озера являлись атмосферные осадки, поверхностные и грунтовые воды, для них характерны низкие значения жесткости и минерализации воды с доминированием в ионном составе хлоридов и натрия. Период исследования характеризовался обильным выпадением осадков, что привело к подъему уровня воды в исследуемых водоемах, но не нарушило стратификации озерных вод. Аэрация воды вплоть до 0.5-метрового придонного слоя препятствовала активизации процессов, связанных с анаэробной деструкцией органического вещества. Установлено, что различие в гидрохимических показателях оз. Верхний и Нижний Перт, не связанных в настоящее время друг с другом, определяются, в первую очередь, особенностями их водосборных территорий, в частности, заболоченностью и проточностью. Озеро Средний Перт отличается по гидрохимическим показателям от связанного с ним оз. Верхний Перт, поскольку испытывает сильное влияние вод западной озерно-канальной системы.

**Ключевые слова:** Соловецкий архипелаг, канальная система, малые озера, гидрохимические показатели

**DOI:** 10.31857/S2587556625020127

### ВВЕДЕНИЕ

Соловецкий архипелаг находится в Белом море на входе в Онежский залив, в 165 км южнее Северного полярного круга. Данные острова, а также 5-километровая акватория Белого моря, включены в состав особо охраняемой территории — Федерального государственного учреждения “Соловецкий государственный историко-архитектурный и природный музей-заповедник”. Общее количество озер архипелага составляет 376, причем 337 из них расположено на Большом Соловецком острове (Грицевская и др., 1972). По современным оценкам коли-

чество озер (включая озерки) может достигать 1000.

В ходе исследований в середине XX в. были выявлены особенности гидрографической сети острова, в частности, отсутствие рек и ярусное расположение озер. Сток пресных вод в Белое море наиболее четко выражен в трех направлениях. В губу Сосновскую сбрасывает воды система оз. Долгого, Лесного Большого и Горелого, в залив Благополучия поступают воды канальной системы озер, а воды озер северо-восточной группы стекают в губу Долгую. Водоемы сообщаются посредством ручьев,

проток или искусственных каналов, а иногда вообще не имеют стока.

По генезису котловин озера Большого Соловецкого острова можно разделить на четыре типа: ледниковые, ледниково-тектонические, реликтовые и вторичные. Большая часть озер относится к малым озерам к классам глубоких и очень глубоких водоемов, что является отличительной особенностью их морфологии. Соловецкие озера представляют собой водоемы замедленного водообмена с резко выраженной вертикальной слоистостью. Малые акватории, закрытость возвышенными берегами, большая глубина котловин являются причинами слабого динамического перемешивания водных масс в них (Грицевская и др., 1972). Ярусность расположения водоемов обусловлена постледниковым поднятием острова на несколько мм в год (Субетто и др., 2012), в результате чего разница высот между близлежащими озерами может достигать нескольких метров.

Около 50 озер, соединенных протоками различного генезиса, объединены в Западную и Восточную озерно-канальные системы (ОКС) (Грицевская и др., 1972; Захаров, 2013). При ее создании были возведены валунно-земляные дамбы, которые отделили несколько гидравлически связанных озер для перенаправления стока воды. К 1918 г. был сформирован окончательный облик современной западной озерно-канальной системы (Захаров, 2013; Натынник, Никишин, 1991) (рис. 1).

Создание этой озерно-канальной системы и использование ее для различных нужд Соловецкого монастыря привело к изменению гидрологического режима озер (то есть водоемов с замедленным водообменом): они стали проточными, площади водосборов некоторых озер возросли в несколько раз, другие же, наоборот, стали менее проточными. Таким образом, через основные озера Западной канальной системы транзитом проходят воды, поступающие с начала системы из оз. Большого Гремячего и Красного. Близость значений гидрокарбонатов и перманганатной окисляемости могут свидетельствовать о сравнительной однородности минерального и органического состава вод этой группы озер. По-видимому, малые канальные озера утратили значительные индивидуальные черты гидрохимического режима (Грицевская и др., 1972).

Целенаправленные гидрохимические исследования водных объектов самого большого острова архипелага проводили в начале XX в., в 1960-х, 1980-х, в начале 2000-х годов.

Работы по исследованию озер были проведены в 1882–1897 гг. сотрудниками биологической

станции Петербургского общества естествоиспытателей, но в доступе этих сведений не найдено. Дальнейшие обследования озер Большого Соловецкого острова относятся к лагерному этапу истории архипелага, к открытию Соловецкой биологической станции в 1926 г. (Захваткин и др., 1928). На основе проведенных обследований Большого Соловецкого острова был сделан ряд заключений. Так как питание соловецких озер идет за счет атмосферных осадков, как выпадающих непосредственно на акватории озер, так и стекающих по поверхности острова или через толщу его почв и грунтов, солевой режим находится во взаимосвязи с характером их водосборной площади. Озера, питающиеся за счет почв, должны отличаться большой бедностью солей, особенно солей, биологически важных (Захваткин, 1927).

Летом 1926 г. были сделаны промеры глубин, осуществлен отбор проб воды батометром с прикрепленным термометром. Анализы солевого состава соловецких озер производились в химической лаборатории Управления Соловецких лагерей особого назначения К. Е. Шильдером. Близость свойств воды озер западной канальной системы отмечена по цвету (оз. Большое Красное – зеленовато-желтоватая, оз. Валдай – желтовато-зеленоватая, оз. Щучье – желтоватая, оз. Средний Перт – желтоватая), по содержанию хлоридов (оз. Большое Красное – 13 мг/л, оз. Средний Перт – 13 мг/л), жесткости воды (оз. Большое Красное и Средний Перт – достигала 1.42 немецких градусов в обоих озерах (1 немецкий градус = 0.3566 мг-экв/л)) (Захваткин, 1927).

Гидрологические исследования были проведены в конце августа 1965 г. и в конце июля 1966 г. О величине колебаний минерализации воды в озерах судили только по содержанию гидрокарбонатов. Полный анализ воды на минеральный состав не производился. В этот период для оз. Средний и Верхний Перт было установлено только содержание железа 0.02–0.08 мг/л (Грицевская и др., 1972).

Исследования в рамках Морской арктической комплексной экспедиции проведены в 1988–1989 гг. Пробы отбирали на расстоянии 10 м от берега с глубины 0.5 м с целью оценки загрязнения водоемов. Для оз. Средний Перт были получены следующие результаты: pH 5.25, нет мутности, нет запаха, нет цвета, ХПК 3.36 мг О<sub>2</sub>/л, БПК<sub>5</sub> 12.4 мг О<sub>2</sub>/л, кислород 6.3 мг/л, хлориды 0.43 мг/л, сероводорода и нефтепродуктов нет (Савина, 1991).

В конце января – начале февраля 1989 г. исследования проведены сотрудниками МГУ имени М. В. Ломоносова. Из озер канальной

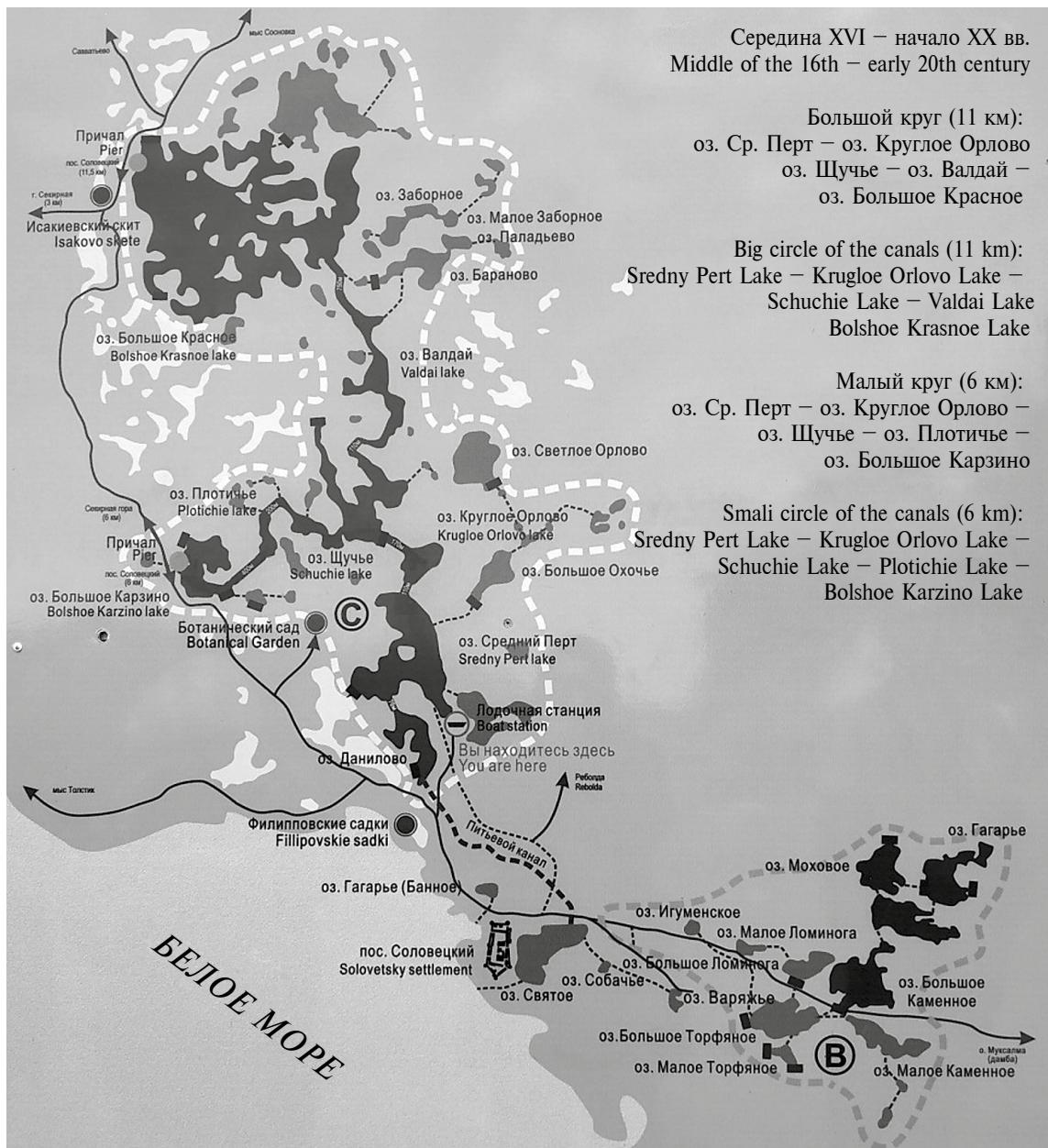


Рис. 1. Карта-схема западной озерно-канальной системы.

системы данные получены для оз. Средний Перт и Питьевое, также оз. Восточный (Верхний) Перт. Содержание хлоридов в оз. Средний Перт составляло 12.1 мг/л, в оз. Верхний Перт – 12.1 мг/л, Питьевое – 12.5 мг/л; жесткость (мг-экв/л): 0.5; 0.3 и 0.4 соответственно; минерализация (мг/л): 42, 50 и 30 соответственно (Отчет, 1989).

Для изучения гидрохимических особенностей внутренних водоемов летом в период 2001–2005 гг. из семи озер (Большое Карзино, Плотичье, Щучье, Круглое Орлово, Средний Перт, Нижний Перт, Святое) были отобраны пробы воды из верхнего слоя. Анализ проводили в испытательном лабораторном центре ФГУ “Центр Госсанэпиднадзора в Архангельской

области”. Полученные результаты показали близость гидрохимических показателей воды канальной системы оз. Щучье–Круглое Орлово–Средний Перт: pH – 6.78, 6.80, 6.86; щелочность (мг-экв/л): 0.60, нет данных, 0.60; хлориды (мг/л): 13, 15, 12; сульфаты (мг/л): 7.87, 7.60, 6.71; минерализация (мг/л): 50, 60, 44. В оз. Нижний Перт показатели были несколько отличными: pH 6.31; щелочность 0.25 мг-экв/л; содержание сульфатов 3.4 мг/л (Природная ..., 2007).

Проведенные авторами настоящей статьи с 2020 по 2022 г. исследования оз. Банное, Питьевое, Средний Перт (Западной ОКС), Биосадское (Восточной ОКС) и оз. Святое как приемника стока обеих систем показали,

что их воды отнесены к категории ультрапресных с очень низкой минерализацией (от 30 до 50 мг/л) и очень мягких (жесткость от 0.20 до 0.30 мг-экв/л) (см. рис. 1). В этот же период были изучены водоемы, не входящие в ОКС: оз. Большое Куможье, Нижний Перт, которые имели низкую минерализацию и жесткость вод, а также оз. Варваринское, характеризующееся повышенной минерализацией (от 110 до 156 мг/л). Было установлено, что островное положение водоемов оказывалось на ионном составе их вод — в отличие от континентальных гидрокарбонатно-кальциевых вод озер северной таежной зоны изученные водоемы характеризовались хлоридно-натриевым типом (Титова и др., 2020; Titova et al., 2023, 2024).

Целью настоящего исследования была оценка по гидрохимическим показателям современного состояния трех озер Большого Соловецкого острова: Верхний, Средний и Нижний Перт, относящихся ранее к одной гидрографической системе, с привлечением результатов историко-географического анализа.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования рассматриваются три озера: Верхний, Средний и Нижний Перт (рис. 2, табл. 1).

Озера имеют ледниково-тектоническое происхождение, по типу они димиктические, с возможным неполным сезонным перемещением (Драбкова, 1979; Хатчинсон, 1969).

*Озеро Верхний Перт.* Водоем, расположенный восточнее оз. Средний Перт, имеет лопастную форму с двумя удлиненными заливами в западной его части (см. рис. 2). Его воды из северо-западной части водоема через ручей/канал длиной 120 м поступают в северо-восточную часть оз. Средний Перт. Берега озера сильно заболочены, однако встречаются участки с выходами валунов и гальки, что характерно для южного побережья. Притоков не обнаружено. Центральная часть более глубоководная, в остальных частях глубина не превышает 4 м.

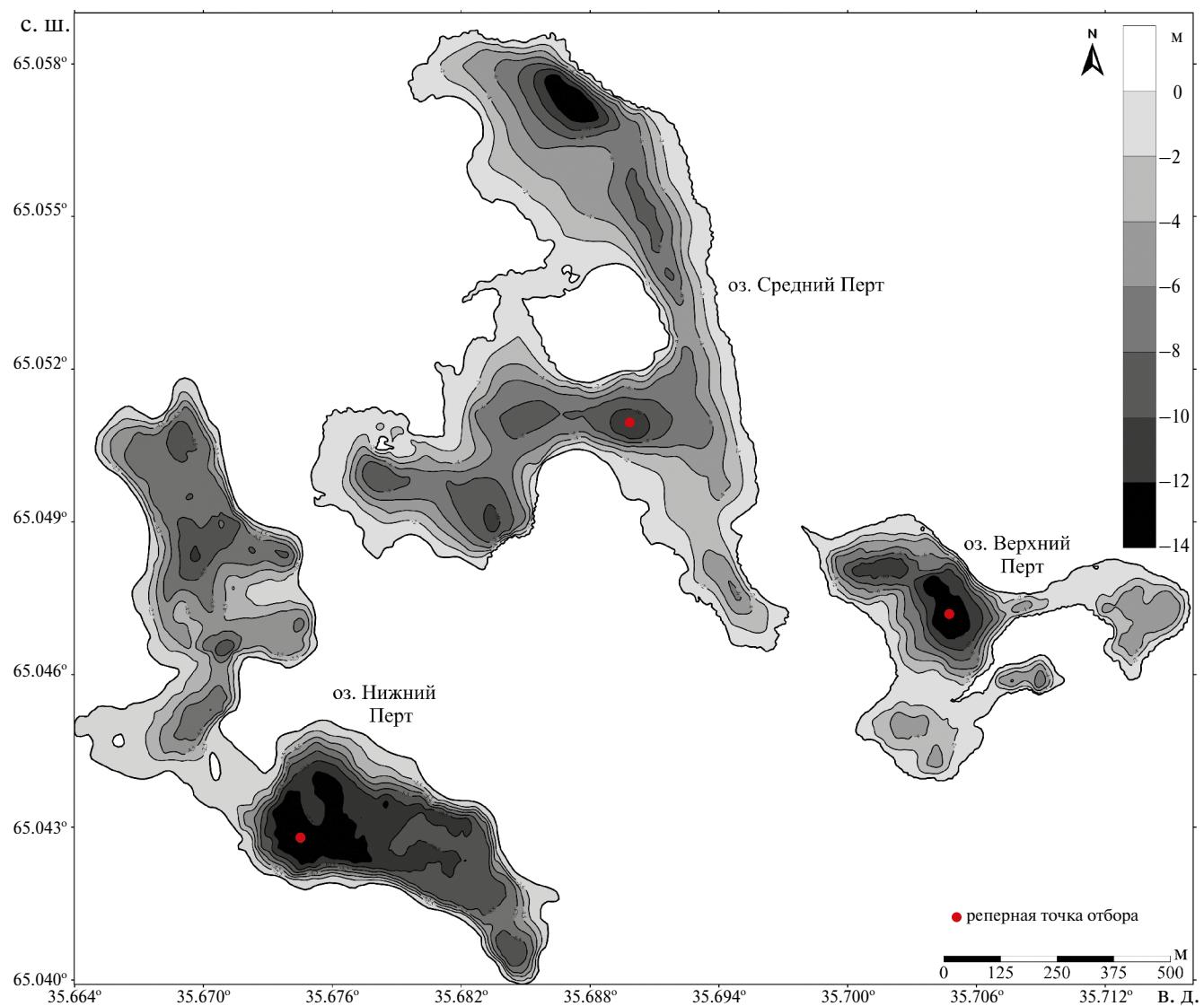
*Озеро Средний Перт.* Водоем, вытянутый с юго-востока на северо-запад, на юго-западе имеет залив, из которого выходит судоходный канал, соединяющийся с оз. Питьевое (см. рис. 2). В северной части в него поступают воды оз. Круглое Орлово, а в северо-восточной — оз. Верхний Перт и системы малых озер. Озеро отличается пересеченным рельефом дна, наличием нескольких впадин и островов (Грицевская и др., 1972) (см. рис. 2). Берега озера местами несильно заболочены (в основном на восточном

берегу в районе лодочной станции и на западном берегу), северный и южный берега водоема высокие, имеются скопления валунов разного размера. В южной оконечности озера — рукотворная насыпная каменисто- песчаная земляная дамба (см. рис. 2).

*Озеро Нижний Перт.* Водоем вытянутой формы с юго-востока на северо-запад (см. рис. 2). Берега северной котловины (верхняя) высокие каменистые, на выступе между котловинами низкая небольшая заболоченная территория, берега южной (нижней) котловины поросли лесом, сам берег каменисто-песчаный. Из этой части идет сток посредством мельничного канала, через оз. Мельничное в морской залив. Земляная дамба между оз. Нижний и Средний Перт находится в северо-восточной части первого и юго-западной части второго водоемов в месте их ближайшего соседства (см. рис. 2). В соответствии с батиметрической съемкой можно выделить две котловины, одна из которых, с наибольшей глубиной 12.5 м, лежит в средней части озера. Обособленные котловины отделяются островом, где наблюдаются выходы валунов и гальки — этот участок является особенно мелководным (<1 м) (см. рис. 2).

На оз. Верхний Перт в настоящее время не обнаружено источников прямого антропогенного воздействия. В восточной части оз. Средний Перт расположена лодочная станция, с которой начинается большая часть экскурсионных маршрутов по озерно-канальной системе. В 4 км от Соловецкого монастыря на западном берегу оз. Нижний Перт находится Ботанический сад (бывшая Макарьевская пустынь, основанная в 1822 г.).

Исследования озер начались с проведения промерных работ. Их осуществляли на надувной гребной лодке с использованием Humminbird GPS-Fishfinder 363 с параллельной фиксацией координат и глубины водоема в конкретной точке. Сезон летней межени характеризуется стратификацией вод. Перед проведением исследований в начале и середине июля 2023 г. в Архангельской области, в том числе на Соловецком архипелаге, за короткий период выпало значительное количество осадков из-за пришедшего циклона. Уровень воды в исследованных озерах в этом году был почти на 0.5–1 м выше, чем в предыдущие. Для оз. Верхний и Нижний Перт изучались самые глубоководные участки (разница в глубинах батиметрической съемки и отбора образцов могли быть связаны с небольшой погрешностью измерения эхолота при динамическом измерении глубин) (см. рис. 2, табл. 1). На оз. Средний Перт самый глубоководный участок (до 14.3 м) не был выбран по причине



**Рис. 2.** Карта-схема расположения объектов исследования и станций отбора проб (красные точки).

**Таблица 1.** Краткие морфометрические характеристики исследуемых озер

Озеро	Координаты станций исследуемых озер, град		L, м	B, м	S, км <sup>2</sup>	Глубина, м	
	с. ш.	в. д.				макс.	ср.
Верхний Перт	65.047565	35.704566	567	775	0.1965	12.5	3.9
Средний Перт	65.05122	35.69176	1514	953	0.6495	14.3/8.5*	4.6
Нижний Перт	65.04308	35.67365	1713	367	0.428	13.5/12.5*	6.1

*Примечание:* L — длина озера, B — максимальная ширина озера, S — площадь озера; \* — глубина в месте отбора. Калькулятор для расчета площади и расстояния на Google Картах: <https://www.mapsdirections.info/ru/> (дата обращения 19.09.2023).

того, что он расположен сразу на выходе канала из оз. Круглое Орлово и затрагивает активно используемый туристический маршрут на гребных лодках по канальной системе. Поэтому был выбран второй глубоководный участок около острова (8.5 м), почти посередине озера (см. рис. 2), он в большей степени отражает суммарное влияние всех притоков ввиду отсутствия рекреационной нагрузки на водоем, т.е. в стороне от прохождения лодочных экскурсий.

На указанных участках были измерены температурный и кислородный профили с дискретностью 0.5 м с помощью оксиметра с люминесцентным датчиком. На основании полученных данных выбраны горизонты отбора в зависимости от равномерности изменения вышеуказанных показателей.

Пробы воды отобраны по слоям горизонтальным поликарбонатным батометром объемом 2 л. Отбор осуществлен с лодки в конце июля 2023 г. для определения гидрохимических показателей в соответствии с ГОСТ Р 59024-2020<sup>1</sup>. На оз. Верхний и Средний Перт отобраны пробы с 4 горизонтов, в оз. Нижний Перт – с 6 горизонтов. В случае необходимости применялась консервация проб, они доставлялись в стационарную лабораторию в г. Архангельске с соблюдением сроков и способов хранения.

Измерения физико-химических показателей (электропроводность, pH) производились *in situ* согласно инструкциям к приборам с помощью портативного pH-метра HI 83141 с точностью ±0.01 и портативного многодиапазонного (с 4 диапазонами измерений) кондуктометра HI 8733 с точностью ±3 полной шкалы, оба прибора с автоматической температурной компенсацией. Анализ проб воды проводился по апробированным и общепринятым методикам<sup>2</sup> в условиях

<sup>1</sup> ГОСТ Р 59024-2020. Вода. Общие требования к отбору проб. Национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2022-06-01. М.: Российский ин-т стандартизации, 2023. 57 с.

<sup>2</sup> ГОСТ 31868-2012. Вода. Методы определения цветности: дата введения 2014-01-01. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.; ГОСТ 31957-2012. Вода. Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов: дата введения 2014-01-01. М.: Стандартинформ, 2013. 30 с.; ГОСТ 31958-2012 Вода. Методы определения содержания общего и растворенного органического углерода (ISO 8245:1999, NEQ): дата введения 2014-01-01. М.: Стандартинформ, 2013. 15 с.; ПНД Ф 14.1:2.2.4-95. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации нитрат-ионов в природных и сточных водах фотометрическим методом с салициловой кислотой. М.: Изд-во Гос. Комитета РФ по охране окружающей среды, 1995. 15 с.; ПНД Ф 14.1:2.4.132-98. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации анионов: нитрита, нитрата, хлорида, фторида, сульфата и фосфата в пробах природной питьевой и сточной воды методом ионной хроматографии. М.: Изд-во

полевой и стационарных лабораторий. Минерализация определялась как сумма главных ионов. Вклад ионов вычислялся по содержанию ионов в мг-экв/л.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По площади (см. табл. 1) изученные озера относятся к очень малым (0.1–1) км<sup>2</sup> [по П.В. Иванову (Китаев, 2007)], при этом они классифицируются как водоемы с повышенной максимальной глубиной (12.5–25) м (Китаев, 2007). Их размеры связаны с ледниковым происхождением котловин.

По классификации (Алекин, 1970; Гусева, 2007; Китаев, 2007; Atabieva and Vishnevetskaya, 2022; Ferreira-Pego et al., 2016) воды исследованных озер по усредненным значениям минерализации в период летней стратификации были отнесены к категории ультрапресные (<100 мг/л) — Верхний Перт (19.78) < Средний Перт (27.10) < Нижний Перт (34.64). Изменения этого показателя по водному столбу были незначительны от 0 до 3 мг/л. Различия показателей в основном обусловлены разницей содержания гидрокарбонатов (табл. 2, рис. 3). По сравнению с прошлым годом среднее значение минерализации для оз. Средний и Нижний Перт снизилась на 1–4 мг/л. Доминирующими среди анионов был хлорид-ион, среди катионов — натрий (см. табл. 2). При этом для озер подзон северной тайги и лесотундры характерны слабоминерализованные карбонатно-кальциевые воды (Алекин, 1970; Китаев, 2007). Формирование химического состава вод соловецких озер происходит в условиях малой мощности рыхлых отложений, слаборастворимых почвообразующих пород и сильно оподзоленных почв. Исследования прошлых лет подтвердили схожесть по макрокомпонентному составу вод различного типа (грунтовых, атмосферных) при слабом

Гос. Комитета РФ по охране окружающей среды, 2008. 21 с.; ПНД Ф 14.1:2.214-06. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовых концентраций железа, кадмия, кобальта, марганца, никеля, меди, цинка, хрома и свинца в природных и сточных водах методом пламенной атомно-абсорбционной спектрофотометрии. М.: Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия, 2006. 9 с.; РД 52.24.450-2010. Массовая концентрация сероводорода и сульфидов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с N,N-диметил-п-фенилендиамином. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2010. 50 с.; Агатова А.И., Сапожников В.В., Аржанова Н.В., Мордасова Н.В., Лапина Н.М., Зубаревич В.Л., Лукьянова О.Н., Торгунова Н.И. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.

Таблица 2. Гидрохимические показатели озер Верхний, Средний и Нижний Перт\*

Показатель	Верхний Перт	Средний Перт	Нижний Перт
Электропроводность, мкСм/см	$\frac{45}{46-44}$	$\frac{57}{57-56}$	$\frac{70}{71-69}$
Жесткость, мг-экв/л (ммоль/л)	$\frac{0.12}{0.11-0.13}$	$\frac{0.21^{**}}{0.20-0.20}$	$\frac{0.29}{0.27-0.31}$
Сумма главных ионов, мг/л	$\frac{19.78}{19.77-19.79}$	$\frac{27.10^{**}}{27.69-27.54}$	$\frac{34.64}{32.85-35.78}$
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мкг/л	$\frac{33}{27-49}$	$\frac{10}{10-12}$	$\frac{29}{27-33}$
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , мкг/л	$\frac{1}{1-1}$	$\frac{3}{2-3}$	$\frac{1}{1-1}$
P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мкг/л	$\frac{1}{1-0}$	$\frac{1}{0-1}$	$\frac{2^{**}}{1-0}$
Si, мкг/л	$\frac{1080}{245-1665}$	$\frac{1593}{1329-2187}$	$\frac{1535}{832-2203}$
N вал, мкг/л	$\frac{53}{52-58}$	$\frac{162}{130-195}$	$\frac{146}{126-164}$
P вал, мкг/л	$\frac{3}{4-3}$	$\frac{2}{1-3}$	$\frac{7}{4-11}$
Органическое вещество (Сорг), мг/л	$\frac{10.06}{9.98-10.31}$	$\frac{8.53}{8.60-8.58}$	$\frac{8.55}{8.49-9.02}$
Цветность, град	$\frac{56}{47-62}$	$\frac{37}{35-40}$	$\frac{27}{27-28}$
Fe раст, мкг/л	$\frac{323}{76-535}$	$\frac{62}{57-159}$	$\frac{28}{12-70}$
H <sub>2</sub> S/HS <sup>-</sup> , мкг/л	$\frac{4}{4-5}$	$\frac{3}{3-4}$	$\frac{2}{1-3}$

Примечание: \* — над чертой — среднее взвешенное значение, под чертой — поверхностный-придонный горизонт; \*\* — максимальные значения показателя отмечены в средних горизонтах.

инфилтратионном воздействии почвенного покрова. Доминирование ионов морской воды связано с поступлением различными путями в озера атмосферных осадков, обогащенных хлоридами и натрием при поступлении их с аэрозолями (Titova et al., 2024). На количество же самих ионов может влиять расстояние до моря (Титова и др., 2022). Отличительной особенностью всех соловецких озер, и в частности, оз. Верхний, Средний и Нижний Перт являются небольшие концентрации ионов кальция по сравнению с континентальными водоемами той же природной зоны (Кокрятская и др., 2019). При этом в воде содержатся незначительные концентрации ионов магния, что отличает островные водоемы от чисто морской воды. По максимальным значениям содержания в воде хлорид-ионов и натрия отмечена взаимосвязь с расстоянием водоема до моря (ближе всего

к нему расположено оз. Нижний Перт) — см. рис. 3. Но по средним значениям вклада этих же ионов в состав анионов и катионов водной толщи выявлена тенденция их увеличения для самого отдаленного озера (см. рис. 3 и 4) (от 24 до 36% и от 24 до 29% соответственно). Это связано с перераспределением доли макрокомпонентов в воде, с уменьшением вклада гидрокарбонат-ионов и кальция. Стоит отметить, что выявлены практически одинаковые по вкладу количества всех ионов в гидравлически связанных оз. Средний Перт и Питьевое (см. рис. 4), что свидетельствует о близости содержания главных ионов в водоемах канальной системы.

Значение электропроводности для вод всех исследованных в данной работе озер снижалось, хотя и немного, от поверхностного горизонта к придонному. Такая же тенденция отмечена для

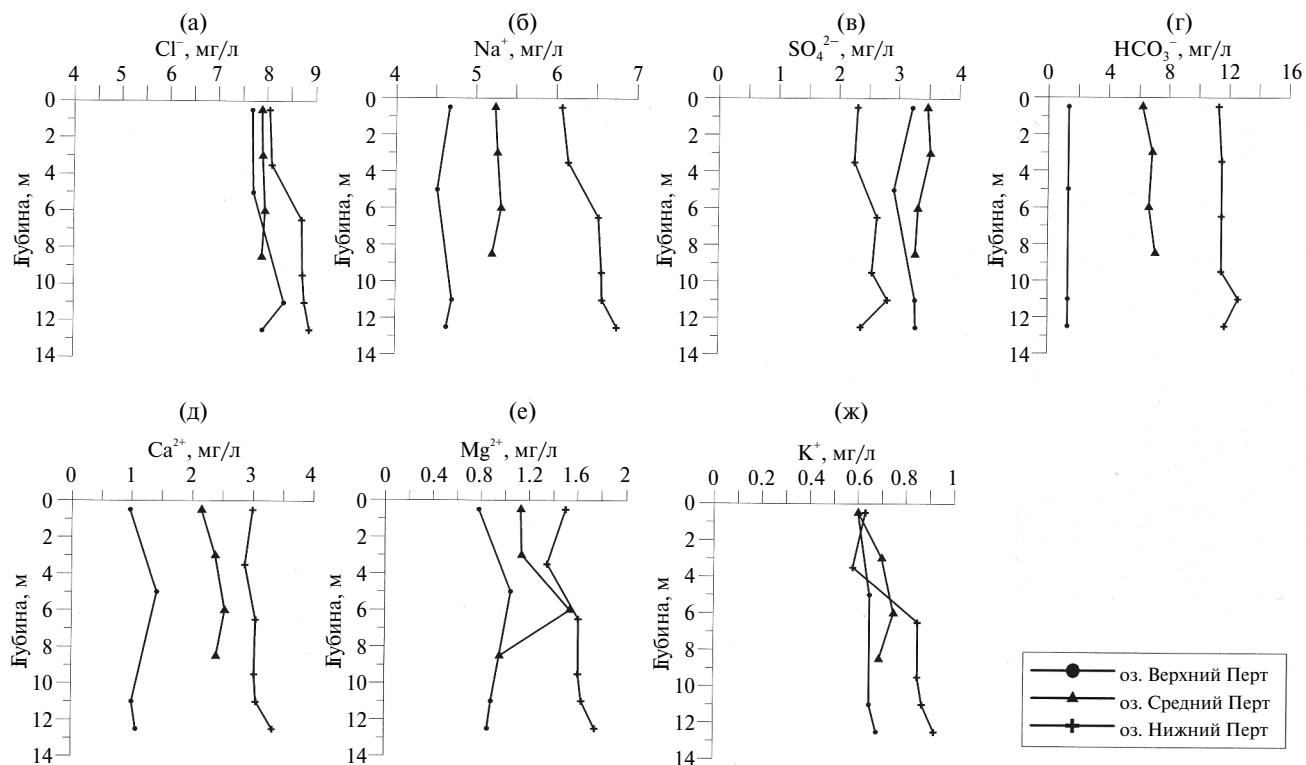


Рис. 3. Содержание главных ионов в воде оз. Верхний, Средний и Нижний Перт.

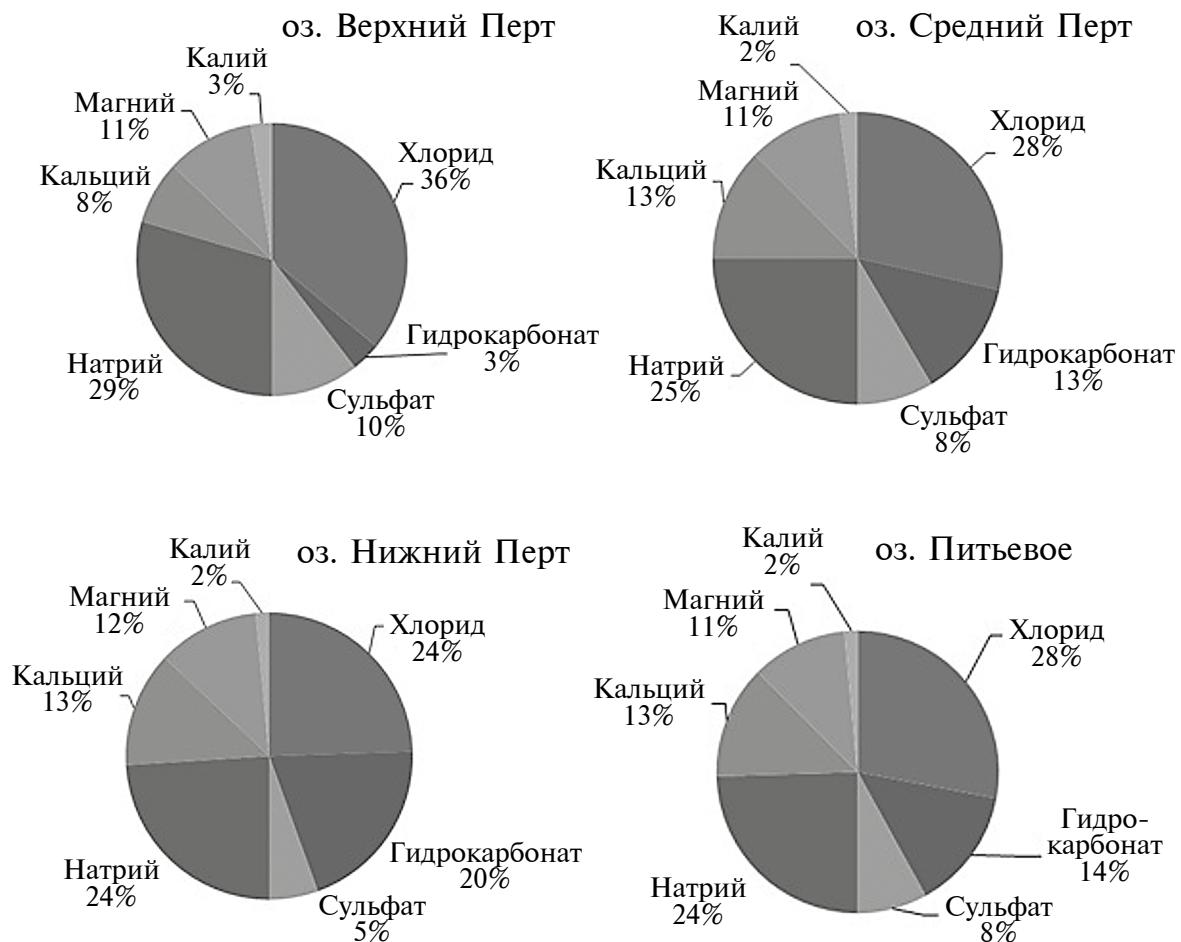


Рис. 4. Распределение ионов (%-экв.) в воде оз. Верхний, Средний, Нижний Перт и Питьевое.

изменения суммы главных ионов вод. Но при этом концентрации самих ионов изменялись по-разному: либо снижались ко дну, либо возрастали. Этот показатель по усредненному значению увеличивался в воде от оз. Верхний Перт к оз. Нижний Перт. В воде оз. Верхний Перт практически отсутствуют гидрокарбонаты (см. рис. 3 и 4), больше всего их в воде оз. Нижний Перт.

Воды исследованных озер относились к категории очень мягкие – жесткость не превышала 1.5 ммоль/л (Китаев, 2007) (см. табл. 2): Верхний Перт (0.12) < Средний Перт (0.21) < Нижний Перт (0.29). Наибольший вклад в эту величину вносят для воды оз. Верхний Перт ионы магния, для двух других – ионы кальция (по содержанию в ммоль/л = мг-экв/л). В целом доминирование соединений кальция над магниевыми в воде подтверждает пресноводность озер, так как в морской воде преобладают ионы магния (их больше почти в 4 раза). Столь же низкая жесткость воды, как в оз. Верхний Перт, была отмечена для оз. Биосадское (0.15).

В период исследований наблюдалась прямая температурная стратификация. Температура воды изменялась от 19°C до 8.8°C (оз. Средний Перт) и до 4.8°C для двух других водоемов (рис. 5). Содержание кислорода в воде трех озер изменилось от 9.50 мг/л в поверхностном слое до 4 мг/л на глубине 0.5 м от дна в оз. Верхний и Нижний Перт и 2.8 мг/л в оз. Средний Перт. В придонных слоях этих водоемов отмечено практически полное исчерпание кислорода, за исключением оз. Средний Перт (см. рис. 5).

При небольших концентрациях сульфатов в воде исследуемых водоемов, в целом, содержание сероводорода (при измеренных значениях pH находящегося в воде в виде гидросульфида и в молекулярной форме в различных соотношениях) не превышало 5 мкг/л (ПДК для рыбохозяйственных водоемов)<sup>3</sup>.

По значению pH воды исследованных водоемов можно отнести (Никаноров, 2009): к кислым (pH 3–5) – Верхний Перт; нейтральным (6.5–7.5) – Средний и Нижний Перт. Для всех водоемов снижение pH отмечено от поверхностных к придонным слоям воды (см. рис. 5). Для ранее изученных водоемов на территории Архангельской области (Chupakov et al., 2017) низкие значения pH были связаны с большим

содержанием гумусовых кислот и изменением количества солей, способных к гидролизу. При этом значительную часть органического вещества поверхностных вод северных районов составляют гуминовые и фульвовые кислоты, которые присутствуют в болотных водах (Atabieva and Vishnevetskaya, 2022). В свою очередь, содержание гумусовых кислот и железа определяют цветность вод.

Исследованные озера по степени окрашенности (цветности, град) (см. табл. 2) их вод (Фортунатов, 1959) относились к следующим группам: слабоокрашенные (20–39) – Нижний и Средний Перт; средне-окрашенные (40–59) – Верхний Перт. По сравнению с 2021 и 2022 гг. для оз. Нижний и Средний Перт цветность снизилась на несколько градусов (Верхний Перт изучался авторами впервые) из-за поступления большого количества воды и подъема ее уровня. Если применить норматив по цветности для питьевой воды согласно СанПиН 2.1.4.1074-01<sup>4</sup>, то только слабоокрашенные воды оз. Нижний и Средний Перт не превышают норматив в 35 град. Авторы применяли стандарты для оценки качества воды в водоемах, так как за исключением оз. Нижний Перт, остальные два косвенно могут влиять на качество воды водотока питьевого назначения, берущего начало из оз. Питьевого (см. рис. 2). Общее содержание органического вещества ( $C_{опр}$ ) (мг/л) составляло в среднем в воде оз. Верхний Перт (10.06), Средний Перт (8.53) и Нижний Перт (8.55). В норме этот показатель не должен превышать 3 мг/л (Chupakov et al., 2017). Но для природных озер такое содержание органического вещества свидетельствует о низком его уровне (<15 мг/л) (Лозовик и др., 2006). При этом для воды оз. Верхний Перт коэффициент парной корреляции для параметров  $C_{опр}$  и цветность составлял ( $r^2 = 0.78, p = 0.05$ ) (значимая корреляция). Следовательно, это может быть свидетельством значительного вклада именно гумусовых веществ в  $C_{опр}$ . В двух других озерах при близких средних значениях содержания органического вещества цветность отличалась почти на 10 градусов, в оз. Нижний Перт с наименее окрашенной водой взаимосвязь между показателями была значима ( $r^2 = 0.80, p = 0.05$ ), что, возможно, связано с преобладанием в составе гумусовых веществ менее окрашенных фульвовых кислот (на берегу есть болото, но при этом воды озера прозрачны) или других факторов. В оз. Средний Перт зна-

<sup>3</sup> 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” (Зарегистрировано в Минюсте России 13.01.2017 N 45203). М.: Минсельхоз, 2016. 91 с.

<sup>4</sup> СанПиН 2.1.4.1074-01 Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения. Постановление от 26 сентября 2001 г. № 24. М.: Главный государственный санитарный врач, 2002. 46 с.

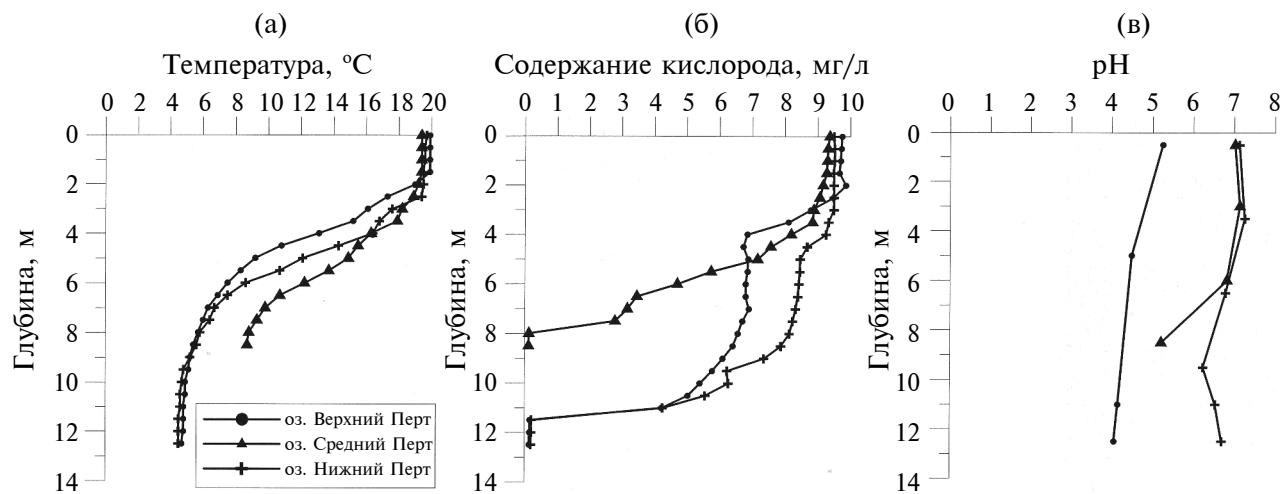


Рис. 5. Температурный и кислородный профили и pH воды оз. Верхний, Средний, Нижний Перт.

чимое влияние гумусовых веществ не отмечено. Содержание соединений железа изменялось согласованно с изменением цветности: минимальное его количество отмечено в воде оз. Нижний Перт, максимальное – оз. Верхний Перт (см. табл. 2). Значимые корреляции были выявлены между цветностью и содержанием железа в воде оз. Верхний и Средний Перт.

Содержание соединений азота и фосфора в воде исследуемых озер было очень малым (см. табл. 2). Концентрации фосфатов и валовое содержание фосфора в расчете на фосфор ( $\text{P-PO}_4$ ) не превышали 5 мкг/л. Валовое содержание соединений азота в расчете на азот составляло не более 200 мкг/л. Последняя величина в 2–3 раза меньше по сравнению с таковой для воды озер в 2022 г. (Titova et al., 2024). Содержание кремния в воде, определяющееся вкладом выветривания из кремниесодержащих пород и минералов, было наибольшим для оз. Нижний и Средний Перт (см. табл. 2), что в 1.5 раза выше, чем в предыдущем году<sup>5</sup>.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование современных инструментальных методов и приборов позволило получить сведения о гидрохимических характеристиках трех исследованных водоемов: ранее не измеряемых показателях (например, содержания кислорода, растворенного органического вещества, цветности) и более достоверные результаты по значениям pH, электропроводности, содержании главных ионов, биогенных элементов. Некоторые применяемые методы “мокрой химии” давали завышенные результаты из-за

наличия неустранимого влияния различных компонентов в пробе воды, поэтому в статье не проводится сравнение полученных авторами и другими исследователями результатов.

В ходе проведенных исследований оз. Верхний, Средний и Нижний Перт Большого Соловецкого острова в меженный период в июле 2023 г. была подтверждена низкая минерализация их вод (менее 40 мг/л), которая была установлена и для других озер этого острова, непосредственно не связанных с морем и давно утративших с ним связь.

В исследованных водоемах отмечено различие практически по всем основным гидрохимическим показателям. Сходным являлось распределение главных ионов с доминированием хлорида и натрия, обусловленное их островным расположением.

Обильное выпадение осадков перед началом исследований привело к подъему уровня воды в озерах и уменьшению практически всех гидрохимических показателей по сравнению с предыдущими годами для ранее изученных озер, за исключением содержания ионов кальция.

Обнаружены значительные содержания кислорода вплоть до глубины 0.5 м от поверхности донных отложений, полное его отсутствие в придонном слое в оз. Верхний и Нижний Перт и сохранение в концентрации до 2 мг/л в оз. Средний Перт (обусловленное его пропоностью), что определило наличие незначительных концентраций продуктов анаэробных процессов деструкции органического вещества.

Различия в гидрохимических показателях явно выражено в настоящий момент в не связанных друг с другом оз. Верхний и Нижний Перт, что определяется, в первую очередь, водосборами этих озер. В воде последнего отме-

<sup>5</sup> ГОСТ Р 58556-2019 Оценка качества воды водных объектов с экологических позиций: дата введения 2020-05-01. М.: Стандартинформ, 2019. 16 с.

чены самая низкая цветность воды, содержание железа и в среднем содержание органического углерода, но при этом, большая минерализация воды, обусловленная наибольшим среди других озер содержанием гидрокарбонатов. Особенностью воды оз. Верхний Перт являлось низкое значение pH (максимум 5.25) при практически полном отсутствии гидрокарбонатов, очень малые значения минерализации, а также жесткости воды (то есть низкие концентрации ионов кальция и магния), наименьшие содержания валовых форм биогенных элементов, связанные с наибольшей заболоченностью его водосбора. Наблюдаются признаки дистрофического состояния водоема, при этом цветность его воды все же в 2 раза меньшая, чем, например, для сходного по показателям дистрофного оз. Биосадское на Большом Соловецком острове.

Озеро Средний Перт, связанное с Верхним Пертом, также отличается от него по гидрохимическим показателям, что связано с большим влиянием вод западной озерно-канальной системы, о чем свидетельствует схожее распределение главных ионов в воде этого водоема и связанного с ним канальной системой оз. Питьевое.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках госзадания ФИЦКИА УрО РАН.

## FUNDING

The work was carried out within the framework of the state assignment of the FCIARctic UB RAS.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Алекин О.А.* Основы гидрохимии. Л.: ГИМИЗ, 1970. 444 с.

*Грицевская Г.Л., Кябелева Г.К., Николаева Л.А., Семенов В.Н.* Соловецкие острова: матер. по комплексному изучению озер. Петрозаводск: Изд. Карелия, 1972. Т. 6. С. 5–44.

*Гусева Т.В., Молчанова Я.П., Заика Е.А., Виниченко В.Н., Аверочкин Е.М.* Гидрохимические показатели состояния окружающей среды: справочные материалы / отв. ред. Т.В. Гусева. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2007. 192 с.

*Драбкова В.Г., Сорокин И.Н.* Озеро и его водосбор — единая природная система. Л.: Наука, 1979. 195 с.

*Захаров Ю.С.* Озерно-канальные системы на островах Соловецкого архипелага. Соловецкий сб. / ред. А.Я. Мартынов и др. Архангельск: Соловец. гос. ист.-архитект. и природ. музей-заповедник, 2013. С. 94–135.

*Захваткин А.А., Сахаров Н., Юрканский В.* К познанию природы Соловецких островов. Соловки, 1928. 56 с.

*Захваткин А.А.* Соловецкие озера: краткий гидробиологический очерк. Соловки: Бюро печати УСЛОН, 1927. 142 с.

*Китаев С.П.* Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский науч. центр, 2007. 395 с.

*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. Фед. ун-та. Сер. Биология. 2019. Т. 12. № 2. С. 147–159.

<https://doi.org/10.17516/1997-1389-0036>

*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.

*Натынник А.А., Никишин Н.А.* Озерно-канальные водохозяйственные системы Соловецких островов // Неизвестные Соловки. Тр. Морской Арктической комплексной экспедиции Памятники истории освоения Арктики / отв. ред. П.В. Боярского. М.: Янус, 1991. С. 53–58.

*Никаноров А.М.* О некоторых фундаментальных понятиях теоретической гидрохимии // ДАН. 2009. Т. 429. № 5. С. 679–682.

Отчет. Гидролого-гидрохимические исследования озер Б. Соловецкого острова / под ред. Н.Л. Фроловой, Л.Е. Жидаревой. СГИАПМЗ, 1989. 64 с.

Природная среда Соловецкого архипелага в условиях меняющегося климата / под ред. Ю.Г. Шварцмана, И.Н. Болотова. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 184 с.

*Савина Е.А.* Определение степени загрязненности вод открытых водоемов Соловецкого архипелага // Неизвестные Соловки. Тр. Морской Арктической комплексной экспедиции Памятники истории освоения Арктики / под общ. ред. П.В. Боярского. М., 1991. С. 67–72.

*Субетто Д.А., Шевченко В.П., Лудикова А.В., Кузнецова Д.Д., Сапелко Т.В., Лисицын А.П., Евзеров В.Я., ван Беек П., Сую М., Субетто Г.Д.* Хронология изоляции озер Соловецкого архипелага и скорости современного озерного осадконакопления // ДАН. 2012. Т. 446. № 2. С. 183–190.

*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 // Успе-

- хи современного естествознания. 2020. № 11. С. 125–131.
- Titova K.V., Kokryatskaya N.M., Zhibareva T.A., Sloboda A.A.* Гидрохимические и геохимические исследования прибрежных водоемов Большого Соловецкого острова // XXIX Береговая конференция: Натурные и теоретические исследования – в практику берегопользования: сб. матер. Всерос. конф. с международ. уч. Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта, 2022. С. 447–449.
- Fortunatov M.A.* Цветность и прозрачность воды Рыбинского водохранилища как показатель его режима // Тр. Ин-та биологии водохранилищ АН СССР. 1959. Вып. 2 (25). С. 246–357.
- Хатчинсон Д.* Лимнология: Географические, физические и химические характеристики озер / пер. с англ. Г.В. Цыцарина и Г.Г. Шинкар. М.: Прогресс, 1969. 592 с.
- Atabieva F.A., Vishnevetskaya E.V.* Variability of mineralization of the rivers of the central Caucasus // Int. J. of Applied and Fundamental Res. 2022. № 7. P. 13–16.  
<https://doi.org/10.17513/mjpf.13406>
- Chupakov A.V., Chupakova A.A., Moreva O.Yu., Shirokova L.S., Zabelina S.A., Vorobieva T.Y., Klimov S.I., Brovko O.S., Pokrovsky O.S.* Allochthonous and autochthonous carbon in deep, organicrich and organic-poor lakes of the European Russian subarctic // Boreal Environ. Res. 2017. Vol. 22. P. 213–230.
- Ferreira-Pego C., Babio N., Maraver F., Vitoria I., Salas-Salvado J.* Water mineralization and its importance for health // NutriSalud. 2016. Vol. 23. № 1. P. 4–18.
- Titova K.V., Kokryatskaya N.M., Popov S.S., Moreva O.Yu., Sloboda A.A., Klimov S.I., Bykov V.M., Prilutskaya N.S.* Hydrochemical characteristics of Lakes of different types on Bolshoi Solovetskii island // Water Res. 2024. Vol. 51. № 1. P. 61–71. <https://doi.org/10.1134/S0097807823700641>
- Titova K.V., Zhibareva T.A., Sloboda A.A., Popov S.S., Kokryatskaya N.M., Eliseeva I.S.* Formation of the ionic composition of water using the example of a small lake on the Big Solovetsky Island // Water Res. 2023. Vol. 50. Suppl. 3. P. S366–S370.  
<https://doi.org/10.1134/S0097807823700628>

## Features of the Hydrochemical Characteristics of Three Neighboring Lakes of the Big Solovetsky Island

K. V. Titova<sup>a,\*</sup>, A. A. Sloboda<sup>a</sup>, I. S. Eliseeva<sup>a</sup>, V. M. Bykov<sup>a</sup>, and N. M. Kokryatskaya<sup>a</sup>

<sup>a</sup>N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research Ural Branch RAS, Arkhangelsk, Russia

\*e-mail: ksyu\_sev@mail.ru

The results of an assessment of the current state of lakes that previously belonged to one system (Verkhni, Srednii, and Nizhnii Pert lakes) and were separated more than 500 years ago are presented. The assessment is given based on hydrochemical indicators based on historical and geographical analysis of data, as well as the results of a study carried out in July 2023. Previously, these lakes have not been jointly and comprehensively studied. The Srednii Pert Lake was included into the lake-canal system, and the direction of its water flow changed. The Nizhnii Pert Lake has become less flowy. Only the Verkhni Pert Lake remained untouched. It is shown that these are small reservoirs of glacial-tectonic origin with a significant maximum depth. Due to the fact that the main sources of ions entering the lakes were precipitation, surface and groundwater, they are characterized by low values of water hardness and major ions content with a predominance of chlorides and sodium in the ionic composition. The study period (July, 2023) was characterized by heavy precipitation, which led to an increase in water levels in the studied reservoirs, but did not disrupt the stratification of lake waters. Aeration of water down to the 0.5-meter bottom layer prevented the activation of processes associated with anaerobic destruction of organic matter. It has been established that the difference in hydrochemical parameters is clearly expressed in Verkhni and Nizhni Pert lakes, which are currently not connected with each other, which is determined, first of all, by the characteristics of their drainage areas, in particular, swappiness and flow. The Srednii Pert Lake also differs in hydrochemical parameters from its associated the Verkhni Pert Lake, as it is strongly influenced by the waters of the western lake-canal system.

**Keywords:** Solovetsky Islands, canal system, small lakes, hydrochemical indicators

## REFERENCES

- Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Fundamentals of Hydrochemistry]. Leningrad: GIMIZ Publ., 1970. (In Russ.).
- Atabieva F.A., Vishnevetskaya E.V. Variability of mineralization of the rivers of the central Caucasus. *Int. J. Fundam. Appl. Res.*, 2022, no. 7, pp. 13–16. <https://doi.org/10.17513/mjpf.13406>
- Chupakov A.V., Chupakova A.A., Moreva O.Yu., Shirokova L.S., Zabelina S.A., Vorobieva T.Y., Klimov S.I., Brovko O.S., Pokrovsky O.S. Allochthonous and autochthonous carbon in deep, organicrich and organic-poor lakes of the European Russian subarctic. *Boreal Env. Res.*, 2017, vol. 22, pp. 213–230.
- Drabkova V.G., Sorokin I.N. *Ozero i ego vodosbor — edinaya prirodnaya sistema* [Lake and Its Catchment Area — A Single Natural System]. Leningrad: Nauka Publ., 1979. 196 p.
- Ferreira-Pego C., Babio N., Marver F., Victoria I., Sales-Salvador J. Water mineralization and its importance for health. *Alim. Nutri. Salud*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 4–18.
- Fortunatov M.A. Color and transparency of the water of the Rybinsk reservoir as an indicator of its regime. *Tr. Inst. Biol. Vodokhr. AN SSSR*, 1959, vol. 2, pp. 246–357. (In Russ.).
- Gidrologo-gidrokhimicheskie issledovaniya ozer Bol'shogo Solovetskogo ostrova. Ottset* [Hydrological and Hydrochemical Studies of the Lakes of the Bolshoy Solovetsky Island. Report]. Frolova N.L., Zhidyreva L.E., Eds. SGIAZPMZ, 1989. 64 p.
- Gritsevskaya G.L., Kyabeleva G.K., Nikolaeva L.A., Semenov V.N. Solovetsky Islands. In *Materialy po kompleksnomu izucheniyu ozer. Tom 6* [Materials on a Comprehensive Study of Lakes. Vol. 6]. Petrozavodsk: Karelya Publ., 1972, pp. 5–44. (In Russ.).
- Guseva T.V., Molchanova Ya.P., Zaika E.A., Vinnichenko V.N., Averochkin E.M. *Gidrokhimicheskie pokazateli sostoyaniya okruzhayushchey sredy: spravochnye materialy* [Hydrochemical Indicators of the State of the Environment: Reference Materials]. Guseva T.V., Ed. Moscow: Forum: Infra-M Publ., 2007. 192 p.
- Hutchinson D. *Limnologiya: Geograficheskie, fizicheskie i khimicheskie kharakteristiki ozer* [Limnology: Geographical, Physical and Chemical Characteristics of Lakes]. Moscow: Progress Publ., 1969. 592 p.
- Kitaev S.P. *Osnovy limnologii dlya hidrobiologov i ikhtiolologov* [Fundamentals of Limnology for Hydrobiologists and Ichthyologists]. Petrozavodsk: KNTs RAN, 2007. 395 p.
- Kokryatskaya N.M., Chupakov A.V., Titova K.V., Chupakova A.A., Zabelina S.A., Moreva O.Yu., Neverova N.V., Zhibareva T.A. Hydrological and hydrochemical characteristics of the meromictic iron-manganese freshwater lake Svetloe (Arkhangelsk region). *Zh. Sib. Feder. Univ., Ser. Biol.*, 2019, vol. 12, no. 2, pp. 147–159. (In Russ.). <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0036>
- Lozovik P.A., Shkiperova O.F., Zubkov M.B., Platonov A.V. Geochemical features of Karelian surface waters and their classification by chemical parameters. *Tr. KNTs RAN*, 2006, no. 9, pp. 130–143. (In Russ.).
- Natytnik A.A., Nikishin N.A. Lake-canal water management systems of the Solovetsky Islands. In *Neizvestnye Solovki. Tr. Morskoi Arktic. Kompleks. Ekspeditsii Pamyatniki istorii osvoyeniya Arktiki* [Unknown Solovki. Proc. of the Marine Arctic Complex Expedition Monuments of the History of Arctic Exploration]. Boyarskii P.V., Ed. Moscow: Yanus Publ., 1991, pp. 53–58. (In Russ.).
- Nikanorov A.M. Some basic notions of theoretical hydrochemistry. *Dokl. Earth Sci.*, 2009, vol. 429, pp. 1559–1561. <https://doi.org/10.1134/S1028334X0909030X>
- Prirodnaya sreda Solovetskogo arkipelaga v usloviyah menyayushchegosya klimata* [The Natural Environment of the Solovetsky Archipelago in a Changing Climate]. Shvartsman Yu.G., Bolotov I.N., Eds. Ekaterinburg: UrO RAN, 2007. 184 p.
- Savina E.A. Determination of the degree of water pollution in open reservoirs of the Solovetsky archipelago. In *Neizvestnye Solovki. Tr. Morskoi Arktic. Kompleks. Ekspeditsii Pamyatniki istorii osvoyeniya Arktiki* [Unknown Solovki. Proc. of the Marine Arctic Complex Expedition Monuments of the History of Arctic Exploration]. Boyarskii P.V., Ed. Moscow: Yanus Publ., 1991, pp. 67–72. (In Russ.).
- Subetto D.A., Shevchenko V.P., Ludikova A.V., Kuznetsov D.D. Sapelko T.V., Lisitsyn A.P., Evzerov V.Ya., van Beek P., Suo M., Subetto G.D. Chronology of isolation of the Solovetskii archipelago lakes and current rates of lake sedimentation. *Dokl. Earth Sci.*, 2012, vol. 446, pp. 1042–1048. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12090140>
- Titova K.V., Kokryatskaya N.M., Popov S.S., Moreva O.Yu., Sloboda A.A., Klimov S.I., Bykov V.M., Prilutskaya N.S. Hydrochemical characteristics of lakes of different types on the Bolshoi Solovetskii Island. *Water Resour.*, 2024, vol. 51, pp. 61–71. <https://doi.org/10.1134/S0097807823700641>
- Titova K.V., Kokryatskaya N.M., Zhibareva T.A., Sloboda A.A. Hydrochemical and geochemical studies of coastal reservoirs of the Big Solovetsky Island. In *XXIX Beregovaya konf.: Naturnye i teoreticheskie issledovaniya – v praktiku beregopol'zovaniya: sb. mater. Vseros. konf. s mezhdunar. uchastiyem* [29th

- Coastal Conf.: Natural and Theoretical Studies – Into the Practice of Coastal Management: Collection of the Mater. Of the All-Russ. Conf. with Int. Participation]. Kaliningrad: Izd-vo BFU im. I. Kanta, 2022, pp. 447–449. (In Russ.).
- Titova K.V., Zhibareva T.A., Sloboda A.A., Popov S.S., Kokryatskaya N.M., Eliseeva I.S. Formation of the ionic composition of water: Case study of Small Lake on Bolshoi Solovetsky Island. *Water Resour.*, 2023, vol. 50, pp. S366–S370.  
<https://doi.org/10.1134/S0097807823700628>
- Zakharov Yu.S. Lake-canal systems on the islands of the Solovetsky Archipelago. In *Solovetskii sbornik* [Solovetsky Collection]. Martynov A.Ya., et al., Eds. Arkhangelsk: Solovets. Gos. Istor.-Arkh. i Prir. Muzei-Zapovednik, 2013, pp. 94–135. (In Russ.).
- Zakhvatkin A.A. *Solovetskie ozera: kratkii gidrobiologicheskii ocherk* [Solovetsky Lakes: A Brief Hydrobiological Essay]. Solovki, 1927. 142 p.
- Zakhvatkin A.A., Sakharov N., Yurkansky V. *K poznaniiyu prirody Solovetskikh ostrovov* [Towards Knowledge of the Nature of the Solovetsky Islands]. Solovki, 1928. 56 p.