

УДК 556.555.4

## ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕРМИЧЕСКОГО И КИСЛОРОДНОГО РЕЖИМОВ МЕЛКОВОДНОГО ОЗЕРА ЗИМОЙ

**Р. Э. Здравеннов, Г. Э. Здравеннова, Н. И. Пальшин,  
А. Ю. Тержевик**

*Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН*

Формирование зимнего термического и кислородного режимов небольшого озера Вендюрского (юг Карелии) рассмотрено на основании анализа данных трехлетних экспедиционных исследований, проведенных с использованием высокоточного автономного оборудования. Спектральный анализ позволил выделить основные периоды изменчивости температуры, содержания растворенного кислорода и давления, составившие от нескольких минут до 1–12 сут. Показано, что ведущую роль в динамике озера зимой играют сейши, возникающие вследствие ветрового воздействия на лед и прохождения барических образований над акваторией озера, адвективный перенос, обусловленный неравномерностью прогрева донных отложений и особенностями батиметрии озерной котловины, а также весеннее конвективное перемешивание.

Ключевые слова: мелководное озеро, термодинамический режим, растворенный кислород, подледный период, внутренние волны.

**R. E. Zdorovenov, G. E. Zdorovenova, N. I. Pal'shin, A. J. Terzhevik.  
VARIATION OF THE TEMPERATURE AND OXYGEN REGIMES OF A SHALLOW  
LAKE IN WINTER**

Thermal and dissolved oxygen dynamics in a small ice-covered lake Vendyurskoe (South Karelia) are considered on the basis of the data analysis carried out within the three-year field survey conducted with stand-alone precision equipment. Using FFT analysis we identified the main periods of variability of the temperature, dissolved oxygen and the pressure ranged from several minutes to 1–12 days. Seiches, presumably arising from the impact of wind on the ice and the change in atmospheric pressure over the lake, advective transport, caused by uneven heating of sediments and bathymetric features of the lake basin, as well as spring under-ice convective mixing play an important role in the dynamics of an ice-covered lake.

Key words: shallow lake, thermodynamic regime, dissolved oxygen, ice-cover period, internal wave.

### **Введение**

Термический и кислородный режимы покрытого льдом озера формируются в тесной связи с его динамическим режимом. При отсутствии ветро-волнового перемешивания и существенного речного стока важную роль в переносе вещества и энергии внутри водной массы

покрытого льдом озера начинают играть такие процессы, как молекулярная диффузия, конвективный и адвективный перенос. На этапе весенне-летнего нагревания водная масса и верхний слой донных отложений полимиктического озера накапливают тепло, на этапе осеннего охлаждения – отдают его в атмосферу. С появлением сплошного снежно-ледового покрова

теплопотери озера в атмосферу резко уменьшаются, а перенос тепла из донных отложений в воду продолжается, что приводит к повышению температуры придонного слоя воды. На мелководьях теплоток из донных отложений в воду выше, чем в глубоководных частях озер [Malm et al., 1997], поэтому температура воды придонного слоя там повышается быстрее. В связи с тем что при повышении температуры пресной воды от 0 до 4 °С ее плотность возрастает, более теплая и плотная вода с мелководий стекает по склонам дна в глубоководную часть озера; в центральной части озера появляются компенсационные восходящие потоки, так формируется устойчивая плотностная циркуляция, играющая важную роль в переносе тепла и растворенных веществ в условиях пониженного режима перемешивания [Mortimer, Mackereth, 1958; Bengtsson, 1996]. Адвективный перенос тепла, обусловленный неравномерностью прогрева донных отложений и особенностями батиметрии озерной котловины, наиболее значим в первый месяц зимы [Петров и др., 2006; Terzhevik et al., 2009]. Скорость потребления кислорода существенно зависит от температуры и скорости течения [Nakamura, Stefan, 1994], что наряду с большим количеством органического вещества и повышенной бактериальной активностью способствует появлению дефицита кислорода в зоне придонного термоклина [Goloso et al., 2007; Терзевик и др., 2010]. Воздействие ветра на ледовый покров или прохождение над акваторией озера барических образований может приводить к вертикальным смещениям льда и появлению в озере баротропных и бароклинных сейш [Bengtsson, 1986; Malm et al., 1998; Baehr, DeGrandpre, 2002; Петров и др., 2007], трансформирующихся вследствие батиметрических особенностей котловины в поступательные волны и участвующих в переносе вещества и энергии внутри водной толщи озера. Внутренние волны могут существенно усиливать процессы перемешивания в придонных слоях озер [Kirillin et al., 2009]. Весеннее подледное конвективное перемешивание [Matthews, Heaney, 1987; Mironov et al., 2001], проникающее на значительную глубину, играет важную роль в переносе тепла, растворенных веществ и газов [Kenney, 1996; Baehr, DeGrandpre, 2004]. Следует отметить, что, в отличие от термики, динамика покрытых льдом озер изучена слабо. Из опубликованных данных известно, что скорости течений в озере подо льдом невелики, имеют порядок от долей до нескольких мм в секунду [Malm et al., 1998], для измерения которых требуется прецизионное измерительное оборудование [Glinsky, 1998]. Использование

трейсеров дает лишь общее представление о подледной динамике [Colman, Armstrong, 1983; Bengtsson, 1986], поэтому зачастую заключения о зимнем динамическом режиме озера основываются на анализе более доступных и высокоточных измерений температуры и растворенных газов [Kenney, 1996; Baehr, DeGrandpre, 2002]. В настоящей работе рассмотрено формирование зимнего термического, кислородного и динамического режимов небольшого мелководного озера Вендюрского по данным трех последовательных лет наблюдений.

## Материалы и методы

Объект исследования – озеро Вендюрское, расположенное в южной части Карелии (62°10' N, 33°10' E). Площадь поверхности озера 10,4 км<sup>2</sup>, объем водной массы 54,8 · 10<sup>6</sup> м<sup>3</sup>, средняя и максимальная глубины 5,3 и 13,4 м [Литинская, Поляков, 1975]. Донные отложения представляют собой песок в прибрежной мелководной части озера и илы на больших глубинах. В октябре 2007–2009 гг. в глубоководной части озера на глубинах 11,1–11,45 м и на склоне на глубинах 6,88–7,5 м устанавливались косы, оснащенные высокочувствительными термо- (диапазон –5 ... +35 °С, точность ±0,0002 °С, разрешение <0,00005 °С), кислородными (диапазон 0 ... 150 %, точность ±1 %) и датчиками давления (20 и 100 дБар, точность ±0,05%, разрешение <0,001 %) производства канадской фирмы «RBR Ltd.» (рис. 1, табл.). Калибровка кислородных датчиков проводилась после замены мембран непосредственно перед установкой приборов в озеро. Дискретность измерений по времени – одна минута, дискретность расположения датчиков по вертикали – от нескольких см в придонных слоях до 1,0–1,5 м в водной толще. Косы удерживались в месте постановки грузом и плавающим в 1,5 м от поверхности бум. На момент постановки верхний датчик на косах располагался в 2,0–2,5 м от поверхности воды. Косы находились в озере

Сведения о термокосах, установленных в озере Вендюрском в 2007–2010 гг.

Период измерений	Станция, глубина, м	Измеряемые параметры
21.10.2007–26.05.2008	«Длинная» коса, 11,1 м	Т, РК, Р
19.10.2008–01.06.2009	«Короткая» коса, 6,88 м	Т, Р
17.10.2009–18.06.2010	«Длинная» коса, 11,45 м	Т, РК, Р
	«Короткая» коса, 7,40 м	Т, Р
	«Длинная» коса, 11,45 м	Т, РК, Р
	«Короткая» коса, 7,20 м	Т, РК, Р
	Станция 4-3, 7,5 м	Т, РК, Р

*Примечание.* Т – температура, РК – растворенный кислород, Р – давление.



Рис. 1. Батиметрическая карта оз. Вендюрского и положений термоклов в 2007–2010 гг:

1 – ст. 4-3, 2 – «длинная» коса, 3 – «короткая» коса

до конца мая – начала июня. В анализе погодных условий использовались данные (скорость ветра, атмосферное давление, дискретность измерений – 3 ч) по наиболее близко расположенной к району исследований метеостанции «Петрозаводск» (индекс WMO: 22820), полученные из архива погодных условий (<http://meteo.infospace.ru>).

### Результаты и обсуждение

Эволюция температурного и кислородного режимов озера в течение трех последовательных зим имела сходный характер. До ледостава озеро охлаждалось в состоянии гомотермии, за исключением тонкого придонного слоя воды толщиной несколько см, в котором сохранялся градиент температуры, достигающий до  $10\text{--}15\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^{-1}$ . Содержание растворенного кислорода (РК) по всей водной толще было равномерным и при 95%-ном насыщении составляло  $12,5\text{--}13,5\text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ . Замерзло озеро 14 ноября 2007, 12 декабря 2008, 11 ноября и 5 декабря 2009 г. при средней температуре воды около  $0,6, 0,5, 0,4$  и  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , соответственно. С первых же дней после замерзания наблюдалось повышение температуры и уменьшение содержания РК по всей водной толще, наиболее заметное в придонных слоях глубоководной части озера. К концу зимы за счет теплообмена с донными отложениями и перераспределения тепла адвективными течениями температура придонных слоев в глубоководной части озера на глубинах

$10\text{--}11\text{ м}$  повышалась до  $4,5\text{--}5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , на склоне в районе глубин  $7,0\text{--}7,5\text{ м}$  – до  $2,5\text{--}3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Оценки изменения теплосодержания столба воды по данным трех лет наблюдений показали, что в глубоководной части озера оно растет быстрее, а на склоновых станциях медленнее, чем следовало бы из разницы потоков на границах вода – лед и вода – дно, что косвенно подтверждает наличие в озере в течение зимы адвективного переноса тепла с мелководных участков в глубоководную часть. Подобный результат отмечен и в предыдущие годы измерений на озере [Malm et al., 1997; Zdorovenkova, 2009]. Как было показано ранее, ведущая роль в уменьшении содержания РК в водах озера зимой принадлежит его биохимическому потреблению [Тержевик и др., 2010]. Дефицит кислорода в придонных слоях глубоководной части озера появлялся уже в конце первого месяца ледостава, а к концу зимы толщина анаэробной зоны превышала  $0,5\text{ м}$ . На склоне на глубинах  $7,0\text{--}7,5\text{ м}$  к концу зимы наблюдалось снижение содержания РК в придонном слое  $0,5\text{ м}$  толщины до  $2\text{--}6\text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ . Оценки суммарной скорости процесса потребления РК  $\gamma$  были выполнены по уравнению [Тержевик и др., 2010]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\gamma C \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация РК,  $\gamma$  – суммарная скорость потребления РК;  $[\gamma] = \text{с}^{-1}$ ,  $t$  – время. Уравнению (1) соответствует аналитическое решение:

$$C = C_0 e^{-\gamma t}, \quad (2)$$

где  $C_0$  – концентрация РК в момент установления ледового покрова.

Наибольшие скорости потребления РК в 2008–2009 и 2009–2010 гг. наблюдались в течение первого месяца ледостава и имели порядок  $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ , затем значения  $\gamma$  очень быстро уменьшались и с конца первого месяца ледостава до конца зимы не превышали  $5,0 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ , что неплохо согласуется с расчетными значениями  $\gamma$  для зимы 2007–2008 гг., приведенными в [Тержевик и др., 2010].

Весенняя подледная конвекция начиналась в конце марта – начале апреля. Подо льдом формировался квазиоднородный конвективный слой, толщина и температура которого повышались на 0,1–0,5 м и 0,1–0,3 °C за сутки, соответственно. По мере вовлечения в конвективное перемешивание нижележащих слоев происходило выравнивание содержания РК по вертикали и уменьшение толщины анаэробной зоны в глубоководной части озера. Вскрытие ледового покрова происходило 10 мая 2008, 8 мая 2009, 1 мая 2010 г., после чего наблюдалось полное перемешивание водной толщи озера от поверхности до дна и исчезновение придонной анаэробной зоны в глубоководной части озера. В качестве примера на рис. 2 приведено изменение температуры и содержания РК в глубоководной части оз. Вендюрского зимой 2008–2009 гг.

В течение трех лет наблюдений на фоне сезонного увеличения температуры воды и уменьшения содержания РК отмечались их флуктуации с периодами от нескольких минут до нескольких дней и амплитудой 0,01–0,5 °C и 0,2–1,5 мг · л<sup>-1</sup>, соответственно. Максимальные по амплитуде колебания температуры регистрировались в тонком придонном слое толщиной 0,20–0,25 м как в глубоководной части озера, так и на склоновых станциях. Наибольшая

амплитуда колебаний содержания РК отмечалась в поверхностном слое водной массы. Колебания температуры с периодами 6–16 и 25–30 мин и амплитудой 0,01–0,02 °C отмечались на протяжении большей части зимних месяцев 2007–2010 гг. по всей водной толще; в придонном слое глубоководной части озера амплитуда таких колебаний была несколько выше (0,02–0,04 °C), а в придонном слое склоновой станции в январе – марте 2009 г. достигала 0,1–0,2 °C (рис. 3, а). Флуктуации содержания РК с амплитудой 0,2–0,8 мг · л<sup>-1</sup> и периодом 25–30 мин отмечались на протяжении всех зим в поверхностных слоях водной толщи озера (рис. 3, б). Наряду с осциллирующими, были зафиксированы отличные по форме, амплитуде и периоду колебания температуры в тонком придонном слое толщиной 0,20–0,25 м в глубоководной части озера. Резкое падение температуры на 0,2–0,8 °C в течение 5–20 мин сменялось плавным повышением в течение нескольких часов до исходного значения. Такие скачки температуры повторялись через 12–26 ч (рис. 3, в) и регистрировались в течение 2–3 недель в декабре 2007, феврале и декабре 2008, марте – апреле и декабре 2009, январе – феврале 2010 г. Также была зарегистрирована долгопериодная изменчивость содержания РК в поверхностном слое озера: на фоне незначительного сезонного понижения периодически отмечалось повышение содержания РК на 1,0–1,5 мг · л<sup>-1</sup> продолжительностью от нескольких часов до нескольких дней с последующим понижением до исходных значений (рис. 3, г).

Спектральный анализ рядов температуры, содержания РК и давления показал наличие пиков на частотах, соответствующих периодам от нескольких минут до нескольких дней. На спектрах придонной температуры глубоководной станции выделялись два основных энергонесущих пика на частотах, соответствующих перио-

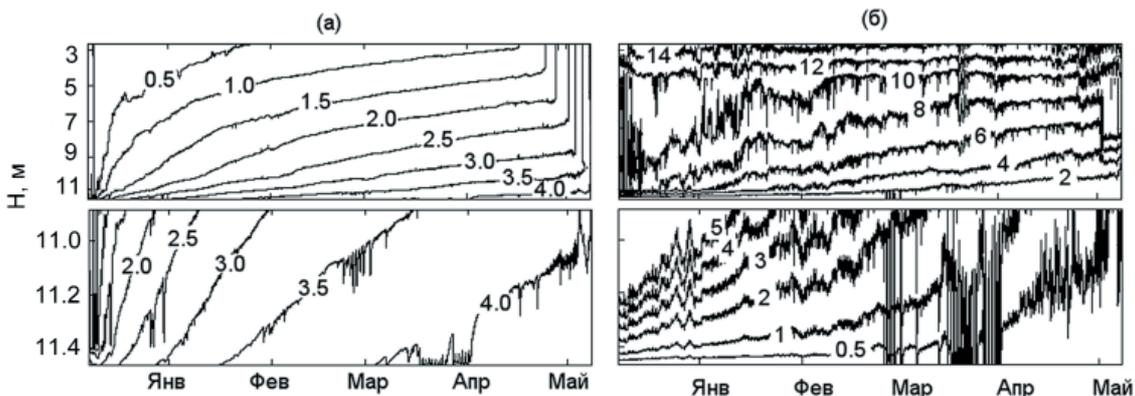


Рис. 2. Изменение температуры (а) и содержания РК (б) в глубоководной части оз. Вендюрского зимой 2008–2009 гг. («длинная» коса, глубина 11,45 м)

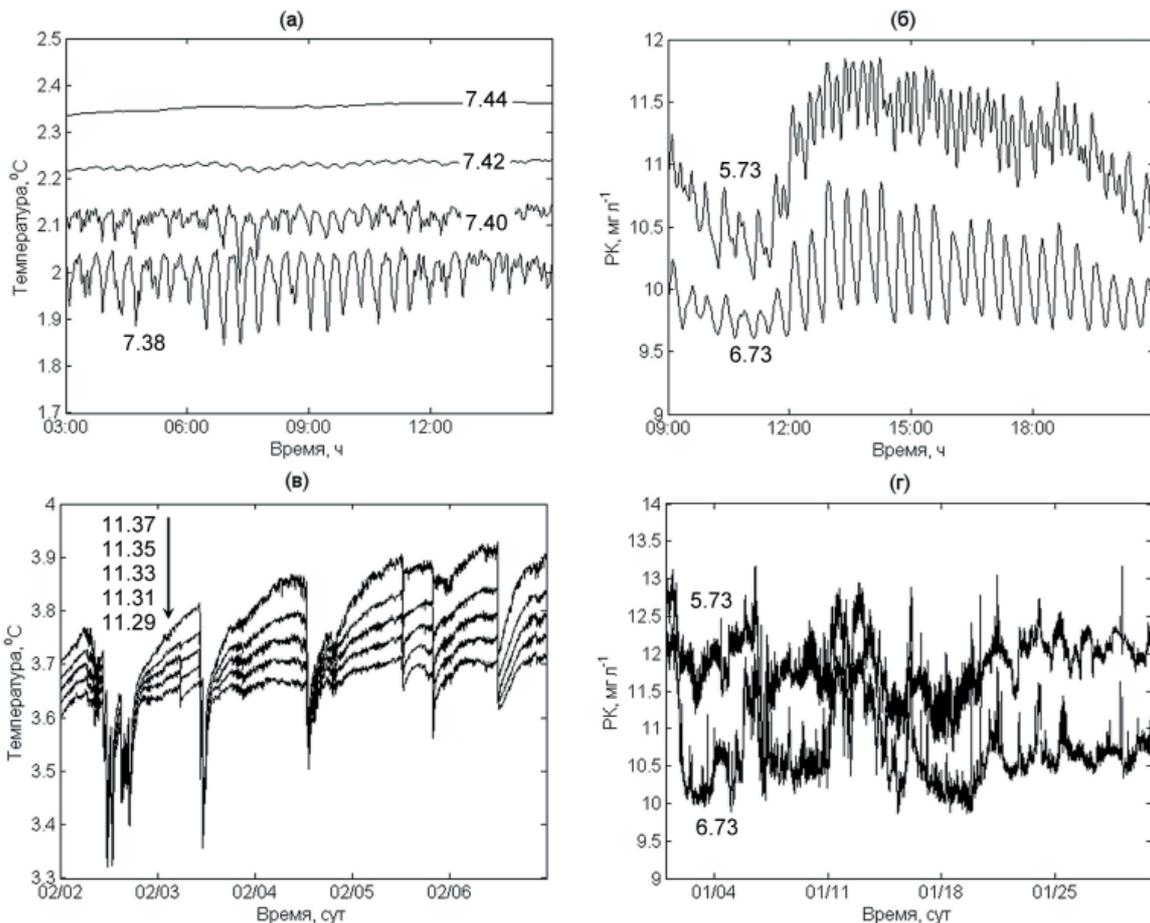


Рис. 3. Колебания температуры (а, в) и содержания РК (б, г):

а – 20 января 2009 г. в придонном слое «короткой» косы; б – 4 марта 2009 г. на «длинной» косе; в – 2–6 февраля 2010 г. в придонном слое «длинной» косы; г – 1–31 января 2009 г. на «длинной» косе. На рис. приведены глубины горизонтов наблюдения, м

дам в 24 и 12 ч; на склоновых станциях хорошо разрешались пики 6, 16 и 26 мин, 2, 8, 12 и 24 ч колебаний. На спектрах содержания РК в поверхностном слое хорошо выделялись пики, соответствующие 26 и 6 мин изменчивости, а также периодичностям в 2–4, 10–11, 22–25 ч, 2, 2,5 и 7–10 сут. На спектрах давления выделялось 3–4 энергонесущих пика на низких частотах, соответствующих периодам 1,4–2,5, 4,5–5, 7, 11–12 сут. Измерения течений на разных глубинах, проводившиеся на оз. Вендюрском в зимние месяцы 1994–1996 гг., показали наличие осциллирующих колебаний с периодами около 6–7 и 28–29 мин и скоростями от долей до нескольких мм в секунду [Malm et al., 1998]. Рассчитанный по формуле Мериана период первой моды продольной и поперечной баротропных сейш оз. Вендюрского составляет 29 и 7 мин, соответственно [Malm et al., 1998]. Хорошее совпадение периодов осциллирующих колебаний температуры и содержания РК с периодом баротропной сейши позволяет говорить о том, что сейши в озере существуют на протяжении большей части зимы, периодически усиливаясь или

затухая. Полное исчезновение сейшеобразных колебаний температуры в штилевых условиях и последующее их возобновление по мере роста скоростей ветра подтверждает гипотезу о том, что сейши в озере генерируются колебаниями ледового покрова под воздействием ветра.

Причины появления резких скачков температуры в придонных слоях оз. Вендюрского не вполне ясны. Колебания температуры с периодами 11 и 24 ч и амплитудой 0,5–1,1 °C регистрировались в придонном слое оз. Мюггелзее (Берлин) на протяжении первого месяца ледостава 2005–2006 гг. [Kirillin et al., 2009]. Оценки числа Бургера для двух выделенных частот колебаний оказались близкими, что позволило авторам с большой долей уверенности интерпретировать выделенные частоты как внутренние инерционно-гравитационные волны типа Кельвина и Пуанкаре, появившиеся в озере до ледостава на придонном термоклине вследствие ветрового воздействия. Форма и амплитуда колебаний температуры в придонном слое озер Вендюрского и Мюггелзее отличаются, совпадает только период колебаний.

Для стратифицированных систем внутренней радиус деформации Россби определяется как

$$R = \frac{c}{f}, \quad (3)$$

где  $c$  – фазовая скорость распространения внутренней волны,  $f$  – инерционная частота.

Скорость распространения внутренней волны в двухслойной жидкости можно определить из соотношения

$$c = \sqrt{g' \frac{h_1 (H - h_1)}{H}}, \quad (4)$$

где

$$g' = \frac{g \Delta \rho}{\rho_0} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_m} = \frac{1}{2} a \left[ (T_1 - T_m)^2 - (T_2 - T_m)^2 \right], \quad (6)$$

где  $h_1$  – толщина верхнего слоя,  $H$  – общая толщина столба воды,  $a = 1,65 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$  – константа в уравнении состояния пресной воды [Carmack, Farmer, 1982],  $T_m = 3,98 \text{ } ^\circ\text{C}$  и  $\rho_m = 1000 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$  – температура максимальной плотности и максимальная плотность пресной воды, соответственно.

Принимая общую толщину столба воды  $H = 13 \text{ м}$ , толщину верхнего слоя  $h_1 = 6 \text{ м}$ ,  $\Delta T = 2 \text{ } ^\circ\text{C}$  (условия середины первого месяца ледостава на оз. Вендюрском), получим  $\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = 9,5 \cdot 10^{-5}$ ,  $g' = 9,3 \cdot 10^{-4}$  и  $c = 0,054 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ; при  $h_1 = 3 \text{ м}$ ,  $\Delta T = 4 \text{ } ^\circ\text{C}$  (второй месяц ледостава)  $\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = 9,1 \cdot 10^{-5}$ ,  $g' = 8,9 \cdot 10^{-4}$  и  $c = 0,045 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

На широте оз. Вендюрского  $f = 1,28 \cdot 10^{-4} \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ , для значений  $c$   $0,05 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  величина  $R$  составляет  $400 \text{ м}$ , что намного меньше ширины бассейна. Следовательно, вращение Земли может оказывать влияние на внутренние волны в условиях плотностной стратификации, формирующейся в озере подо льдом. Два основных энергонесущих пика колебаний температуры в придонном слое оз. Вендюрского ( $24$  и  $12 \text{ ч}$ ) близки к инерционной частоте (период, соответствующий частоте инерционных колебаний на широте района исследований составляет  $13,6 \text{ ч}$ ), что позволяет предполагать возможность существования в озере инерционно-гравитационных волн.

Долгопериодные колебания содержания РК в поверхностных слоях оз. Вендюрского могут быть обусловлены бароклинной сейшей, периоды которой для разных лет исследований оценивались в  $3$ – $11 \text{ сут}$  [Петров и др., 2006; Zdorovenkova, 2009]. Колебания температуры,

содержания РК и углекислого газа в водах оз. Плесид (Монтана) с периодом около  $6$ – $8 \text{ сут}$  в зимние месяцы 1997 и 1998 г. были интерпретированы авторами как проявление бароклинной сейши. Авторы высказывают предположение о связи колебаний льда под воздействием ветра с появлением сейш в озере. Анализ спектров давления и скорости ветра по станции Петрозаводск показал периодичности от  $3$  до  $15 \text{ сут}$ , в спектре ветра также был выражен пик суточной изменчивости. Поскольку низкочастотные пики на спектрах давления и содержания РК нередко совпадают, возможно, что долгопериодные колебания содержания РК в поверхностном слое обусловлены горизонтальным переносом, появляющимся в озере в моменты прохождения над его акваторией барических образований, однако механизм такого взаимодействия неясен.

## Выводы

Анализ данных трех последовательных лет измерений температуры, содержания РК и давления в небольшом замерзающем озере показал сходный характер эволюции термического и кислородного режимов озера в течение зимы. Высокая точность измерений и небольшой шаг по времени позволили выявить ряд особенностей динамического режима озера зимой, его связь с изменчивостью погодных условий района исследований. Показано, что баротропные сейши существуют в озере на протяжении большей части зимы и проявляются в колебаниях как температуры, так и содержания РК. Бароклинные сейши предположительно являются причиной долгопериодной изменчивости содержания РК в поверхностном слое озера. Близость частот колебаний температуры в тонком придонном слое к инерционной частоте позволяет предполагать существование инерционно-гравитационных волн. Выяснение причин появления таких волн в озере, покрытом льдом, а также роли погодных условий в формировании динамики водоема зимой является предметом дальнейших исследований.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российской академии наук, Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-05-91331-ННИО\_а).

## Литература

Литинская К. Д., Поляков Ю. К. Озера Вендюрской группы – Урос, Риндозеро, Вендюрское // Водные ресурсы Карелии и их использование. Петрозаводск: Карельский фил. АН СССР, 1975. С. 57–66.

Петров М. П., Терзевик А. Ю., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э. Особенности термической структуры мелководного озера в начале зимы // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 2. С. 154–162.

Петров М. П., Терзевик А. Ю., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э. Движения воды в мелководном озере, покрытом льдом // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 2. С. 131–140.

Терзевик А. Ю., Пальшин Н. И., Голосов С. Д. и др. Гидрофизические аспекты формирования кислородного режима мелководного озера, покрытого льдом // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 568–579.

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.

Baehr M. M., DeGrandpre M. D. In situ pCO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> measurements in a lake during turnover and stratification: Observations and modeling // Limnol. Oceanogr. 2004. Vol. 49, N 2. P. 330–340.

Bengtsson L. Dispersion in ice-covered lakes // Nordic Hydrology. 1986. 17. P. 151–170.

Bengtsson L. Mixing in ice-covered lakes // Hydrobiologia. 1996. Vol. 322. P. 91–97.

Carmack E. C., Farmer D. M. Cooling processes in deep temperate lakes: a review with examples from two lakes in British Columbia // J. Mar. Res. 1982. Vol. 40. P. 85–111.

Colman J. A., Armstrong D. E. Horizontal diffusivity in a small, ice-covered lake // Limnol. Oceanogr. 1983. Vol. 28, N 5. P. 1020–1026.

Glinsky A. Current meters for measurement of low-speed velocities in ice-covered lakes // Limnol. Oceanogr. 1998. Vol. 43, N 7. P. 1661–1668.

Golosov S., Maher O. A., Schipunova E. et al. Physical background of oxygen depletion development in ice-covered lakes // Oecologia. 2007. Vol. 151. P. 331–340.

Kirillin G., Engelhardt C., Golosov S., Hintze T. Basin-scale internal waves in the bottom boundary layer of ice-covered Lake Müggelsee, Germany // Aquatic Ecology. 2009. Vol. 43, N 3. P. 641–651. DOI: 10.1007/s10452-009-9274-3.

Kenney B. C. Physical limnological processes under ice // Hydrobiologia. 1996. Vol. 322. P. 85–90.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. Temperature and salt content regimes in three shallow ice-covered lakes // Nordic Hydrol. 1997. Vol. 28. P. 129–152.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. A field study on currents in a shallow ice-covered lake // Limnol. Oceanogr. 1998. Vol. 43, N 7. P. 1669–1679.

Matthews P. C., Heaney S. I. Solar heating and its influence on mixing in ice-covered lakes // Freshwater Biology. 1987. Vol. 18. P. 135–149.

Mironov D., Terzhevik A., Kirillin G. et al. Radiatively-driven convection in ice-covered lakes: observations, scaling and a mixed-layer model // J. Geophys. Res. 2001. Vol. 107, N C4. P. 7-1–7-16.

Mortimer C. H., Mackereth F. J. H. Convection and its consequences in ice-covered lakes // Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie. 1958. Vol. 13. P. 923–932.

Nakamura Y., Stefan H. G. Effect of Flow Velocity on Sediment Oxygen Demand: Theory // J. of Env. Eng. 1994. Vol. 120, N 5.9. P. 96–1016.

Terzhevik A., Golosov S., Palshin N. et al. Some features of the thermal and dissolved oxygen structure in boreal, shallow ice-covered Lake Vendyurskoe, Russia // Aquat. Ecology. 2009. 43: DOI 10.1007/s10452-009-9288-x.

Zdorovenнова G. E. Spatial and temporal variations of the water-sediment thermal structure in shallow ice-covered Lake Vendyurskoe (Northwestern Russia) // Aquatic Ecology. 2009. Vol. 43. P. 629–639. DOI 10.1007/s10452-009-9277-0.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### **Здоровеннов Роман Эдуардович**

научный сотрудник, к. г. н.  
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН  
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030  
эл. почта: romga1974@rambler.ru  
тел.: +79212209438

### **Здоровеннова Галина Эдуардовна**

научный сотрудник, к. г. н.  
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН  
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030  
эл. почта: zdorovennova@gmail.com  
тел.: +79214602171

### **Пальшин Николай Иннокентьевич**

старший научный сотрудник, к. г. н.  
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН  
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030  
эл. почта: npalshin@mail.ru  
тел.: (8142) 576381

### **Терзевик Аркадий Юрьевич**

зав. лаб. гидрофизики, к. т. н.  
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН  
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030  
эл. почта: ark@nwpi.krc.karelia.ru  
тел.: +79217267356

### **Zdorovennov, Roman**

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science  
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: romga1974@rambler.ru  
tel.: +79212209438

### **Zdorovennova, Galina**

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science  
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: zdorovennova@gmail.com  
tel.: +79214602171

### **Pal'shin, Nikolai**

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science  
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: npalshin@mail.ru  
tel.: (8142) 576381

### **Terzhevik, Arkadiy**

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences  
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: ark@nwpi.krc.karelia.ru  
tel.: +79217267356