

УДК 556.555 : 639.37

## КИСЛОРОДНЫЙ РЕЖИМ ОЗЕРА ВЕНДЮРСКОЕ ЗИМОЙ В УСЛОВИЯХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ФОРЕЛЕВОГО ХОЗЯЙСТВА

Г. Э. Здравеннова\*, Н. И. Пальшин, Р. Э. Здравеннов,  
С. Р. Богданов, Т. В. Ефремова, С. И. Смирнов, Ю. С. Новикова

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»  
(пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),  
\*zdrovennova@gmail.com

Приведены результаты анализа межгодовой изменчивости (2007–2024 гг.) содержания растворенного кислорода в воде небольшого озера Вендюрское (юг Карелии), в котором с 2011 г. функционирует форелевое хозяйство. Используются данные измерений температуры воды и содержания растворенного кислорода по столбу воды на 10–15 горизонтах в центральной глубоководной части озера в круглогодичном режиме. Показано, что сразу после установления льда начинается уменьшение содержания растворенного кислорода, наиболее выраженное в придонных слоях озера и обусловленное бактериальной деструкцией органического вещества. Уже через несколько недель после установления льда развивается дефицит кислорода в придонных слоях центральной котловины, где скапливается оседающее взвешенное органическое вещество. Проанализировано отношение содержания растворенного кислорода в столбе воды в каждый день ледостава  $C_t$  к этому показателю в первый день ледостава  $C_0$ . Отношение  $C_t/C_0$  рассматривается как показатель, характеризующий долю потребления кислорода в озере за счет бактериальной деструкции органического вещества. Для выявления межгодовой изменчивости объема потребления кислорода в озере зимой проведено сравнение величины  $C_t/C_0$  на 130-е сутки ледостава в разные годы. В начале периода измерений потребление кислорода в озере зимой достигало 34 % от исходного уровня в первый день ледостава, в конце периода измерений – 48 %, то есть увеличение потребления кислорода за 16 лет составило более 40 %. Увеличение объема потребления кислорода в зимний период за счет роста температуры воды и ускорения метаболизма (9 %) объясняет лишь часть выявленного тренда. Наряду с температурой воды существенный вклад в увеличение потребления кислорода может вносить увеличение количества ОВ, связанное в том числе с деятельностью форелевого хозяйства.

Ключевые слова: мелководное озеро; форелевое хозяйство; температура воды; растворенный кислород; дефицит кислорода; период ледостава

Для цитирования: Здравеннова Г. Э., Пальшин Н. И., Здравеннов Р. Э., Богданов С. Р., Ефремова Т. В., Смирнов С. И., Новикова Ю. С. Кислородный режим озера Вендюрское зимой в условиях функционирования форелевого хозяйства // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 8. С. 73–83. doi: 10.17076/eco1988

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания КарНЦ РАН (FMEN-2021-0019, «Роль гидрофизических процессов в экосистемах мелководных озер. Современное состояние и прогноз развития экосистем малых озер Карелии при антропогенном воздействии и климатических изменениях»).

**G. E. Zdorovenнова\*, N. I. Palshin, R. E. Zdorovennov, S. R. Bogdanov, T. V. Efremova, S. I. Smirnov, Iu. S. Novikova. OXYGEN REGIME OF LAKE VENDYURSKOE IN WINTER IN RESPONSE TO TROUT FARM OPERATIONS**

*Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), \*zdrovennova@gmail.com*

The article presents the results of an analysis of interannual variability (2007–2024) of the dissolved oxygen content in water of a small Lake Vendyurskoe (southern Karelia, Russia), where a trout farm has been operating since 2011. The data on water temperature and dissolved oxygen content in the water column at 10–15 depths in the central deep-water part of the lake in the year-round mode are used. It is shown that immediately after ice-on, the dissolved oxygen content begins to decline, most significantly near the bottom, due to bacterial destruction of organic matter. Already a few weeks after ice-on, oxygen deficiency develops in the bottom layers of the central deep-water basin, where the settling suspended organic matter accumulates. The ratio of the dissolved oxygen content in the water column on each day of the ice period  $C_t$  to its content on the first day of freeze-up  $C_0$  was analyzed. The  $C_t/C_0$  ratio is considered as a proxy of the proportion of oxygen consumption in the lake due to bacterial destruction of organic matter. To identify interannual variability in the volume of oxygen consumption in the lake in winter, we compared the  $C_t/C_0$  value on the 130<sup>th</sup> day of the ice period in different years. At the beginning of the measurement period, oxygen consumption in the lake in winter reached 34 % of the initial level on the first day of ice formation, while at the end of the measurement period it was 48 %, i.e., the increase in oxygen consumption over 16 years was more than 40 %. The increase in oxygen consumption in winter due to the increase in water temperature and acceleration of metabolism (9 %) explains only part of the identified trend. Along with water temperature, a significant contribution to the increase in oxygen consumption is likely made by an increase in the amount of OM, associated, among other things, with the trout farm operations.

**Keywords:** shallow lake; trout farm; water temperature; dissolved oxygen; oxygen deficiency; ice period

**For citation:** Zdorovenнова G. E., Palshin N. I., Zdorovennov R. E., Bogdanov S. R., Efremova T. V., Smirnov S. I., Novikova Iu. S. Oxygen regime of Lake Vendyurskoe in winter in response to trout farm operations. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 8. P. 73–83. doi: 10.17076/eco1988

**Funding.** The study was carried out under state assignment to KarRC RAS (FMEN-2021-0019, “Role of hydrophysical processes in shallow-water lake ecosystems. Current status and forecast of the development of ecosystems of Karelian small lakes under human impact and climate change”).

## **Введение**

Концентрация растворенного кислорода в воде является одним из важнейших показателей, регулирующих функционирование озерной экосистемы. Увеличение или уменьшение концентрации кислорода в воде регулируется рядом физических и химико-биологических процессов, таких как выделение кислорода в результате фотосинтеза и его потребление

при бактериальной деструкции органического вещества, газообмен водной толщи с атмосферой, изменение растворимости газа с изменением температуры воды и др. [Jane et al., 2021]. Снижение концентрации кислорода в придонных слоях озер способствует высвобождению накопленных питательных веществ из отложений в воду [North et al., 2014], что может стимулировать эвтрофирование водоемов. В анаэробных условиях происходит выделение

и накопление парниковых газов, увеличивается их эмиссия [Fernández et al., 2014]. Эти и другие негативные последствия для озерных экосистем, и в конечном итоге для здоровья человека, требуют углубленного изучения изменений кислородного режима озер под влиянием изменений климата и антропогенной деятельности.

Результаты натуральных измерений показывают, что в настоящее время происходят изменения кислородного режима озер [Jane et al., 2021]. В частности, по результатам масштабных исследований, включающих данные 8288 озер Северного полушария, выявлено быстрое ухудшение кислородного режима большинства северных озер в период с 1960 по 2022 год, связанное с увеличением периода летней стратификации на фоне потепления климата [Jansen et al., 2024]. Модельные расчеты прогнозируют снижение концентрации кислорода в озерах в будущем за счет повышения температуры воды и усиления стратификации водной толщи, препятствующей аэрации придонных слоев [Golosov et al., 2012].

Ухудшение кислородного режима озер под влиянием антропогенной деятельности и изменений климата представляет наибольшую опасность для небольших по площади озер (менее 10 км<sup>2</sup>), в которых в последние десятилетия выявлены наиболее выраженные изменения газового режима, включая увеличение потока парниковых газов с их поверхности [Pi et al., 2022].

Одним из видов хозяйственной деятельности, наносящих существенный вред озерным экосистемам в целом и кислородному режиму озер в частности, является садковое выращивание ценных пород рыб. В Республике Карелия в последние годы все более активно развивается товарное выращивание радужной форели *Parasalmo mykiss* (Walbaum) – более 80 % объема общероссийского производства этой рыбы осуществляется в озерных садковых форелевых хозяйствах региона [Стерлигова, Ильмаст, 2023]. Исследования, которые проводятся на озерах с действующими форелевыми фермами, показывают, что водные экосистемы испытывают постоянный прессинг в связи с поступлением в воду биогенных веществ, остатков корма, продуктов жизнедеятельности рыб [Китаев и др., 2003; Михайленко, Стерлигова, 2021; Галахина, Зобков, 2022]. В результате постоянной подпитки биогенными веществами, главным образом фосфором и азотом, активизируется развитие фитопланктона, учащаются эпизоды цветения воды, как следствие, увеличивается количество взвешенного органического

вещества и мутность воды, снижается ее прозрачность, ухудшается кислородный режим, происходит заиливание грунтов, меняется состав рыбного сообщества [Решетников и др., 1982; Кучко, Савосин, 2020; Стерлигова, Ильмаст, 2023; Стерлигова и др., 2023]. Подобные изменения представляют опасность для озерных экосистем, что актуализирует изучение озер, в которых располагаются форелевые хозяйства.

В небольшом мезотрофном оз. Вендюрское (юг Карелии) форелевое хозяйство действует с 2011 г. Для того чтобы выяснить, оказывает ли деятельность форелевого хозяйства влияние на кислородный режим этого озера, проанализированы данные круглогодичных многолетних измерений (с 2007 по 2024 г.) содержания растворенного кислорода на нескольких глубинах на автономной станции в центре озера. Основное внимание уделено периоду ледостава, когда газообмен водной толщи озера с атмосферой практически отсутствует, активность фотосинтеза понижена и происходит активное потребление кислорода при бактериальном окислении органического вещества (ОВ) [Terzhevik et al., 2009; Тержевик и др., 2010; Obertegger et al., 2017]. Повышенное поступление биогенных веществ в воду в результате деятельности форелевого хозяйства может способствовать увеличению количества автохтонного ОВ в период открытой воды, а бактериальное разложение новообразованного ОВ способствует истощению кислорода в водной толще озера в последующий зимний сезон. Скопление оседающего ОВ в придонных слоях локальных углублений дна обуславливает наибольшую скорость истощения кислорода в нижней части стратифицированного водного столба [Terzhevik et al., 2009; Тержевик и др., 2010]. Поскольку на скорость бактериальной деструкции ОВ может оказывать влияние температура воды [Kovaleva et al., 2003], были проанализированы ряды температуры воды по данным автономной станции (круглогодичный режим измерений) за 2007–2024 гг.

Цель данной работы – выявление изменений кислородного режима небольшого озера с действующим форелевым хозяйством в зимний период по данным многолетних измерений содержания растворенного кислорода и температуры воды.

## Материалы и методы

Небольшое озеро Вендюрское располагается в южной части Карелии (62°10'–62°20' с.ш. 33°10'–33°20' в.д.). Этот водоем ледникового происхождения по особенностям батиметрии

и трофическому статусу довольно типичен для территории Карелии [Тержевик и др., 2010]. Площадь поверхности озера достигает 10,4 км<sup>2</sup>, объем вод – 0,0609 км<sup>3</sup> [Озера..., 2013]. Максимальная глубина – 11,3 м, средняя глубина – 5,3 м. Период ледостава продолжается с середины ноября – начала декабря до конца апреля – начала мая (в разные годы от 146 до 192 суток) [Zdorovenov et al., 2013; Zdorovenova et al., 2021]. В период открытой воды озеро неоднократно перемешивается [Smirnov et al., 2024], поэтому может быть отнесено к полимиктическому типу. В период ледостава и летом при усилении стратификации в придонных слоях глубоководной котловины и локальных углублений дна развивается дефицит кислорода [Terzhevik et al., 2009; Zdorovenova et al., 2021].

Форелевое хозяйство действует в озере с 2011 г. Садки форелевого хозяйства располагаются вблизи южного берега озера, а также в южном заливе (рис. 1). Расстояние от форелевых садков на акватории озера до станции измерений составляет около километра.

В центральной глубоководной котловине озера в июле 2007 г. была установлена автономная станция – коса с датчиками температуры и растворенного кислорода (рис. 1). Трос, к которому крепятся датчики, растянут между якорем и плавающим в 1,0–1,5 м от поверхности буем.

Используются датчики температуры и кислорода фирмы RBR Ltd (точность по температуре 0,001 °С, диапазон по кислороду 0–150 %, точность 1 %). Интервал измерений по времени составляет одну минуту. Расстояние между датчиками – от нескольких см в придонном слое до 1,0–2,0 м в водной толще. Измерения проводятся в круглогодичном режиме. В мае-июне и октябре-ноябре коса извлекается из озера для снятия данных и замены элементов питания датчиков, затем помещается на прежнее место. Перерыв в измерениях весной и осенью в разные годы составляет от нескольких часов до нескольких суток. В период с октября 2013 г. по октябрь 2014 г. измерения не проводились в связи с заменой датчиков.

По данным автономной станции исследованы особенности изменения температуры воды и содержания растворенного кислорода в воде озера Вендюрское в период ледостава в разные годы. Для каждого зимнего сезона было рассчитано содержание растворенного кислорода в столбе воды на первые сутки после установления льда  $C_0$  и на каждые следующие сутки  $C_t$  ледостава по методике, изложенной в [Zdorovenova et al., 2021]. Отношение  $C_t/C_0$  можно рассматривать как показатель, характеризующий долю потребления кислорода в озере за счет бактериальной деструкции ОВ.

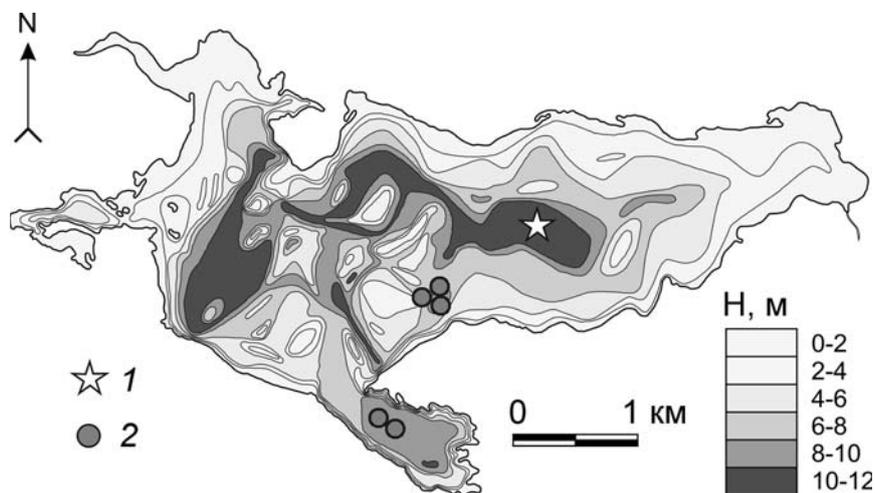


Рис. 1. Батиметрическая карта оз. Вендюрское с положением станции автономных измерений температуры воды и содержания растворенного кислорода (1) и схематичным положением форелевых садков (2). Общее количество садков на акватории озера и в заливе меняется от года к году, иногда достигая 15–20 шт.

Fig. 1. Bathymetric map of Lake Vendyurskoe, and location of the station for autonomous measurements of water temperature and dissolved oxygen content (1) and schematic location of trout cages (2). The total number of cages in the lake and in the bay varies from year to year, sometimes reaching 15–20 pieces

Для выявления межгодовой изменчивости объема потребления кислорода в озере за период ледостава проведено сравнение величины  $C_t/C_0$  и ее изменения в разные годы. Также проведено сравнение  $C_t/C_0$  на 130-е сутки ледостава в разные годы. Такая продолжительность периода для сравнения разных лет выбрана с учетом того, что минимальная продолжительность ледостава на озере чуть более 140 суток, а в последние дни ледостава в некоторые годы отмечено увеличение содержания кислорода по столбу воды, предположительно, в результате фотосинтеза фитопланктона [Zdorovenнова et al., 2021]. Поскольку температура воды оказывает влияние на бактериальную активность [Kovaleva et al., 2003] и может способствовать ускорению потребления кислорода, проанализирована взаимосвязь между величиной  $C_t/C_0$  в конце зимнего сезона (на 130-е сутки) и двумя параметрами: (1) средней температурой по столбу воды в первый день установления льда и (2) температурой придонного слоя воды в конце зимнего сезона.

## Результаты и обсуждение

В предледоставный период водная масса озера охлаждается в полностью перемешанном состоянии, при этом содержание растворенного кислорода по водному столбу однородно и достигает 11–12 мг/л. Установление льда происходило в разные годы при средней температуре по водному столбу в центральной части озера от 0,17 до 2,26 °С.

После установления льда во все годы исследований происходило повышение температуры воды, наиболее выраженное в придонном слое и обусловленное теплообменом с донными отложениями. В качестве примера на рис. 2 (а) приведено изменение температуры воды в зимний сезон 2008–2009 гг. К концу зимнего сезона температура придонного слоя в разные годы повышалась до 4,2–5,8 °С.

Во все годы измерений с первых же дней ледостава происходило уменьшение содержания растворенного кислорода по столбу воды, при этом наибольшая скорость уменьшения кислорода отмечалась в придонном слое (рис. 2, б). В некоторые годы через несколько дней после установления льда происходил промежуточный взлом ледового покрова, при этом водная толща озера полностью перемешивалась и придонные слои насыщались кислородом [Zdorovenнова et al., 2021].

В верхней части водного столба (глубина 2–3 м) уменьшение содержания кислорода за

зимний период составляло примерно 10 %. Толщина придонного слоя, обедненного кислородом (концентрация менее 2 мг/л), в центральной глубоководной котловине достигала 1–2 м к концу зимы в разные годы. Измерения в разных районах озера в зимние месяцы 2001/02 и 2005/06 гг. показали, что снижение концентрации кислорода до близких к нулю значений происходило также в придонных слоях локальных углублений дна на глубинах больше 7,5–8,0 м [Тержевик и др., 2010].

Показатель  $C_t/C_0$  снижался в течение зимы до 0,47–0,69 в разные годы, что соответствовало уменьшению содержания кислорода на 31–53 % относительно первого дня ледостава. На рис. 3 в качестве примера приведено изменение показателя  $C_t/C_0$  в течение зимнего сезона 2009/10 гг. (до начала действия форелевого хозяйства) и 2021/22 гг. (после 10 лет действия форелевого хозяйства).

До начала деятельности форелевого хозяйства  $C_t/C_0$  за 130 суток снижалось до 0,65–0,69, то есть за зимний период потреблялось около 31–35 % от начального содержания кислорода. В годы деятельности форелевого хозяйства отношение  $C_t/C_0$  на 130-е сутки составляло 0,47–0,64, то есть общая убыль кислорода в воде озера зимой увеличилась до 36–53 %, что может являться косвенным признаком увеличения количества ОВ в озере.

Величина  $C_t/C_0$  в конце зимних сезонов 2015/16 и 2020/21 гг. (0,64 и 0,62 соответственно) была соизмерима с годами до начала деятельности форелевого хозяйства. Возможно, это связано с меньшим количеством ОВ, накопленным на предыдущем этапе открытой воды.

Для исследования межгодовых изменений объема потребления кислорода в озере зимой проведено сравнение показателя  $C_t/C_0$  в разные годы на 130-е сутки ледостава (рис. 4). Наряду с заметной межгодовой изменчивостью выявлено уменьшение соотношения  $C_t/C_0$  в конце зимы в период с 2008 по 2024 г. Линейный тренд статистически значим и характеризуется коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,55$  ( $p < 0,01$ ). Согласно выделенному тренду в начале периода измерений потребление кислорода в озере зимой достигало 34 % от исходного уровня в первый день ледостава, в конце периода измерений – 48 %, то есть увеличение потребления кислорода за 16 лет составило более 40 %.

Тренд на уменьшение  $C_t/C_0$  может быть обусловлен двумя совершенно различными факторами: ростом придонной температуры и ростом количества автохтонного ОВ.

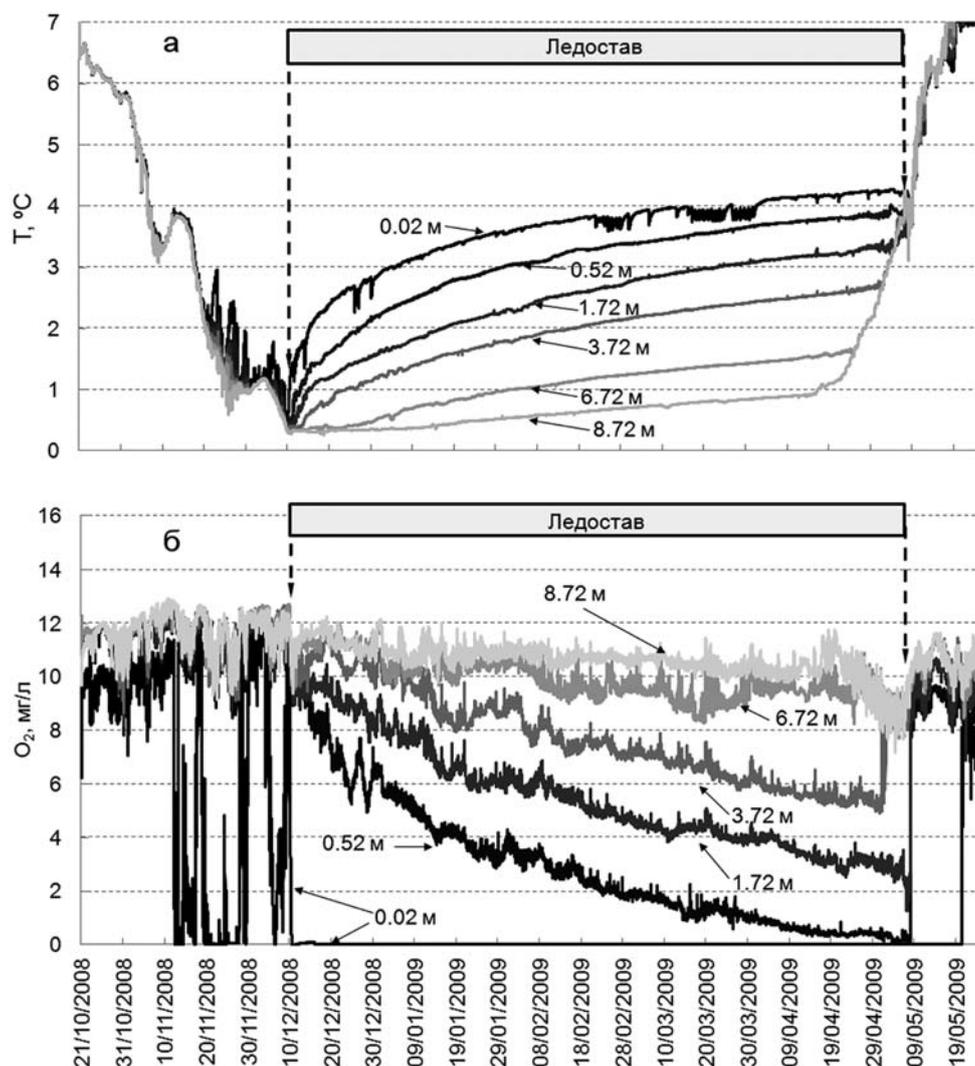


Рис. 2. Температура воды (а) и концентрация растворенного кислорода (б) на некоторых горизонтах измерений в зимний сезон 2008/09 гг. На графике приведены расстояния датчиков от дна. Общая глубина станции 11,3 м, следовательно, верхний датчик косы, удаленный от дна на расстояние 8,72 м, располагался на глубине 2,58 м, а нижний, удаленный от дна на 0,02 м, – на глубине 11,28 м

Fig. 2. Water temperature (a) and dissolved oxygen concentration (б) at some measurement depths in the winter season of 2008/09. The graph shows the distances of the sensors from the bottom (m). The total depth of the station is 11.3 m, therefore, the upper sensor of the chain, located at a distance of 8.72 m from the bottom, was located at a depth of 2.58 m, and the lower sensor, located at a distance of 0.02 m from the bottom, was at a depth of 11.28 m

В качестве одного из факторов, который может ускорять бактериальную деструкцию ОВ и способствовать уменьшению кислорода в озере зимой, рассмотрена температура воды. Исследована взаимосвязь величины  $C_t/C_0$  в конце зимы со средней температурой по столбу воды в день установления льда и температурой придонного слоя воды в конце зимнего сезона (130-е сутки ледостава). За период 2008–2024 гг. выявлено увеличение придонной температуры воды к концу зимнего сезона

на  $\sim 0,5$  °C (коэффициент детерминации линейного тренда  $R^2 = 0,23$ ;  $p < 0,01$ ) (рис. 4). То есть в озере зимой складываются условия для ускорения потребления кислорода за счет увеличения температуры воды придонного слоя.

Выявлена обратная зависимость величины  $C_t/C_0$  на 130-е сутки ледостава от средней температуры по столбу воды в день установления льда и от придонной температуры воды в конце зимы (рис. 5). Чем выше была температура по столбу воды в день установления льда

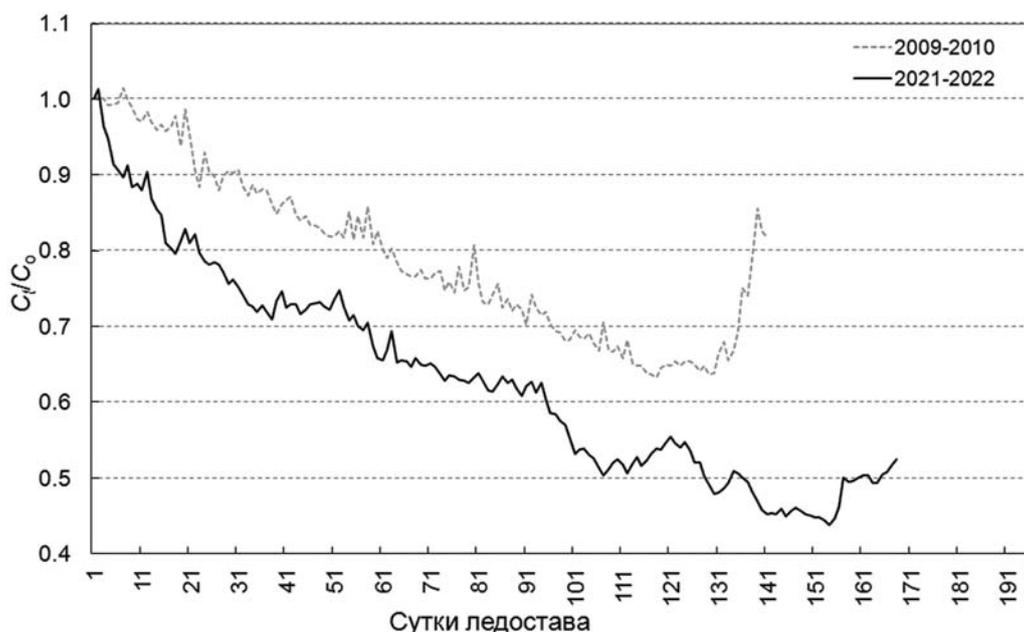


Рис. 3. Отношение  $C_t/C_0$  в разные зимние сезоны

Fig. 3.  $C_t/C_0$  ratio in different winter seasons

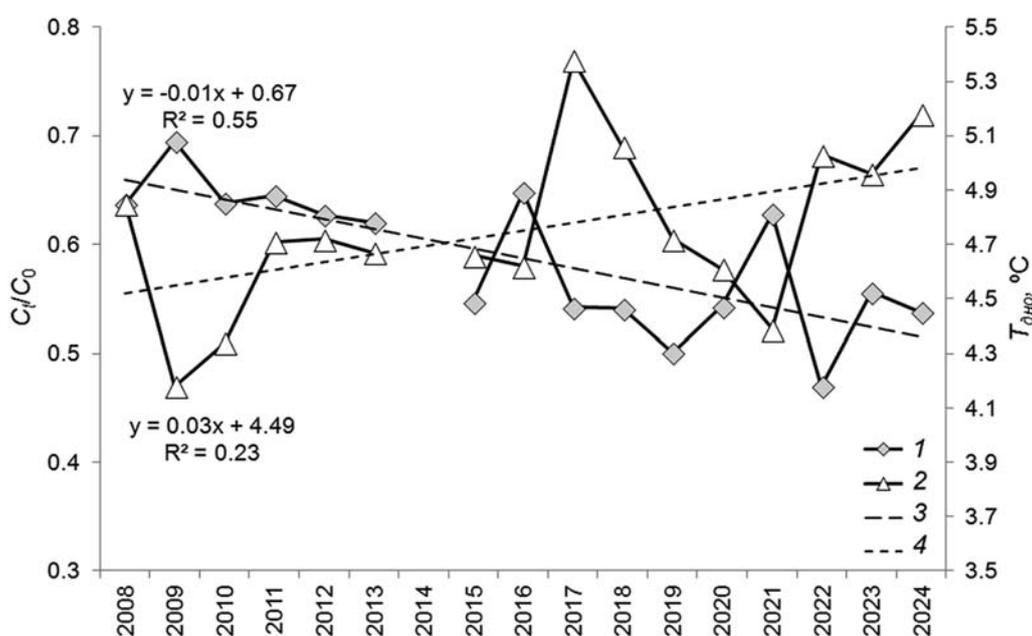


Рис. 4. Отношение  $C_t/C_0$  (1) и температура придонного слоя воды (2) в разные годы на 130-е сутки ледостава. Линейные тренды здесь и на рис. 5: 3 –  $C_t/C_0$ , 4 –  $T_{\text{дно}}$

Fig. 4.  $C_t/C_0$  ratio (1) and the temperature of the bottom water layer (2) in different years on the 130<sup>th</sup> day of ice period. Here and in Fig. 5: 3 and 4 are linear trends

и в придонном слое озера в конце ледостава, тем больший объем кислорода расходовался на протяжении зимнего сезона. Связь величины  $C_t/C_0$  с температурой придонной воды в конце зимы (коэффициент детерминации линейного тренда  $R^2 = 0,43$  при  $p < 0,01$ ) выражена более явно, чем с температурой в первый

день ледостава (коэффициент детерминации линейного тренда  $R^2 = 0,22$  при  $p < 0,01$ ).

На качественном уровне такую корреляцию можно объяснить увеличением скорости биохимических реакций при повышении температуры. Это увеличение может служить одной из причин обнаруженного тренда роста

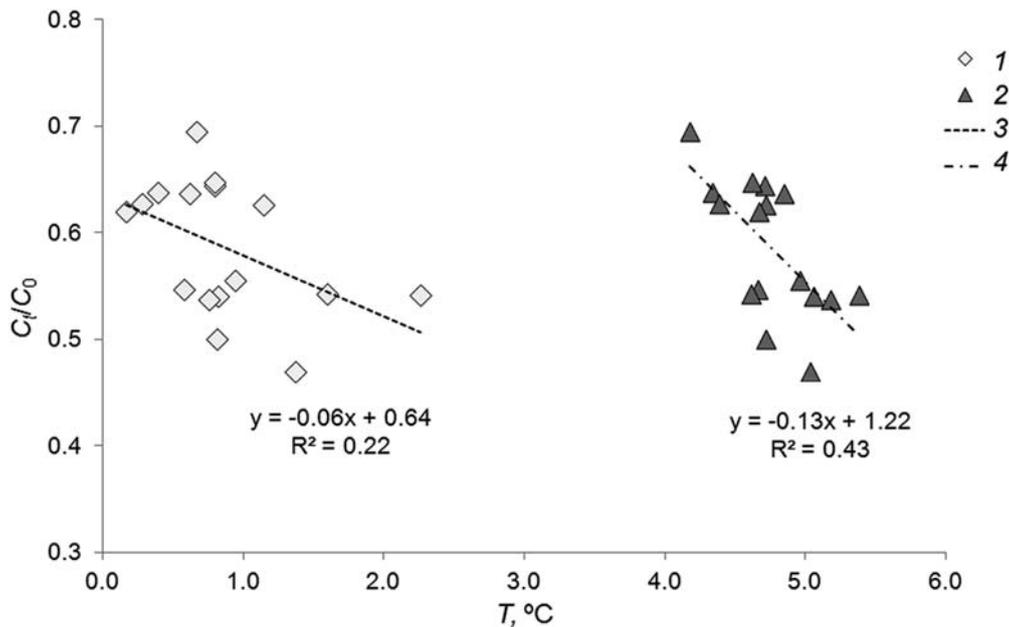


Рис. 5. Зависимость соотношения  $C_t/C_0$  в конце зимы (на 130-е сутки ледостава) в 2008–2024 гг. от средней температуры по водному столбу в центральной глубоководной котловине оз. Вендюрского в день установления льда (1) и от температуры воды придонного слоя на 130-е сутки ледостава (2)

Fig. 5. Dependence of the  $C_t/C_0$  ratio at the end of winter (on the 130<sup>th</sup> day of ice period) in 2008–2024 on the average temperature of the water column in the central deep-water basin of Lake Vendyurskoe on the day of ice formation (1) and on the temperature of the bottom water layer on the 130<sup>th</sup> day of ice period (2)

потребления кислорода, даже при том, что придонная температура возрастает лишь на  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  за рассмотренный период. Дело заключается в том, что скорость метаболизма придонных бактериальных сообществ пресной воды при изменении температуры в диапазоне  $0\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$  изменяется практически на два порядка [Price, Sowers, 2004] и является весьма чувствительной даже к указанным малым изменениям температуры.

Подобный анализ допускает и некоторые количественные оценки, основанные на уравнении Аррениуса для скорости  $k$  реакций:

$$\frac{dk}{k} = \frac{E_a}{RT} \frac{dT}{T}. \quad (1)$$

Здесь  $E_a$  – энергия активации,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – температура,  $K$ . Характерное значение величины  $E_a$  в данном случае составляет  $\sim 110$  кДж/моль [Price, Sowers, 2004], при этом первый множитель в правой части (1), играющий роль «коэффициента биологического усиления», близок к 50. Таким образом, при выявленном увеличении

придонной температуры на  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  в соответствии с (1) можно ожидать увеличения величины  $K$  на  $\sim 9\%$ , что объясняет лишь часть обнаруженного тренда по уменьшению величины  $C_t/C_0$ .

К сожалению, оценить вклад увеличения количества ОБ в усиление потребления кислорода не представляется возможным в связи с отсутствием данных измерений этого параметра. В этой связи остается лишь предположить, что отношение  $C_t/C_0$  можно рассматривать как косвенный показатель количества ОБ в воде к началу ледостава – чем больше было накоплено в озере ОБ за вегетационный сезон, тем больший объем кислорода будет использован при бактериальной деструкции ОБ в зимний период и тем меньше будет отношение  $C_t/C_0$  в конце зимы. Поскольку показатель  $C_t/C_0$  характеризуется статистически значимым уменьшением на  $41\%$  в зимние сезоны в период 2007–2024 гг., а приведенные оценки вклада от ускорения метаболизма при повышении температуры воды на  $0,5^{\circ}$  составляют лишь  $9\%$ , можно предположить, что в озере происходило увеличение количества ОБ, в том числе в результате деятельности форелевого хозяйства.

## Заключение

Проведенный анализ данных длительных многолетних (2007–2024 гг.) измерений температуры воды и содержания растворенного кислорода в воде озера Вендюрского (юг Карелии) позволил установить увеличение потребления кислорода в озере в зимний период. Тренд на уменьшение  $C_t/C_0$  может быть обусловлен двумя совершенно различными факторами: ростом придонной температуры воды и ростом количества автохтонного ОВ в воде озера.

Выявлена обратная зависимость объема потребленного кислорода в конце зимы от температуры воды в начальный период ледостава и в конце зимы – чем выше была температура при установлении льда и в конце зимы, тем больший объем кислорода потреблялся зимой. Однако выявленная зависимость объема потребления кислорода в зимний период от температуры воды объясняет лишь часть выявленного тренда величины  $C_t/C_0$ . Наряду с температурой воды существенный вклад в увеличение потребления кислорода может вносить увеличение количества ОВ, связанное, в частности, с деятельностью форелевого хозяйства.

Дальнейшие исследования будут направлены на выявление изменений в количестве ОВ в водах озера в разные сезоны года. Также будет проведен углубленный анализ ледовой фенологии озера Вендюрского, тенденций изменений регионального климата и термического режима озера в зимний период.

## Литература

Галахина Н. Е., Зобков М. Б. Гидрохимические исследования в районе расположения форелевых хозяйств в Кондопожской губе Онежского озера в зимний период 2022 года // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 76–87. doi: 10.17076/lim1599

Китаев С. П., Стерлигова О. П., Павловский С. А., Комулайнен С. Ф., Кучко Я. А. Оценка влияния форелевой фермы на озерно-речную систему р. Лижма (бассейн Онежского озера) // Биология внутренних вод. 2003. № 2. С. 92–99.

Кучко Я. А., Савосин Е. С. Оценка состояния сообществ зоопланктона и макрозообентоса экосистемы Маслозера в зоне размещения форелевого хозяйства // Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2020. № 5(172). С. 10–20.

Михайленко В. Г., Стерлигова О. П. Некоторые экологические аспекты садкового выращивания радужной форели // Труды Карельского научного центра РАН. 2021. № 12. С. 82–90. doi: 10.17076/eco1509

Озера Карелии. Справочник / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.

Решетников Ю. С., Попова О. А., Стерлигова О. П. и др. Изменение структуры рыбного населения / Отв. ред. М. И. Шатуновский. М.: Наука, 1982. 247 с.

Стерлигова О. П., Ильмаст Н. В. Ихтиологические и гидробиологические исследования в Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 3. С. 113–124. doi: 10.17076/eco1777

Стерлигова О. П., Савосин Е. С., Кучко Я. А., Савосин Д. С., Милянчук Н. П. Состояние экосистемы озера Хедо (западная Карелия) в условиях рыболовной деятельности // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Рыбное хозяйство. 2023. № 2. С. 15–23. doi: 10.24143/2073-5529-2023-2-15-23

Тержевик А. Ю., Пальшин Н. И., Голосов С. Д., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э., Митрохов А. В., Потахин М. С., Шипунова Е. А., Зверев И. С. Гидрофизические аспекты формирования кислородного режима мелководного озера, покрытого льдом // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 568–579.

Fernández J. E., Peeters F., Hofmann H. Importance of the autumn overturn and anoxic conditions in the hypolimnion for the annual methane emissions from a temperate lake // Environ. Sci. Technol. 2014. Vol. 48. P. 7297–7304. doi: 10.1021/es4056164

Golosov S., Zverev I., Terzhevik A., Kirillin G., Engelhardt C. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2012. Vol. 64. Art. 17264. doi: 10.3402/tellusa.v64i0.17264

Jane S. F., Hansen G. J. A., Kraemer B. M. et al. Widespread deoxygenation of temperate lakes // Nature. 2021. Vol. 594. P. 66–70. doi: 10.1038/s41586-021-03550-y

Jansen J., Simpson G. L., Weyhenmeyer G. A., Härkönen L. H., Paterson A. M., del Giorgio P. A., Prairie Y. T. Climate-driven deoxygenation of northern lakes // Nat. Clim. Change. 2024. Vol. 14(8). P. 832–838. doi: 10.1038/s41558-024-02058-3

Kovaleva N. V., Medinets V. I., Gazetov E. I. Effect of temperature and oxygen content on the rate of aerobic oxidation of organic matter in Black Sea water // Gidrobiol. Zh. 2003. Vol. 39, no. 4. P. 34–41. doi: 10.1615/HydrobJ.v39.i6.40

North R. P., North R. L., Livingstone D. M., Köster O., Kipfer P. Long-term changes in hypoxia and soluble reactive phosphorus in the hypolimnion of a large temperate lake: consequences of a climate regime shift // Glob. Change Biol. 2014. Vol. 20. P. 811–823. doi: 10.1111/gcb.12371

Obertegger U., Obrador B., Flaim G. Dissolved oxygen dynamics under ice: Three winters of high-frequency data from Lake Tovel, Italy // Water Resour. Res. 2017. Vol. 53(8). P. 7234–7246. doi: 10.1002/2017WR020599

Pi X., Luo Q., Feng L., Xu Y., Tang J., Liang X., Ma E., Cheng R., Fensholt R., Brandt M., Cai X., Gibson L., Liu J., Zheng Ch., Li W., Bryan B. A. Mapping global lake dynamics reveals the emerging roles of small lakes // Nat. Commun. 2022. Vol. 13. Art. 5777. doi: 10.1038/s41467-022-33239-3

Price P. B., Sowers T. Temperature dependence of metabolic rates for microbial growth, maintenance,

and survival // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2004. Vol. 101. P. 4631–4636.

Smirnov S. I., Zdorovenov R. E., Efremova T. V., Palshin N. I., Smirnovsky A. A., Bogdanov S. R., Terzhevik A. Yu., Zdorovenova G. E. Parameters of water column stability in a small polymictic lake in years of different weather conditions // Water Resources. 2024. Vol. 51. P. 299–313. doi: 10.1134/S0097807824700817

Terzhevik A., Palshin N., Mitrokhov A., Zdorovenov R., Zdorovenova G., Golosov S., Shipunova E., Zverev I., Kirillin G. Some features of the thermal and dissolved oxygen structure in boreal, shallow ice-covered Lake Vendyurskoe, Russia // Aquatic Ecol. 2009. Vol. 43. P. 617–627. doi: 10.1007/s10452-009-9288-x

Zdorovenova G., Palshin N., Golosov S., Efremova T., Belashev B., Bogdanov S., Fedorova I., Zverev I., Zdorovenov R., Terzhevik A. Dissolved Oxygen in a Shallow Ice-Covered Lake in Winter: Effect of Changes in Light, Thermal and Ice Regimes // Water. 2021. Vol. 13(17). Art. 2435. doi: 10.3390/w13172435

Zdorovenov R., Palshin N., Zdorovenova G., Efremova T., Terzhevik A. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake // Eston. J. Earth Sci. 2013. Vol. 61(1). P. 26–32. doi: 10.3176/earth.2013.03

## References

Fernández J. E., Peeters F., Hofmann H. Importance of the autumn overturn and anoxic conditions in the hypolimnion for the annual methane emissions from a temperate lake. *Environ. Sci. Technol.* 2014;48:7297–7304. doi: 10.1021/es4056164

Filatov N. N., Kukharev V. I. (eds.). Lakes of Karelia. Handbook. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2013. 464 p. (In Russ.)

Galakhina N. E., Zobkov M. B. Hydrochemical studies of the trout farming area in Kondopoga Bay of Lake Onego in the winter of 2022. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS.* 2022;6:76–87. (In Russ.). doi: 10.17076/lim1599

Golosov S., Zverev I., Terzhevik A., Kirillin G., Engelhardt C. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography.* 2012;64:17264. doi: 10.3402/tellusa.v64i0.17264

Jane S. F., Hansen G. J. A., Kraemer B. M. et al. Widespread deoxygenation of temperate lakes. *Nature.* 2021;594:66–70. doi: 10.1038/s41586-021-03550-y

Jansen J., Simpson G. L., Weyhenmeyer G. A., Härkönen L. H., Paterson A. M., del Giorgio P. A., Prairie Y. T. Climate-driven deoxygenation of northern lakes. *Nat. Clim. Change.* 2024;14(8):832–838. doi: 10.1038/s41558-024-02058-3

Kitaev S. P., Sterligova O. P., Pavlovsky S. A., Komulainen S. F., Kuchko Ya. A. Assessment of the influence of a trout farm on the lake-river system of the Lizhma River (Lake Onega basin). *Biologiya vnutrennikh vod = Inland Water Biology.* 2003;2:92–99. (In Russ.)

Kovaleva N. V., Medinets V. I., Gazetov E. I. Effect of temperature and oxygen content on the rate of aerobic oxydation of organic matter in Black Sea water.

*Gidrobiol. Zh.* 2003;39(4):34–41. doi: 10.1615/HydrobJ.v39.i6.40

Kuchko Ya. A., Savosin E. S. Assessment of the state of zooplankton and macrozoobenthos communities of the Maslozero ecosystem in the trout farming area. *Rybovodstvo i rybnoe khozyaistvo = Fish Farming and Fish Industry.* 2020;5(172):10–20. (In Russ.)

Mikhailenko V. G., Sterligova O. P. Some ecological aspects of rainbow trout cage rearing. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS.* 2021;12:82–90. (In Russ.). doi: 10.17076/eco1509

North R. P., North R. L., Livingstone D. M., Köster O., Kipfer R. Long-term changes in hypoxia and soluble reactive phosphorus in the hypolimnion of a large temperate lake: consequences of a climate regime shift. *Glob. Change Biol.* 2014;20:811–823. doi: 10.1111/gcb.12371

Obertegger U., Obrador B., Flaim G. Dissolved oxygen dynamics under ice: Three winters of high-frequency data from Lake Tovel, Italy. *Water Resour. Res.* 2017;53(8):7234–7246. doi: 10.1002/2017WR020599

Pi X., Luo Q., Feng L., Xu Y., Tang J., Liang X., Ma E., Cheng R., Fensholt R., Brandt M., Cai X., Gibson L., Liu J., Zheng Ch., Li W., Bryan B. A. Mapping global lake dynamics reveals the emerging roles of small lakes. *Nat. Commun.* 2022;13:5777. doi: 10.1038/s41467-022-33239-3

Price P. B., Sowers T. Temperature dependence of metabolic rates for microbial growth, maintenance, and survival. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2004;101:4631–4636.

Reshetnikov Yu. S., Popova O. A., Sterligova O. P. et al. Changes in the structure of fish populations. Moscow: Nauka; 1982. 247 p. (In Russ.)

Smirnov S. I., Zdorovenov R. E., Efremova T. V., Palshin N. I., Smirnovsky A. A., Bogdanov S. R., Terzhevik A. Yu., Zdorovenova G. E. Parameters of water column stability in a small polymictic lake in years of different weather conditions. *Water Resources.* 2024;51:299–313. doi: 10.1134/S0097807824700817

Sterligova O. P., Ilmast N. V. Ichthyological and hydrobiological studies in Karelia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS.* 2023;3:113–124. (In Russ.). doi: 10.17076/eco1777

Sterligova O. P., Savosin E. S., Kuchko Ya. A., Savosin D. S., Milyanchuk N. P. State of the ecosystem of Lake Khedo (Western Karelia) in conditions of fish breeding. *Vestnik Astrakhanskogo gos. tekhnicheskogo universiteta. Ser. Rybnoe khozyaistvo = Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry.* 2023;2:15–23. (In Russ.). doi: 10.24143/2073-5529-2023-2-15-23

Terzhevik A., Palshin N., Mitrokhov A., Zdorovenov R., Zdorovenova G., Golosov S., Shipunova E., Zverev I., Kirillin G. Some features of the thermal and dissolved oxygen structure in boreal, shallow ice-covered Lake Vendyurskoe, Russia. *Aquatic Ecol.* 2009;43: 617–627. doi: 10.1007/s10452-009-9288-x

Terzhevik A. Yu., Palshin N. I., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E., Mitrokhov A. V., Potakhin M. S., Golosov S. D., Shipunova E. A., Zverev I. S. Hydro-

physical aspects of oxygen regime formation in a shallow ice-covered lake. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2010;37(5):662–673. (In Russ.). doi: 10.1134/S0097807810050064

Zdorovennova G., Palshin N., Golosov S., Efremova T., Belashev B., Bogdanov S., Fedorova I., Zverev I., Zdorovennov R., Terzhevnik A. Dissolved

Oxygen in a Shallow Ice-Covered Lake in Winter: Effect of Changes in Light, Thermal and Ice Regimes. *Water*. 2021;13(17):2435. doi: 10.3390/w13172435

Zdorovennov R., Palshin N., Zdorovennova G., Efremova T., Terzhevnik A. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake. *Eston. J. Earth Sci.* 2013;61(1):26–32. doi: 10.3176/earth.2013.03

Поступила в редакцию / received: 02.11.2024; принята к публикации / accepted: 25.11.2024.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### **Здорovenнова Галина Эдуардовна**

канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник,  
руководитель лаборатории гидрофизики

*e-mail: zdorovennova@gmail.com*

### **Пальшин Николай Иннокентьевич**

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

*e-mail: npalshin@mail.ru*

### **Здорovenнов Роман Эдуардович**

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

*e-mail: romga74@gmail.com*

### **Богданов Сергей Рэмович**

докт. физ.-мат. наук, доцент, ведущий научный  
сотрудник

*e-mail: Sergey.R.Bogdanov@mail.ru*

### **Ефремова Татьяна Владимировна**

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

*e-mail: efremova@nwpi.krc.karelia.ru*

### **Смирнов Сергей Игоревич**

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

*e-mail: sergeysmirnov92@mail.ru*

### **Новикова Юлия Сергеевна**

аспирант, младший научный сотрудник

*e-mail: novyuliana@gmail.com*

## CONTRIBUTORS:

### **Zdorovennova, Galina**

Cand. Sci. (Geogr.), Leading Researcher,  
Head of Hydrophysics Laboratory

### **Palshin, Nikolai**

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher

### **Zdorovennov, Roman**

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher

### **Bogdanov, Sergey**

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor,  
Leading Researcher

### **Efremova, Tatyana**

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher

### **Smirnov, Sergei**

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher

### **Novikova, Iuliia**

Graduate Student, Junior Researcher