

## СУТОЧНАЯ ДИНАМИКА РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА В МАЛОМ МЕЗОТРОФНОМ ОЗЕРЕ В ПЕРИОД ВЕСЕННЕГО ПОДЛЕДНОГО ПРОГРЕВА

© *Н. И. ПАЛЬШИН*,<sup>1</sup> *Т. В. ЕФРЕМОВА*,<sup>2</sup> *Г. Э. ЗДОРОВЕННОВА*,<sup>3</sup>  
*Г. Г. ГАВРИЛЕНКО*,<sup>4</sup> *Р. Э. ЗДОРОВЕННОВ*,<sup>5</sup> *А. Ю. ТЕРЖЕВИК*,<sup>6</sup>  
*С. Ю. ВОЛКОВ*,<sup>7</sup> *С. Р. БОГДАНОВ*<sup>8</sup>

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

E-mail: <sup>1</sup> npalshin@mail.ru

<sup>2</sup> efremova@nwpi.krc.karelia.ru

<sup>3</sup> zdorovennova@gmail.com

<sup>4</sup> gg.gavrylenko@gmail.com

<sup>5</sup> romga@gmail.com

<sup>6</sup> ark1948@list.ru

<sup>7</sup> taranarmo@gmail.com

<sup>8</sup> Sergey.R.Bogdanov@mail.ru

Исследована динамика содержания растворенного кислорода (РК), температуры воды, хлорофилла «а» и подледной облученности в малом мезотрофном озере в период весеннего подледного прогрева по данным многолетних наблюдений с использованием высокоточного автономного оборудования. В конвективно-перемешанном слое (КПС) зафиксированы колебания РК до 1 мгО<sub>2</sub>/л с суточной периодичностью, предположительно, обусловленные усилением фотосинтеза в дневные часы на фоне роста подледной облученности (достигающей 120 Вт/м<sup>2</sup> при стаивании снега с поверхности льда) и деструкцией новообразованного органического вещества. В КПС также наблюдаются высокочастотные флуктуации РК (на масштабах от 2—3 мин до 3—4 ч), связанные, предположительно, с конвективными токами, адвекцией и сейшевой активностью. Вовлечение в конвективное перемешивание обедненных кислородом вод из нижележащего стратифицированного слоя приводит к снижению в КПС концентрации РК, но общее содержание кислорода по водному столбу в период развития подледной конвекции растет со скоростью ~0.1—0.4 гО<sub>2</sub>/м<sup>2</sup> за сутки за счет активизации фотосинтеза.

Ключевые слова: мезотрофное озеро, подледный прогрев, подледная освещенность, весенняя конвекция, фотосинтез, растворенный кислород, температура воды, хлорофилл «а».

**Введение.** Растворенный кислород (РК), наряду с температурой воды — один из наиболее важных параметров в экосистеме озера. Возникновение дефицита РК и развитие придонных анаэробных зон оказывает отрицательное влияние на биоту, приводит к активизации анаэробных процессов и накоплению парниковых газов [9, 13, 14]. К настоящему времени сезонный кислородный режим мелководных бореальных озер в общих чертах описан [12, 15], однако многие аспекты динамики РК остаются плохо изученными. В частности, крайне слабо исследована динамика РК в покрытых льдом водоемах на масштабах времени от синоптического до суточного [8, 18, 22]. Исследования суточного хода гидрохимических характеристик как показателей суммарного итога жизнедеятельности населения водоемов и их продуктивности проводились в разные сезоны года на многих водных объектах, включая моря [7, 18]. Суточные колебания содержания РК могут использоваться для оценки величин первичной продукции и деструкции органического вещества [1, 18].

В данной работе проанализирована динамика РК в покрытом льдом небольшом озере в период весенней подледной конвекции по данным высокочастотных измерений в течение десяти сезонов. Цель работы — исследовать динамику РК и влияние на нее различных факторов в малом мезотрофном озере в период весеннего подледного прогрева в условиях отсутствия газообмена с атмосферой.

**Методика исследований.** Измерения проводились на небольшом оз. Вендюрском, расположенном в южной части Карелии ( $62^{\circ}10'—62^{\circ}20'$  с. ш.,  $33^{\circ}10'—33^{\circ}20'$  в. д.). Площадь зеркала озера  $10.4 \text{ км}^2$ , длина  $\sim 7.0$ , ширина  $\sim 1.5—2.0 \text{ км}$ , объем воды  $\sim 5.5 \cdot 10^7 \text{ м}^3$ , средняя глубина  $5.3$ , максимальная —  $13.4 \text{ м}$ . Прозрачность воды по диску Секки — около  $3 \text{ м}$ , коэффициент экстинкции  $\sim 1.0 \text{ м}^{-1}$  [3]. По содержанию в воде органического вещества озеро относится к олиго-мезогумозным водоемам, по минерализации — ультрапресное, рН  $6—7.4$  [5]. При установлении термической стратификации в придонных слоях центральной котловины формируется дефицит кислорода [4, 23]. Озеро Вендюрское является типичным представителем группы озер водно-ледникового происхождения, широко распространенных на территории Северо-Запада Европейской России.

С июля 2007 г. до октября 2018 г. в центральной глубоководной части озера находилась коса, оснащенная 15 датчиками температуры (точность  $0.002 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и кислорода (диапазон  $0 \dots 150 \%$ , точность  $\pm 1 \%$ ) «RBR Ltd»; дискретность измерений — одна минута. В июне и октябре коса извлекалась из озера на 2—4 сут для снятия данных, калибровки датчиков и замены элементов питания. В период весенней подледной конвекции (вторая-третья декады апреля) в 2008—2018 гг. проводились измерения толщины льда, температуры воды и концентраций хлорофилла «а» с помощью зонда CTD-90M «Sea & Sun Technology» и потоков солнечной радиации на верхней и нижней границах льда с использованием пиранометров «Star-shaped pyranometer» «Theodor Fridrich & Co, Meteorologische Geräte und Systeme» и прибора, сконструированного на базе универсального пиранометра «М-80м».

Для расчетов колебаний растворенного кислорода в конвективном слое за разные годы использовались данные с датчика, расположенного на косе максимально близко к верхней части этого слоя. В связи с тем, что в некоторые годы верхний датчик косы не срабатывал, использовались данные с ближайших соседних датчиков, расположенных на больших глубинах. Поскольку в конвективном слое концентрация РК с глубиной практически не изменялась, то такая замена датчиков для анализа была принята допустимой.

Величины деструкции и продукции РК определялись по амплитудам его сглаженных колебаний в КПС с суточным периодом после удаления низкочастотных колебаний ( $>1 \text{ сут}$ ) и тренда, обусловленного вовлечением обедненных кислородом вод из стратифицированного слоя. Средняя скорость деструкции кислорода определялась по его уменьшению от максимума до минимума в темное время суток. Продукция кислорода в результате фотосинтеза вычислялась по величине прироста от минимума до максимума за светлое время суток (продолжительность периода с потоком солнечной радиации под льдом  $>1 \text{ Вт/м}^2$ ) с учетом средней скорости его уменьшения в результате деструкции.

Спектральный анализ временных рядов кислорода выполнялся методом простого преобразования Фурье. При разделении колебаний на разные частоты применялись узкополосные цифровые фильтры и скользящие средние, в которых учитывались установленные в результате спектрального анализа периоды колебаний.

**Результаты и их обсуждение.** Пространственная и временная изменчивость концентрации РК в озерах определяется физическими, химическими и биологическими процессами; динамика РК как неконсервативной примеси описывается уравнением:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \left( u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} \right) - (D_t + D_m) \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = P - S + A - B, \quad (1)$$

где:  $C$  — концентрация РК;  $t$  — время;  $u$ ,  $v$  и  $w$  — компоненты вектора скорости течений вдоль осей  $x$ ,  $y$  и  $z$  в декартовой системе координат;  $D_t$  и  $D_m$  — коэффициенты турбулентной и молекулярной диффузии;  $P$  — выделение РК в процессе фотосинтеза;  $S = S_\phi + S_s + S_b$  — его убыль за счет дыхания фито-, зоопланктона и бактерий (деструкция);  $A$  — газообмен с атмосферой;  $B$  — потребление РК на окисление органических веществ на границе вода—дно;  $P - S$  — чистая продукция планктона и бактерий, которая в озерах в разные моменты времени может быть как положительной, так и отрицательной величиной [1]. Поскольку в покрытом льдом озере газообменом с атмосферой можно пренебречь, а потребление РК на границе вода—дно не оказывает влияния на его динамику в поверхностных слоях озера, высокочастотная изменчивость РК в КПС определяется суммарным воздействием биологических (слагаемые  $P$  и  $S$ ) и гидродинамических процессов.

Анализ данных за все годы измерений на оз. Вендюрском показал, что в период открытой воды в поверхностном слое концентрация РК в дневные часы была обычно выше, чем в ночные, на 0.2—0.3 мг/л. В зимний период выраженные различия между концентрациями РК в дневные и ночные часы отсутствовали. В период весеннего подледного прогрева во все годы измерений в поверхностных слоях озера наблюдалась суточная цикличность РК с максимумом в дневные часы и минимумом ночью. Интенсивность суточных колебаний РК отличалась в разные годы наблюдений. В таблице приведены средние статистические характеристики колебаний РК в верхней части КПС.

В нижней части КПС амплитуда суточных колебаний уменьшалась, в стратифицированном слое колебания отсутствовали. Во все годы исследований прослеживалась суточная динамика хлорофилла «а» в КПС с максимумом

**Средние за период измерений амплитуды суточных колебаний РК ( $\Delta O_2$ ) в КПС и их стандартные отклонения в весенние сезоны 2008—2018 гг.**

**Average amplitudes of diurnal dissolved oxygen fluctuations ( $\Delta O_2$ ) in convectively mixed layer (CML) and their standard deviation during the spring seasons 2008—2018**

Год	Период	Глубина датчика РК, м	$\Delta O_2$ , мг/л	Ст. откл., мг/л
2008	02.04—09.05	2.50	0.33	0.20
2009	21.04—09.05	2.50	0.71	0.25
2010	01.04—02.05	2.23	0.40	0.25
2011	05.04—30.04	2.09	0.56	0.31
2012	12.04—05.05	3.53	0.25	0.21
2013	13.04—03.05	3.47	0.25	0.13
2015	02.04—02.05	3.34	0.59	0.32
2016	02.04—29.04	2.86	0.27	0.19
2017	06.04—15.05	1.69	0.17	0.11
2018	10.04—06.05	1.32	0.41	0.22

в дневные часы и минимумом ночью [6], следовательно, суточные колебания РК в КПС могли быть обусловлены суточным циклом фотосинтеза. Колебания РК с суточным периодом также наблюдались в покрытом льдом озере Товель (Италия), и связывались авторами с суточными ритмами фотосинтеза и дыхания [18].

Наряду с суточной изменчивостью РК, были выделены периоды от 2—3 мин до 9—15 ч, которые могли быть связаны с гидродинамическими процессам и явлениями, наблюдающимися в покрытых льдом озерах, такими как турбулентное перемешивание [11], конвекция и адвекция [10, 21], внутренние волны [17, 19].

Причины межгодовых различий амплитуд суточных колебаний РК в верхней части водного столба в мезотрофном озере в период весенней подледной конвекции в основном связаны с отличием погодных условий в разные годы, которые определяют толщину и структуру снежно-ледяного покрова, скорость его таяния, и, как следствие, уровень подледной освещенности, интенсивность конвекции и фотосинтеза. В разные годы отличается скорость конвективно-го перемешивания, следовательно, отличается и количество питательных веществ, которое вовлекается в фотическую зону из нижележащих слоев озера; отличаются температура воды в КПС, уровень подледной освещенности, поэтому и интенсивность фотосинтеза подо льдом весной также отличается от года к году. Как показано в работе [6], в период весенней подледной конвекции в оз. Вендюрском по концентрациям хлорофилла «а» преобладают зеленые и диатомовые водоросли, при этом по биомассе преобладают диатомовые. В годы, когда диатомовые водоросли развиваются слабо, концентрация хлорофилла «а» в КПС заметно ниже, в эти же годы меньше выражены суточные колебания РК (2012, 2013, 2017). В годы с хорошо выраженным фотосинтезом диатомовых суточные колебания РК максимальны (2009—2011, 2015).

В период весеннего прогрева в апреле 2009 г. суточные колебания РК в подледном слое озера были наиболее ярко выражены за все годы измерений (см. таблицу, рис. 1, в). Измерения на льду озера проводились в период с 21 по 28 апреля 2009 г. На фоне теплой солнечной погоды происходило интенсивное таяние снежно-ледяного покрова: в начале измерений снег составлял 2—5 см, лед ~61 см, к 23 апреля снег растаял; к 28 апреля толщина льда уменьшилась до 48 см. Альбеде заснеженной поверхности 21 и 22 апреля составляло 0.6—0.7, с 23 апреля до конца измерений — не превышало 0.3. Подледная облученность постепенно увеличивалась, и, начиная с 23 апреля, количество проникающей под лед солнечной радиации в полдень достигало 100—120 Вт/м<sup>2</sup> (рис. 1, а).

Весенний подледный прогрев в 2009 г. начался в конце второй декады апреля; к 23 апреля сформировался КПС. В течение последней недели апреля прирост температуры воды в КПС за дневные часы составлял 0.1—0.2°C, а с 1 по 7 мая — 0.2—0.3°C (рис. 1, б). В результате конвективного перемешивания нижняя граница КПС к моменту разрушения льда (8 мая) увеличилась до 9 м, а температура воды в нем возросла до 3.9°C. До начала конвективно-го перемешивания концентрация РК в поверхностном слое озера достигала 10—11 мг/л, снижаясь с увеличением глубины; у дна наблюдался выраженный дефицит кислорода (рис. 1, в).

При увеличении толщины КПС почти на два метра в период с 24 по 28 апреля (рис. 2, а, в) концентрация суммарного хлорофилла «а» в этом слое почти не изменилась и достигала по всей его толщине ~1 мкг/л (рис. 2, б, з),

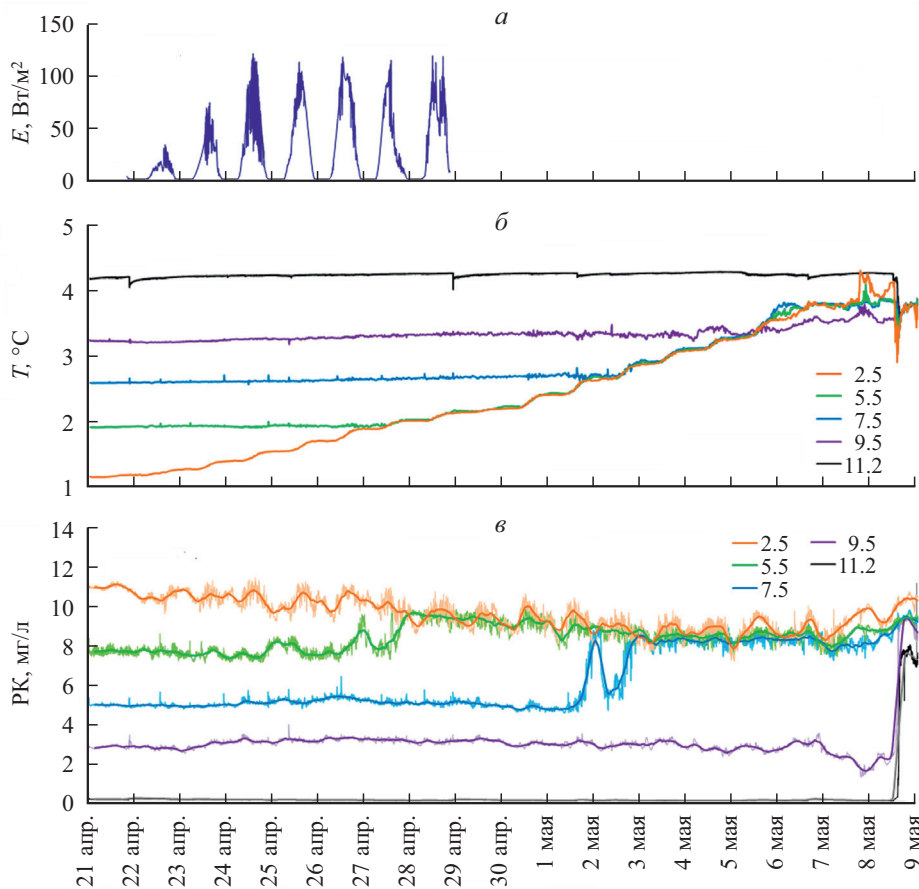


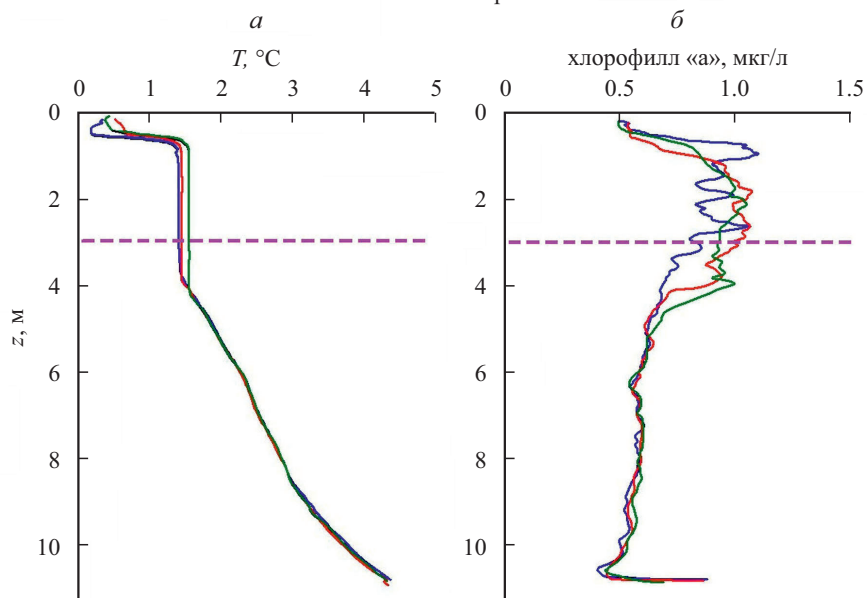
Рис. 1. Изменение потока солнечной радиации на нижней границе льда (а), температуры воды (б) и концентрации РК (е) в центральной части оз. Вендюрского в период с 21 апреля по 9 мая 2009 г. Тонкие линии на панели (е) — исходные данные, толстые линии — сглаживание рядов фильтром скользящего среднего  $\pm 3$  ч. На рисунке приведены глубины горизонтов измерений в метрах.

Fig. 1. Variations of solar radiation flux at the lower boundary of ice (a), water temperature (б), and the DO concentration (е) in the central part of Lake Vendyurskoe from April 21 to May 9, 2009. The thin lines on the panel (е) indicate the original data, the thick lines show the series smoothing with a moving average filter of  $\pm 3$  h. Depths of measurement horizons are given in meters.

что свидетельствует о заметном приросте биомассы фитопланктона за этот период. Несмотря на то что нижняя граница фотической зоны составляла 3—3.5 м (рис. 2), концентрация хлорофилла «а» была практически равномерно распределена по КПС до глубин 4—6 м, что свидетельствует о важной роли конвективного перемешивания в переносе клеток водорослей по водному столбу и влиянию таким образом на процесс фотосинтеза в покрытых льдом водоемах [6, 16, 20].

Суточные колебания РК с максимумом концентрации в дневные часы и минимумом ночью появились в поверхностном слое озера 21 апреля и наблюдались вплоть до взлома льда 8 мая (см. рис. 1, е). Максимальные амплитуды суточных флуктуаций РК (более 1 мгО<sub>2</sub>/л) наблюдались на горизонте 2.5 м

24 апреля



28 апреля

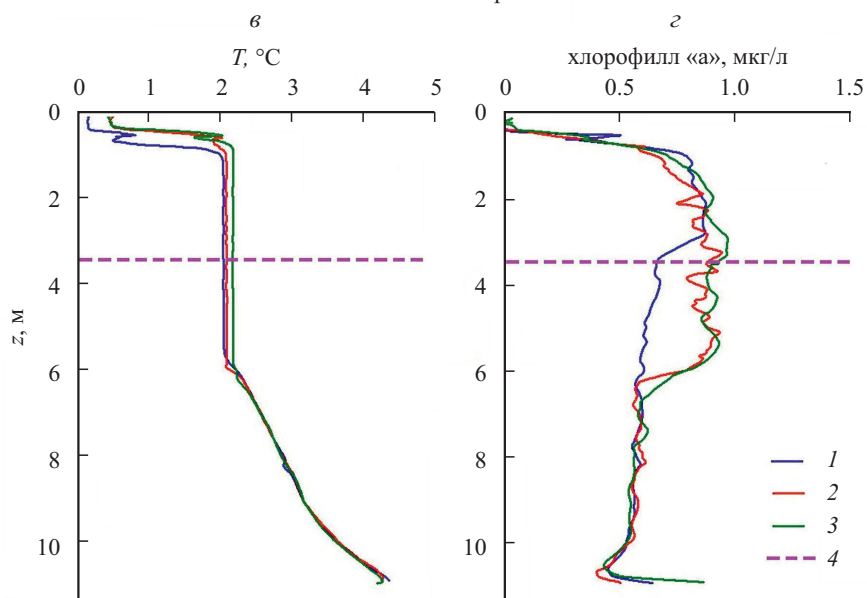


Рис. 2. Вертикальные профили температуры воды (а, в) и концентрации хлорофилла «а» (б, г) 24 и 28 апреля 2009 г.; 1, 2 и 3 — 9, 12 и 18 ч соответственно, 4 — нижняя граница фотической зоны.

Fig. 2. The vertical profiles of water temperature (а, в) and concentration of chlorophyll «а» (б, г) on April 24 and April 28, 2009. 1, 2, and 3 lines indicate 9, 12, and 18 h, respectively, 4 shows the lower boundary of the photic zone.

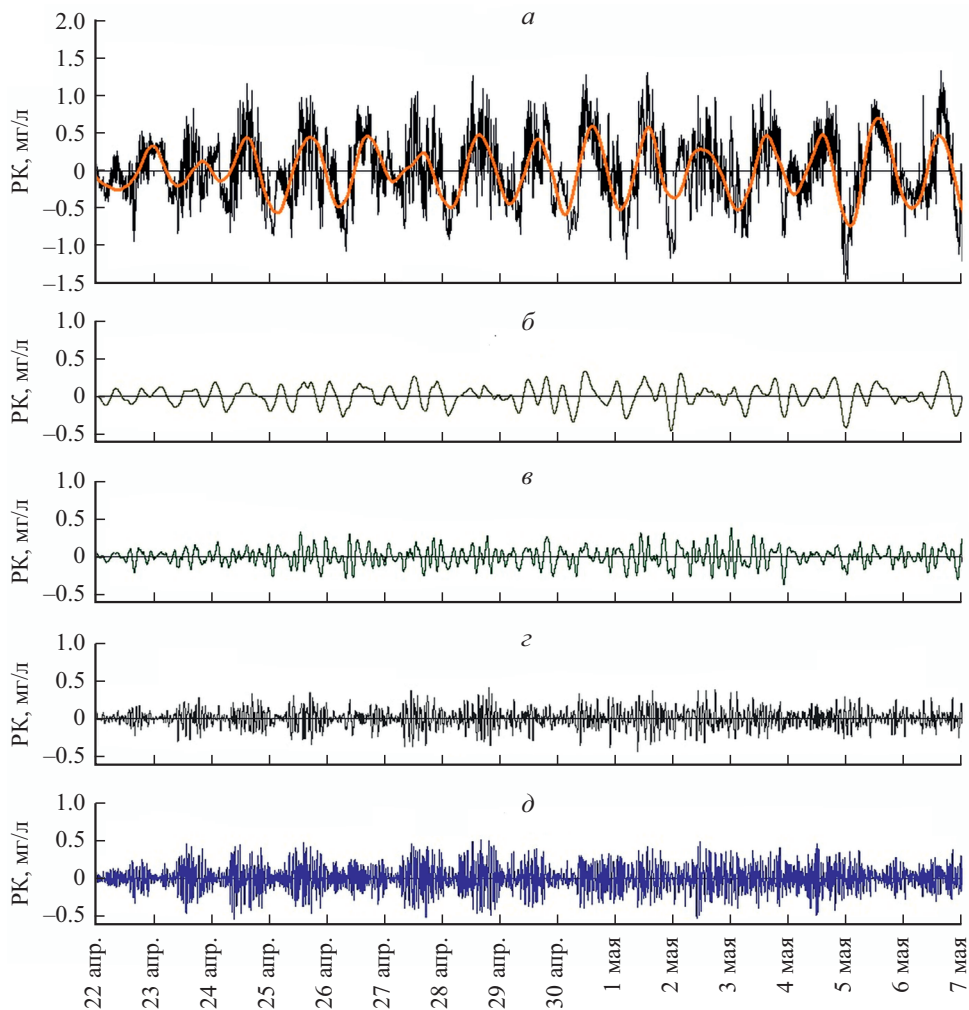


Рис. 3. Амплитуды колебаний РК на горизонте 2.5 м в центральной части оз. Вендюрского с 22 апреля по 7 мая 2009 г. Выделенные флуктуации РК после удаления многосуточных трендов и наложенные на них суточные ритмы (а); колебания с периодами 9—15 ч (б), 3—4 ч (в), 1—2 ч (г), 22—32 мин (д).

Fig. 3. The amplitudes of dissolved oxygen (DO) oscillations on the 2.5 m depth in the central part of Lake Vendyurskoe from April 22 to May 7, 2009. Selected DO fluctuations after the removal of multi-day trends and the daily rhythms imposed on them (a); fluctuations with periods of 9—15 h (б), 3—4 h (в), 1—2 h (г), 22—32 min (д).

(рис. 3, а). С увеличением глубины амплитуда суточных колебаний РК уменьшалась и практически не проявлялась на горизонте 7.5 м и ниже (см. рис. 1, в).

Колебания с периодами 1—2, 3—4 и 9—15 ч имели амплитуды от 0.1 до 0.5 мгО<sub>2</sub>/л (рис. 3, б—г). Квазигармонические колебания с периодами от 26 до 30 мин (рис. 3, д) близко соответствовали периоду продольной сейши и были зарегистрированы на всех горизонтах, за исключением придонного (11.2 м). Амплитуды колебаний с этим периодом обычно увеличивались в дневные часы и достигали 0.5—1.0 мгО<sub>2</sub>/л.

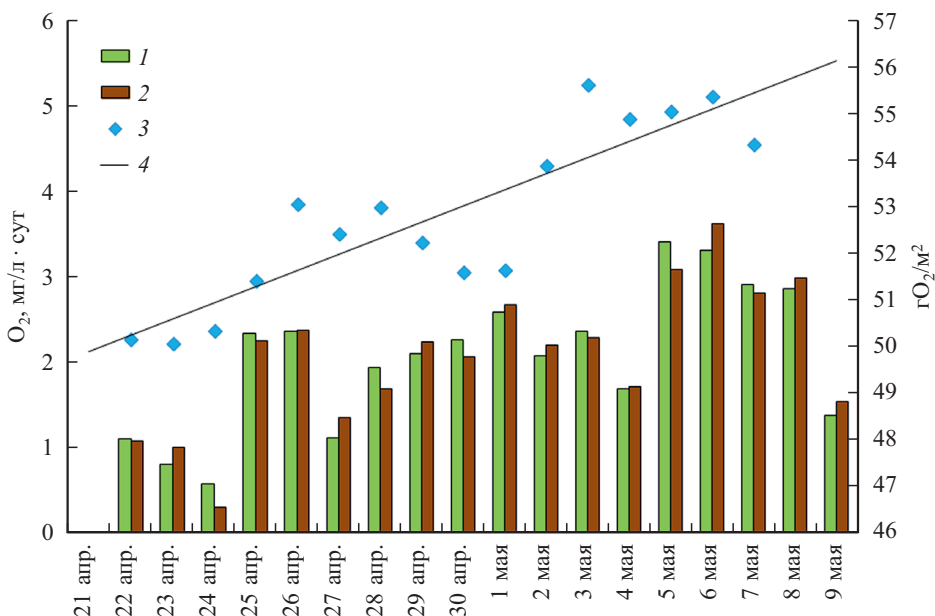


Рис. 4. Продукция (1) и деструкция (2) кислорода, а также изменение его среднесуточного количества по водному столбу (3) в центральной части оз. Вендюрского в период с 22 апреля по 8 мая 2009 г. 4 — линейный тренд.

Fig. 4. Production (1) and destruction (2) of oxygen, as well as the change in its average daily amount in water column (3) in the central part of the lake Vendyurskoe from April 22 to May 8, 2009. Line 4 is the linear trend.

Рост амплитуды колебаний с периодами от 2—3 мин до 3—4 ч в дневное время, вероятно, был обусловлен активизацией гидродинамических процессов в КПС на фоне роста подледной облученности. По данным измерений течений в оз. Вендюрском в период весенней подледной конвекции в апреле 2016 г. было установлено, что в КПС идентифицируются сейшевые колебания скоростей с периодами 20—30 мин и конвективные движения с периодом в несколько часов, интенсифицирующиеся по мере роста подледной облученности [2]. Колебания с периодами 9—15 ч, предположительно, могли быть связаны с активностью внутренних волн. Наличие таких волн в покрытых льдом водоемах обсуждается в работе [17], где колебания температуры с близким к полусуточному периодом в мелководном оз. Мюнгельзее (Германия) трактуются авторами как вращающиеся волны Кельвина и Пуанкарэ.

В период весеннего подледного прогрева содержание РК в КПС постепенно снижалось (см. рис. 1, в), что было обусловлено вовлечением в перемешивание вод нижележащего стратифицированного слоя с низкой концентрацией РК. Однако, расчеты изменения среднего за сутки количества РК по водному столбу (от верхнего горизонта 2.5 м до дна) показывают, что за период весеннего подледного прогрева в 2009 г. произошло увеличение содержания РК в озере на ~10 % (рис. 4).

Средние суточные колебания кислорода в КПС, отнесенные к светлomu времени суток, определенному, например, как период с потоком солнечной радиации подо льдом >1 Вт/м<sup>2</sup>, позволяют оценить среднюю скорость про-



дукции кислорода в результате фотосинтеза, а к темному времени суток — среднюю скорость деструкции кислорода. Такие расчеты, выполненные для периода весеннего подледного прогрева в 2009 г., показали постепенное увеличение скоростей продукции и деструкции по мере роста подледной облученности и интенсификации конвекции (см. рис. 4). В некоторые дни, например 1—2 мая, преобладала деструкция, но наблюдалось увеличение количества РК по водному столбу. Такие аномалии могут быть результатом влияния гидродинамических факторов, например адвективного переноса обогащенных кислородом вод с мелководий в центральную часть озера, где располагалась станция измерений. Существенная роль адвективного переноса в перемешивании покрытого льдом озера показана по результатам измерений температуры на оз. Пааярви (Финляндия) в период весенней подледной конвекции [21]. Увеличение концентраций РК в ночные часы за счет адвекции в покрытом льдом оз. Товель обсуждается в работе [18].

Оценки первичной продукции по изменению содержания кислорода в естественных условиях в водоемах имеют слабые стороны из-за сложности учета гидродинамических процессов. Однако линейный тренд, приведенный на рис. 4, вероятнее всего, обусловлен продукцией фитопланктона и, если не принимать во внимание адвективный перенос РК (оценить который по данным измерений только в центральной части озера невозможно), может служить для оценки ее величины в КПС.

**Заключение.** Анализ данных многолетних измерений температуры, подледной облученности, концентраций РК и хлорофилла «а» в небольшом мезотрофном озере позволил изучить динамику РК в период весенней подледной конвекции и выявить факторы, оказывающие влияние на нее. Показано, что весной рост подледной облученности, развитие фотосинтеза и гидродинамические процессы и явления могут оказывать влияние на вертикальную структуру и временную динамику РК в мелководных озерах. Вегетационный период в малом мезотрофном озере наступает после стаивания снега и соответствует началу весеннего подледного прогрева. Глубина фотической зоны постепенно увеличивается по мере таяния льда и роста подледной облученности, что приводит к интенсификации фотосинтеза. Выделенные колебания РК с суточным периодом в наиболее освещенной фотической зоне обусловлены, предположительно, суточным циклом фотосинтеза и деструкцией органического вещества. Распределение хлорофилла «а» по КПС ниже фотической зоны выявляет роль конвективных токов в развитии процесса фотосинтеза в покрытых льдом водоемах. Конвективные токи влияют также на вертикальное распределение РК, вовлекая в перемешивание обедненные кислородом воды нижележащего стратифицированного слоя, что приводит к некоторому снижению концентраций РК в КПС. По мере роста подледной облученности и интенсификации конвекции наблюдается постепенное увеличение скоростей продукции и деструкции, а общее количество кислорода в озере в течение периода весенней подледной конвекции может увеличиться на 10 %. Гидродинамика покрытого льдом озера оказывает заметное влияние на высокочастотную изменчивость кислорода в этот период. Колебания РК с периодами от 2—3 мин до 9—15 ч могут быть обусловлены сейшевой активностью, формированием конвективных ячеек, адвективным переносом и динамикой внутренних волн.

Полученные в работе результаты будут способствовать лучшему пониманию изменчивости РК в покрытых льдом озерах, обусловленной суммарным воздействием биологических и гидрофизических процессов.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института водных проблем Севера — обособленного подразделения ФГБУ науки ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук».

### Список литературы

- [1] Винберг Г. Г. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР, 1960. 329 с.
- [2] Волков С. Ю., Богданов С. Р., Здорovenнова Г. Э., Здорovenнов Р. Э., Пальшин Н. И., Тержевик А. Ю. Крупномасштабная структура конвективного перемешанного слоя в мелководном озере подо льдом // ФПГ. 2019. Т. 12. № 1. С. 30—39.
- [3] Гавриленко Г. Г., Здорovenнова Г. Э., Здорovenнов Р. Э., Пальшин Н. И., Ефремова Т. В., Тержевик А. Ю. Пространственно-временная изменчивость потока фотосинтетически активной солнечной радиации в мелководном озере в период открытой воды // Общество. Среда. Развитие. 2015. № 3. С. 186—192.
- [4] Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Здорovenнова Г. Э., Тержевик А. Ю. Влияние экстремально жаркого лета 2010 г. на температуру воды и распределение кислорода в озерах Карелии // Метеорол. и гидрол. № 9. 2015. № 9. С. 67—76.
- [5] *Озера Карелии*. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 463 с.
- [6] Пальшин Н. И., Здорovenнова Г. Э., Здорovenнов Р. Э., Ефремова Т. В., Гавриленко Г. Г., Тержевик А. Ю. Влияние весенней подледной освещенности и конвективного перемешивания на распределение хлорофилла «а» в малом мезотрофном озере // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, вып. 3. С. 259—269.
- [7] Хатчинсон Д. Лимнология. Географические, физические и химические характеристики озер. М.: Прогресс (пер. с англ.), 1969. 592 с.
- [8] Baehr M. M., DeGrandpre M. D. Under-ice CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> variability in a freshwater lake // Biogeochemistry. 2002. Vol. 61. P. 95—113.
- [9] Barica J., Mathias J. A. Oxygen depletion and winterkill risk in small prairie lakes under extended ice cover // J. Fish. Res. Board Can. 1979. No. 36. P. 980—986.
- [10] Bogdanov S., Zdorovennova G., Volkov S., Zdorovennov R., Palshin N., Efremova T., Terzhevik A., Bouffard D. Structure and dynamics of convective mixing in Lake Onego under ice-covered conditions // Inland waters. 2019. <https://doi.org/10.1080/20442041.2018.1551655>.
- [11] Bouffard D., Wüest A. Convection in Lakes // Annual Review of Fluid Mechanics. 2019. 51(1). P. 189—215. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010518-040506>.
- [12] Couture R.-M., de Wit H. A., Tominaga K., Kiuru P., Markelov I. Oxygen dynamics in a boreal lake responds to long-term changes in climate, ice phenology, and DOC inputs // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2015. 120. P. 2441—2456. doi:10.1002/2015JG003065.
- [13] Hampton S. E., Galloway A. W. E., Powers S. M., Ozersky T., Woo K. H., Batt R. D., Labou S. G., O'Reilly C. M., Sharma S., Lottig N. R., Stanley E. H., North R. L., Stockwell J. D., Adrian R., Weyhenmeyer G. A., Arvola L., Baulch H. M., Bertani I., Bowman Jr. L. L., Carey C. C., Catalan J., Colom-Montero W., Domine L. M., Felip M., Granados I., Gries C., Grossart H.-P., Haberman J., Haldna M., Hayden B., Higgins S. N., Jolley J. C., Kahilainen K. K., Kaup E., Kehoe M. J., MacIntyre S., Mackay A. W., Mariash H. L., McKay R. M., Nixdorf B., Nöges P., Nöges T., Palmer M., Pierson D. C., Post D. M., Prueitt M. J., Rautio M., Read J. S., Roberts S. L., Rücker J., Sadro S., Silow E. A., Smith D. E., Sterner R. W., Swann G. E. A., Timofeyev M. A., Toro M., Twiss M. R., Vogt R. J., Watson S. B., Whiteford E. J., Xenopoulos M. A. Ecology under ice // Ecol. Lett. 2017. 20(1). P. 98—111. DOI: 10.1111/ele.12699.
- [14] Huotari J., Ojala A., Peltomaa E., Nordbo A., Launiainen S., Pumpanen J., Rasilo T., Hari P., Vesala T. Longterm direct CO<sub>2</sub> measurements over a boreal lake: five years of eddy covariance data // Geophys. Res. Lett. 2011. 38: L18401.
- [15] Golosov S., Terzhevik A., Zverev I., Kirillin G., Engelhardt C. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes // Tellus A. 2012. No. 64. P. 17 264.

- [16] *Kelley D. E.* Convection in ice-covered lakes: effects on algal suspension // *J. Plankton. Res.* 1997. Vol. 19. P. 1859—1880.
- [17] *Kirillin G., Engelhardt C., Golosov S., Hintze T.* Basin-scale internal waves in the bottom boundary layer of ice-covered Lake Müggelsee, Germany // *Aquat. Ecol.* 2009. 43(3). P. 641—651.
- [18] *Obertegger U., Obrador B., Flaim G.* Dissolved oxygen dynamics under ice: Three winters of high-frequency data from Lake Tovel, Italy // *Water Resources Research.* 2017. 53(8). P. 7234—7246. <https://doi.org/10.1002/2017WR020599>.
- [19] *Palshin N. I., Bogdanov S. R., Zdorovenova G. E., Zdorovenov R. E., Efremova T. V., Belashev B. Z., Terzhevik A. Yu.* Short Internal Waves in a Small Ice-Covered Lake // *Water Resources.* 2018. 45(5). P. 695—705.
- [20] *Pernica P., North R. L., Baulch H. M.* In the cold light of day: the potential importance of under-ice convective mixed layers to primary producers // *Inland Waters.* 2017. 7(2). P. 138—150.
- [21] *Salonen K., Pulkkanen M., Salmi P., Griffiths R. W.* Interannual variability of circulation under spring ice in a boreal lake // *Limnol. Oceanogr.* 2014. Vol. 59. No. 6. P. 2121—2132.
- [22] *Staehr P. A., Bade D., Van de Bogert M. C., Koch G. R., Williamson C., Hanson P., Cole J. J., Kratz T.* Lake metabolism and the diel oxygen technique: State of the science // *Limnol. Oceanogr. Methods.* 2010. 8. P. 628—644.
- [23] *Terzhevik A., Golosov S., Palshin N., Mitrokhov A., Zdorovenov R., Zdorovenova G., Kirillin G., Shipunova E., Zverev I.* Some features of the thermal and dissolved oxygen structure in boreal, shallow ice-covered Lake Vendyurskoe, Russia // *Aquatic Ecology.* 2009. Vol. 43. P. 617—627. DOI: 10.1007/s10452-009-9288-x
- [24] *Zdorovenov R., Palshin N., Zdorovenova G., Efremova T., Terzhevik A.* Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake // *Est. J. Earth Sci.* 2013. No. 61(1), P. 26—32.
- [25] *Zdorovenova G., Palshin N., Zdorovenov R., Golosov S., Efremova T., Gavrilenko G., Terzhevik A.* The oxygen regime of shallow lake // *Geography, Environment, Sustainability.* 2016. No. 2. P. 47—57.

---

## Diurnal dynamics of dissolved oxygen in the small mesotrophic lake during the under-ice heating period

© *N. I. Palshin,<sup>1</sup> T. V. Efremova,<sup>2</sup> G. E. Zdorovenova,<sup>3</sup> G. G. Gavrilenko,<sup>4</sup> R. E. Zdorovenov,<sup>5</sup> A. Yu. Terzhevik,<sup>6</sup> S. Yu. Volkov,<sup>7</sup> S. R. Bogdanov<sup>8</sup>*

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

E-mail: <sup>1</sup> npalshin@mail.ru

<sup>2</sup> efremova@nwpi.krc.karelia.ru

<sup>3</sup> zdorovenova@gmail.com

<sup>4</sup> gg.gavrylenko@gmail.com

<sup>5</sup> romga@gmail.com

<sup>6</sup> ark1948@list.ru

<sup>7</sup> taranarmo@gmail.com

<sup>8</sup> Sergey.R.Bogdanov@mail.ru

The article investigates the dynamics of the dissolved oxygen (DO) content, the water temperature, the chlorophyll «a» and the under-ice irradiation in the small mesotrophic lake during the springtime heating period. All data were obtained from long-term observations using high-precision autonomous equip-

ment. In the convectively mixed layer (CML) were recorded the DO oscillations up to 1 mgO<sub>2</sub>/l with daily frequency. Assumedly, these fluctuations are due to the daytime intensification of the photosynthesis on the background of under-ice irradiation growth (reaching 120 W/m<sup>2</sup> when snow melts from ice surface) and the destruction of newly formed organic matter.

The CML also exhibits the high-frequency DO fluctuations (on scales from 2—3 minutes to 3—4 hours), presumably related to convective currents and seiche activity. The involvement of oxygen-depleted water portions from underlying stratified layer to convective mixing leads to decrease of DO concentration in CML, but the total oxygen content in the water column during the under-ice convection period increases at a rate ~0.1—0.4 gO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> per day due to photosynthesis enhance.

**Key words:** mesotrophic lake, under-ice heating, under-ice light, spring convection, photosynthesis, dissolved oxygen, water temperature, chlorophyll «a».

## References

- [1] *Vinberg G. G.* Pervichnaya produkcija vodoemov. Minsk: Izd-vo AN BSSR, 1960. 329 s.
- [2] *Volkov S. Yu., Bogdanov S. R., Zdorovennova G. E', Zdorovennov R. E., Palshin N. I., Terzhevik A. Yu.* Krupnomasshtabnaya struktura konvektivnogo peremeshannogo sloya v melkovodnom ozere podo l'dom // FPG. 2019. T. 12. No. 1. S. 30—39.
- [3] *Gavrilenko G. G., Zdorovennova G. E', Zdorovennov R. E', Palshin N. I., Efremova T. V., Terzhevik A. Yu.* Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' potoka fotosinteticheski aktivnoj solnechnoj radiacii v melkovodnom ozere v period otkrytoj vody // Obshhestvo. Sreda. Razvitie. 2015. No. 3. S. 186—192.
- [4] *Efremova T. V., Pal'shin N. I., Zdorovennova G. E', Terzhevik A. Yu.* The effects of extremely hot summer 2010 on water temperature and oxygen distribution in Karelian lakes // Russian Meteorology and Hydrology. 2015. Vol. 40. No. 9. P. 612—618.
- [5] *Ozera Karelii.* Petrozavodsk: KarNC RAN, 2013. 463 s.
- [6] *Palshin N. I., Zdorovennova G. E', Zdorovennov R. E', Efremova T. V., Gavrilenko G. G., Terzhevik A. Yu.* Effect of Under-Ice Light Intensity and Convective Mixing on Chlorophyll a Distribution in a Small Mesotrophic Lake// Water Resources. 2019. Vol. 46. No. 3. P. 384—394.
- [7] *Xatchinson D.* Limnologiya. Geograficheskie, fizicheskie i ximicheskie xarakteristiki ozer. M.: Progress (per. s angl.), 1969. 592 s.
- [8] *Baehr M. M., DeGrandpre M. D.* Under-ice CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> variability in a freshwater lake // Biogeochemistry. 2002. Vol. 61. P. 95—113.
- [9] *Barica J., Mathias J. A.* Oxygen depletion and winterkill risk in small prairie lakes under extended ice cover // J. Fish. Res. Board Can. 1979. No. 36. P. 980—986.
- [10] *Bogdanov S., Zdorovennova G., Volkov S., Zdorovennov R., Palshin N., Efremova T., Terzhevik A., Bouffard D.* Structure and dynamics of convective mixing in Lake Onego under ice-covered conditions // Inland waters. 2019. <https://doi.org/10.1080/20442041.2018.1551655>.
- [11] *Bouffard D., Wüest A.* Convection in Lakes // Annual Review of Fluid Mechanics. 2019. 51(1). P. 189—215. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010518-040506>.
- [12] *Couture R.-M., de Wit H. A., Tominaga K., Kiuru P., Markelov I.* Oxygen dynamics in a boreal lake responds to long-term changes in climate, ice phenology, and DOC inputs // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2015. 120. P. 2441—2456. doi:10.1002/2015JG003065.
- [13] *Hampton S. E., Galloway A. W. E., Powers S. M., Ozersky T., Woo K. H., Batt R. D., Labou S. G., O'Reilly C. M., Sharma S., Lottig N. R., Stanley E. H., North R. L., Stockwell J. D., Adrian R., Weyhenmeyer G. A., Arvola L., Baulch H. M., Bertani I., Bowman Jr. L. L., Carey C. C., Catalan J., Colom-Montero W., Domine L. M., Felip M., Granados I., Gries C., Grossart H.-P., Haberman J., Haldna M., Hayden B., Higgins S. N., Jolley J. C., Kahilainen K. K., Kaup E., Kehoe M. J., MacIntyre S., Mackay A. W., Mariash H. L., McKay R. M., Nixdorf B., Nöges P., Nöges T., Palmer M., Pierson D. C., Post D. M., Pruet M. J., Rautio M., Read J. S., Roberts S. L., Rucker J., Sadro S., Silow E. A., Smith D. E., Sterner R. W., Swann G. E. A., Timofeyev M. A.,*

- Toro M., Twiss M. R., Vogt R. J., Watson S. B., Whiteford E. J., Xenopoulos M. A.* Ecology under ice // *Ecol. Lett.* 2017. 20(1). P. 98—111. DOI: 10.1111/ele.12699.
- [14] *Huotari J., Ojala A., Peltomaa E., Nordbo A., Launiainen S., Pumpanen J., Rasilo T., Hari P., Vesala T.* Longterm direct CO<sub>2</sub> measurements over a boreal lake: five years of eddy covariance data // *Geophys. Res. Lett.* 2011. 38: L18401.
- [15] *Golosov S., Terzhevik A., Zverev I., Kirillin G., Engelhardt C.* Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes // *Tellus A.* 2012. No. 64. P. 17–264.
- [16] *Kelley D. E.* Convection in ice-covered lakes: effects on algal suspension // *J. Plankton. Res.* 1997. Vol. 19. P. 1859—1880.
- [17] *Kirillin G., Engelhardt C., Golosov S., Hintze T.* Basin-scale internal waves in the bottom boundary layer of ice-covered Lake Müggelsee, Germany // *Aquat. Ecol.* 2009. 43(3). P. 641—651.
- [18] *Obertegger U., Obrador B., Flaim G.* Dissolved oxygen dynamics under ice: Three winters of high-frequency data from Lake Tovel, Italy // *Water Resources Research.* 2017. 53(8). P. 7234—7246. <https://doi.org/10.1002/2017WR020599>.
- [19] *Palshin N. I., Bogdanov S. R., Zdorovenнова G. E., Zdorovenнов R. E., Efremova T. V., Belashev B. Z., Terzhevik A. Yu.* Short Internal Waves in a Small Ice-Covered Lake // *Water Resources.* 2018. 45(5). P. 695—705.
- [20] *Pernica P., North R. L., Baulch H. M.* In the cold light of day: the potential importance of under-ice convective mixed layers to primary producers // *Inland Waters.* 2017. 7(2). P. 138—150.
- [21] *Salonen K., Pulkkanen M., Salmi P., Griffiths R. W.* Interannual variability of circulation under spring ice in a boreal lake // *Limnol. Oceanogr.* 2014. Vol. 59. No. 6. P. 2121—2132.
- [22] *Staehr P. A., Bade D., Van de Bogert M. C., Koch G. R., Williamson C., Hanson P., Cole J. J., Kratz T.* Lake metabolism and the diel oxygen technique: State of the science // *Limnol. Oceanogr. Methods.* 2010. 8. P. 628—644.
- [23] *Terzhevik A., Golosov S., Palshin N., Mitrokhov A., Zdorovenнов R., Zdorovenнова G., Kirillin G., Shipunova E., Zverev I.* Some features of the thermal and dissolved oxygen structure in boreal, shallow ice-covered Lake Vendyurskoe, Russia // *Aquatic Ecology.* 2009. Vol. 43. P. 617—627. DOI: 10.1007/s10452-009-9288-x
- [24] *Zdorovenнов R., Palshin N., Zdorovenнова G., Efremova T., Terzhevik A.* Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake // *Est. J. Earth Sci.* 2013. No. 61(1), P. 26—32.
- [25] *Zdorovenнова G., Palshin N., Zdorovenнов R., Golosov S., Efremova T., Gavrilenko G., Terzhevik A.* The oxygen regime of shallow lake // *Geography, Environment, Sustainability.* 2016. No. 2. P. 47—57.

Поступила в редакцию 08.07.2019 г.

После доработки 29.07.2019 г.

Принята к публикации 30.07.2019 г.