

УДК 556.55:546.21:551.583

ВОЗМОЖНОЕ ВЛИЯНИЕ «НЕОБЫЧНОЙ» ВЕСНЫ НА РЕЖИМ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА В МЕЛКОВОДНОМ ОЗЕРЕ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

**А. Ю. Тержевик¹, С. Д. Голосов^{1,2}, Г. Г. Гавриленко¹,
Р. Э. Здоровеннов¹, Г. Э. Здоровеннова¹, С. Ю. Волков¹,
Н. И. Пальшин¹, Т. В. Ефремова¹, С. Р. Богданов¹**

¹ Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск

² Институт озероведения РАН, Санкт-Петербург

Рассмотрены особенности влияния синоптических условий поздней зимы и весны на режим перемешивания полимиктического озера в период открытой воды. Совместный анализ метеорологической информации и данных полевых измерений температуры и содержания растворенного кислорода в небольшом мелководном озере Вендюрском позволил изучить влияние погодных условий «необычной» весны 2016 г., когда озеро вышло из-под льда устойчиво стратифицированным, на особенности формирования теплового и газового режимов его водной толщи и придонных слоев в летний период. Оценка атмосферного воздействия на озеро с привлечением масштаба длины Монины – Обухова позволила определить предельные значения скоростей ветра и величины кинематического потока тепла на поверхности, необходимые для полного перемешивания его водной толщи. Серия численных экспериментов на одномерной параметрической модели FLake показала, что при определенных погодных условиях (теплая весна, длительная подледная конвекция, жаркая маловетренная погода после взлома льда) озеро теряет период весеннего перемешивания до дна, выходя из-под льда уже устойчиво стратифицированным. Результаты расчетов на модели показали, что отсутствие полного весеннего перемешивания после взлома льда может негативно сказаться на газовом режиме мелководного озера в летний период. При теплой маловетренной погоде в мае–июне продолжительность непрерывного существования придонной аноксии в локальных углублениях может превышать 7–8 месяцев.

Ключевые слова: мелководное озеро; синоптические условия; глубина перемешивания; температура воды; растворенный кислород.

**A. Yu. Terzhevik, S. D. Golosov, G. G. Gavrilenko, R. E. Zdrovennov,
G. E. Zdrovennova, S. Yu. Volkov, N. I. Palshin, T. V. Efremova,
S. R. Bogdanov. THE POSSIBLE EFFECT OF AN UNUSUAL SPRING ON
THE DISSOLVED OXYGEN IN A SHALLOW LAKE DURING THE SUMMER**

The article examines the impact of 'late' winter and spring synoptic conditions on the mixing regime of a polymictic lake during the open water period. Based on joint analysis of meteorological information and field measurements of the water temperature and dissolved oxygen content, the effect of unusual spring 2016 weather conditions, when the lake was steadily stratified at the ice-off moment, on the formation of the thermal

and gas regimes of the lake's water column and near-bottom layers in the summer was studied. Atmospheric impact evaluation using a modified Monin-Obukhov length scale allows determining the critical values of wind speed and total surface heat flux required for the water column overturn. Series of numerical experiments using one-dimensional FLake model revealed that under certain weather conditions, i. e. warm spring, prolonged under-ice convection, warm and calm weather after ice-off, a lake may lose the spring overturn effect, being stably stratified before ice-off. Model calculations proved that the absence of the spring overturn may negatively affect the lake gas regime during the summer, and in the case of warm, low-wind weather in May and June the duration of bottom anoxia in local depressions may exceed 7–8 months.

Key words: shallow lake; synoptic conditions; depth of mixing; water temperature; dissolved oxygen.

Введение

Эволюция термической структуры водной толщи мелководных непроточных озер определяется теплообменом с атмосферой и донными отложениями, а также перераспределением тепла за счет ветро-волнового перемешивания и плотностных циркуляций. Годовой термический цикл мелководных озер умеренных широт характеризуется отчетливым сезонным ходом, в котором выделяют периоды весенне-летнего нагревания, осенне-зимнего охлаждения и зимнего нагревания [Зайков, 1955]. Весной непосредственно после взлома льда обычно происходит полное перемешивание водной толщи озер, после чего, в зависимости от погодных условий, начинается ее нагревание в состоянии, близком к гомотермии либо слабовыраженной термической стратификации. Под действием радиационного нагревания поверхностных слоев воды в озерах формируется плотностная стратификация, затрудняющая вертикальный перенос тепла, питательных веществ, растворенных газов и взвешенных частиц, при этом в придонных слоях водоема формируется дефицит кислорода. Таким образом, создается резкий контраст между свойствами вод гипolimниона и эпилимниона.

В полимиктических озерах в летний период рост придонных температур и насыщение придонных слоев кислородом происходят при периодических перемешиваниях водной толщи на фоне ветрового воздействия, приводящего к заглублению и разрушению сезонного термоклина [Гавриленко и др., 2014]. В димиктических озерах, в которых полное перемешивание водной толщи происходит лишь дважды в год (весной после освобождения ото льда и в период осеннего охлаждения), летняя температура и газовый режим гипolimниона определяются продолжительностью и интенсивностью весеннего перемешивания [Arvola et al., 2010].

Продолжительность весеннего перемешивания может заметно варьировать от года к году в зависимости от синоптических условий. Данные наблюдений показывают, что на небольших лесных озерах и ламбах период весеннего перемешивания может полностью отсутствовать в связи с тем, что озера выходят из-под льда уже устойчиво стратифицированными; подобная ситуация «весенней меромиксии» фиксировалась на озере Валкеа-Котинен в Финляндии [Arvola et al., 2010]. Данные численного моделирования демонстрируют, что на фоне меняющегося климата в режиме перемешивания озер могут произойти серьезные изменения вплоть до перехода полимиктических водоемов в разряд димиктических, а димиктических – в разряд моно- и даже меромиктических [Kirillin, 2010].

В случае исчезновения из годового цикла озер периода весеннего перемешивания до дна возможны значительные сдвиги в функционировании их экосистем, поскольку именно в этот период происходит активное накопление тепла донными отложениями, разрушение «зимних» придонных анаэробных зон, насыщение кислородом придонных слоев водной толщи, вынос в поверхностные слои биогенных элементов, необходимых для активного цветения планктона. Целью данной работы было изучение влияния нетипичных синоптических условий поздней зимы и весны на термический и газовый режимы мелководного озера в летний период.

Материалы и методы

В качестве объекта исследований было выбрано мелководное мезотрофное озеро Вендюрское, расположенное на юге Карелии (62°10'–62°20'N, 33°10'–33°20'E). Площадь зеркала озера составляет 10,4 км², объем вод ~ 5,5·10⁷ м³, средняя глубина 5,3 м, максимальная – 13,4 м, площадь водосборного бассейна

82,8 км². Котловина озера имеет ледниковое происхождение и простирается с запада на восток. Объем речного стока невелик. Определяющее значение в динамике озерных вод в течение года принадлежит стоку с водосбора и атмосферным осадкам (20–25 %). Прозрачность воды по диску Секки достигает 3–3,5 м. Донные отложения представлены песками в мелководных районах и илами в глубоководной части озера (около 60 % площади дна) [Литинская, Поляков, 1975].

Район, в котором расположен объект исследований, характеризуется умеренно-континентальным климатом с чертами морского, которому свойственны продолжительная мягкая зима и короткое прохладное лето. Территория юга Карелии характеризуется преобладанием атлантических и арктических воздушных масс в течение года [Назарова, 2014]. В весенне-летний период, ввиду активной циклонической деятельности, погода неустойчива, часто наблюдаются резкие понижения температуры, усиления ветра, продолжительные похолодания. В регионе отмечается заметная межгодовая изменчивость синоптических условий, что отражается на термическом режиме мелководных водоемов в летний период [Гавриленко и др., 2014; Ефремова и др., 2015].

Начиная с 2007 года и до настоящего времени сотрудниками лаборатории гидрофизики ИВПС КарНЦ РАН проводятся круглогодичные наблюдения за температурой воды и содержанием растворенного кислорода (РК) в центральной глубоководной части оз. Вендюрского [Тержевик и др., 2010; Здоровеннов и др., 2011; Гавриленко и др., 2014; Ефремова и др., 2015; Здоровеннова и др., 2016]. При измерениях используется автономная станция – коса, оснащенная температурными и кислородными датчиками производства компании RBR Ltd. (Канада); глубина в месте постановки станции измерений 11,1–11,3 м. Датчики располагаются на косе через 0,5–1,5 м в водной толще и через 2–5 см в придонных слоях. Верхний датчик располагается на глубине 2–2,5 м. Технические характеристики датчиков приведены в работах [Здоровеннов и др., 2011; Гавриленко и др., 2014]. Коса находится в озере круглогодично, кроме нескольких дней весной и осенью, когда она изымается для замены батарей и снятия данных. Временной интервал измерений составляет одну минуту. Анализ атмосферного воздействия на озеро осуществляется с использованием данных метеостанции Петрозаводск (www.rp5.ru), а также глобальных моделей ре-анализа ERA Interim и NCEP/NCAR

Reanalysis 2 (<http://apps.ecmwf.int>, <https://www.esrl.noaa.gov/>).

Оз. Вендюрское может быть отнесено к классу полимиктических водоемов, поскольку в период открытой воды его водная толща неоднократно полностью перемешивается [Гавриленко и др., 2014; Ефремова и др., 2015]. Окончание периода ледостава на оз. Вендюрском обычно происходит в первой декаде мая [Zdorovenov et al., 2013], после чего на протяжении 1–4 суток происходит очищение акватории от остатков льда, в ходе которого водная толща озера активно перемешивается, при этом температура и содержание РК по вертикали выравниваются [Здоровеннова и др., 2014]. В разные годы в зависимости от погодных условий весенняя гомотермия продолжается от нескольких дней до трех недель. Весной 2016 г. озеро вышло из-под льда устойчиво стратифицированным, потеряв период весенней гомотермии [Гавриленко и др., 2017]. Такое явление наблюдалось впервые за десятилетний период измерений на фоне длительной подледной конвекции и теплой маловетреной погоды после взлома льда. Начиная с середины зимы в придонных слоях центральной котловины озера Вендюрского формируется анаэробная зона, толщина которой к концу ледостава достигает метра [Тержевик и др., 2010]. После взлома льда на этапе весеннего перемешивания анаэробная зона разрушается, и придонные слои водной массы насыщаются кислородом. Летом, в зависимости от погодных условий, определяющих условия перемешивания водной толщи, в придонных слоях центральной котловины формируется дефицит кислорода. Толщина анаэробной зоны обычно не превышает одного метра, а продолжительность летней аноксии – не более двух-трех недель [Zdorovenova et al., 2016]. При неблагоприятных погодных условиях аномально жаркого лета 2010 г. продолжительность аноксии превысила 1,5 месяца, а максимальная толщина анаэробной зоны достигала 3–4 м [Ефремова и др., 2015].

Нами были проведены оценки внешнего воздействия на озеро, необходимого для полного перемешивания его водной толщи, то есть условий, при которых глубина ветрового воздействия будет превосходить максимальную глубину водоема. Глубина ветрового воздействия для случая устойчивой стратификации водного столба может быть оценена, например, по масштабу длины Монина – Обухова [см. Wüest, Lorke, 2003]:

$$l = \frac{u_*^3}{k_B},$$

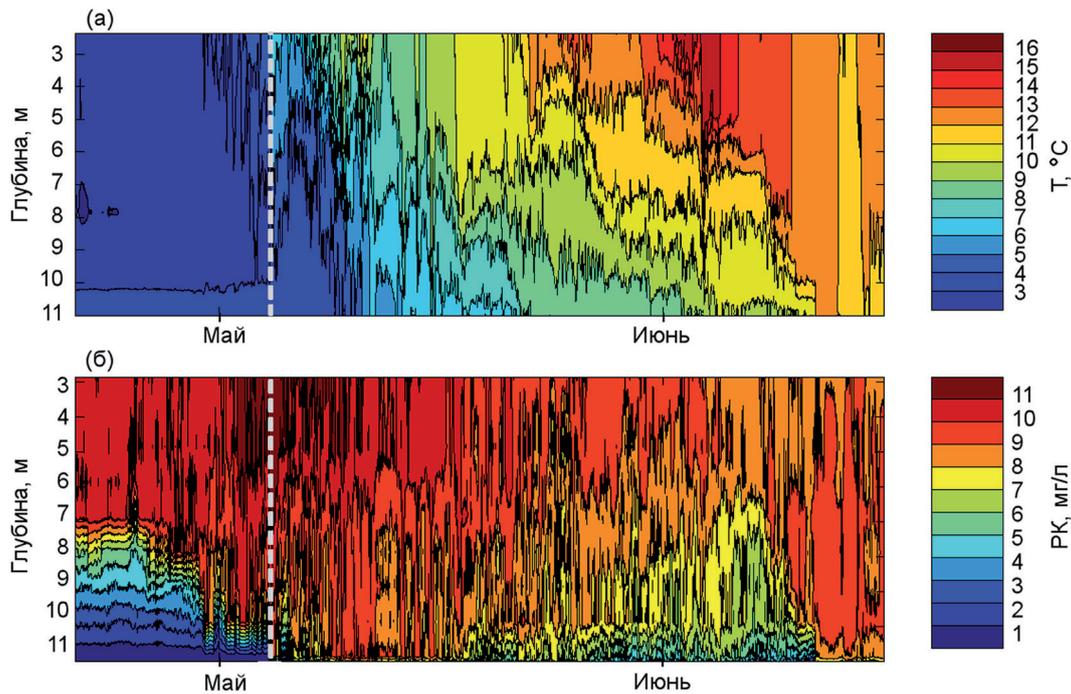


Рис. 1. Температура воды (а) и концентрация РК (б) в центральной части оз. Вендюрского в период с 21 апреля по 16 июня 2016 г. Пунктирная линия – момент взлома льда (по данным косы, см. текст)

где k – постоянная Кармана, равная 0,4; B – вертикальный поток плавучести; u_* – скорость трения, или динамическая скорость. Глубина перемешанного слоя может быть затем оценена как $h_i = 0,2l$. Динамическую скорость можно определить как $u_* = (\tau_w / \rho_e)^{1/2}$, где ρ_e – плотность воды эпилимниона; $\tau_w = C_D \rho_{air} U^2$ – касательное напряжение ветра, ρ_{air} – плотность воздуха, U – скорость ветра. Значения C_D , зависящие от скорости ветра, были получены из работы [Read et al., 2011]: $C_D = 1 \cdot 10^{-3}$ для скорости ветра $U < 5$ м/с; $C_D = 1,5 \cdot 10^{-3}$ для скорости ветра $U \geq 5$ м/с. Вертикальный поток плавучести можно определить как $B = \beta Q$, где $\beta = \alpha g$ – параметр плавучести по температуре, Q – суммарный поток тепла на поверхность, g – ускорение свободного падения, α – коэффициент термического расширения воды [Зилитинкевич, 1989]. Для оценки масштаба h_i были использованы гипотетически возможные в мае в регионе исследований значения кинематического потока тепла Q и скорости ветра в диапазоне $1-10 \cdot 10^{-5}$ К·м/с и 1–10 м/с соответственно.

Для уточнения влияния погодных условий конца зимы и начала лета на термический и кислородный режимы мелководного озера в период открытой воды была проведена серия численных экспериментов на одномерной модели FLake [Mironov et al., 2010; Golosov et al., 2012; см. также <http://lakemodel.net>], основанной на

параметрическом подходе к эволюции температурного и кислородного профилей.

Результаты и обсуждение

Анализ натуральных данных

Весной 2016 года на озере Вендюрском наблюдалась необычная динамика температуры водной толщи после освобождения озера ото льда. Подледная конвекция весной 2016 г. началась уже в середине марта на фоне нетипично теплой зимы (среднемесячная температура февраля и марта в 2016 г. была выше среднегодовой нормы, оцененной для периода 1961–1990 гг., на 7,5 и 3,2 °С соответственно), и к концу апреля глубина перемешанного слоя достигала 8 м, после чего заглужение его нижней границы прекратилось, но рост температуры продолжился. Так, в период с 25 по 30 апреля температура воды перемешанного слоя увеличилась от 3,2 до 3,8 °С. В первых числах мая температура поверхностных слоев водной толщи превысила 4 °С и продолжала расти, 3 мая в 5-метровом поверхностном слое температура воды достигала 5,5–6 °С. Взлом льда произошел 4 мая, при этом средняя температура водной толщи составляла 4,9 °С. В момент выхода из-под льда в озере наблюдалась устойчивая стратификация, разница температур в поверхностных и придонных слоях в центральной части озера достигала 2,2 °С. На

Отношение максимально возможной глубины перемешивания озера h_i к общей глубине водоема D при заданных значениях скорости ветра U (м/с) и кинематического потока тепла на поверхности Q (К·м/с)

U	Q									
	1×10^{-5}	2×10^{-5}	3×10^{-5}	4×10^{-5}	5×10^{-5}	6×10^{-5}	7×10^{-5}	8×10^{-5}	9×10^{-5}	1×10^{-4}
h_i/D										
1	0,0027	0,0013	0,0009	0,0007	0,0005	0,0005	0,0004	0,0003	0,0003	0,0003
2	0,0215	0,0108	0,0072	0,0054	0,0043	0,0036	0,0031	0,0027	0,0024	0,0022
3	0,0725	0,0363	0,0242	0,0181	0,0145	0,0121	0,0104	0,0091	0,0081	0,0073
4	0,1720	0,0860	0,0573	0,0430	0,0344	0,0287	0,0246	0,0215	0,0191	0,0172
5	0,6170	0,3085	0,2057	0,1543	0,1234	0,1028	0,0881	0,0771	0,0686	0,0617
6	1,0662	0,5331	0,3554	0,2665	0,2132	0,1777	0,1523	0,1333	0,1185	0,1066
7	1,6930	0,8465	0,5643	0,4233	0,3386	0,2822	0,2419	0,2116	0,1881	0,1693
8	2,5272	1,2636	0,8424	0,6318	0,5054	0,4212	0,3610	0,3159	0,2808	0,2527
9	3,5983	1,7991	1,1994	0,8996	0,7197	0,5997	0,5140	0,4498	0,3998	0,3598
10	4,9358	2,4679	1,6453	1,2340	0,9872	0,8227	0,7051	0,6170	0,5484	0,4936

протяжении первой недели после взлома льда стратификация усиливалась, и 11 мая разница поверхностной и придонной температур в центре озера достигала 5,5–6 °С. Озеро оставалось в стратифицированном состоянии до первой декады июня, то есть больше месяца после освобождения ото льда, и было полностью перемешано лишь 11–12 июня на фоне продолжительного похолодания и усиления ветра (рис. 1).

У нас нет информации о толщине ледового покрова и его прозрачности в последние дни существования льда, но можно предположить, что необычный рост температуры воды был вызван усилением потока солнечной радиации. Следует также отметить, что наиболее вероятным объяснением отсутствия конвективного перемешивания в придонном слое является повышенное – до 5-кратного по сравнению с остальной частью водного столба – содержание солей в его водах за счет продуктов бактериального разложения органического вещества [см., например, Malm et al., 1997]. Оценки плотности придонной воды с учетом солей для конца подледного периода показали, что она была самой высокой в пределах столба воды.

Концентрация РК на нижних придонных горизонтах измерений в течение последней недели ледостава не превышала 0,25 мг/л, на горизонте 9,9 м достигала 2–2,5 мг/л, на горизонте 8,9 м – 4–5 мг/л. В день взлома льда наблюдался резкий рост концентрации РК на глубоководных горизонтах (до 8–9 мг/л) и ее снижение до значений 2–3 мг/л в течение следующих суток. На горизонте 9,86 м в последние 5 дней ледостава наблюдалась значительная изменчивость концентрации РК – от 3 до 10 мг/л. Через сутки после взлома льда в водной толще наблюдалась заметная вертикальная неоднородность концентраций РК, сохранявшаяся вплоть до июньского перемешивания (рис. 2).

Для понимания природы наблюдавшегося перемешивания мы оценили эффективный коэффициент диффузии $D_{эфф}$ кислорода, используя соотношение, связывающее линейный масштаб деформации его вертикального профиля со временем, в течение которого эта деформация осуществлялась [Golosov et al., 2003; см. также Тержевик и др., 2010]:

$$D_{эфф} = \frac{(H-h)^2}{t},$$

где H – глубина, м; h – толщина перемешанного слоя, м; t – длительность рассматриваемого периода, с.

В соответствии с оценками по приведенной формуле значения эффективного коэффициента диффузии РК в метровом придонном слое центральной котловины озера в дневные часы 4 мая достигали $1,9 \cdot 10^{-4}$ – $2,8 \cdot 10^{-4}$ м²/с, что заметно выше коэффициента молекулярной диффузии кислорода в воде ($1,23 \cdot 10^{-9}$ м²/с [Новый справочник..., 2004]). Можно смело предположить, что речь идет не о молекулярной, а о турбулентной диффузии.

В связи с тем, что озеро после взлома льда находилось в стратифицированном состоянии, уже с середины мая 2016 г. наблюдались признаки дефицита кислорода в придонных слоях центральной котловины (рис. 1, б), в то время как в другие годы исследований придонная гипоксия формировалась лишь в середине лета [Zdrovennova et al., 2016].

Формулировка «модельного» сценария

Мы оценили внешнее воздействие на озеро, необходимое для полного перемешивания его водной толщи, то есть условия, при которых глубина ветрового воздействия будет превосходить максимальную глубину водоема.

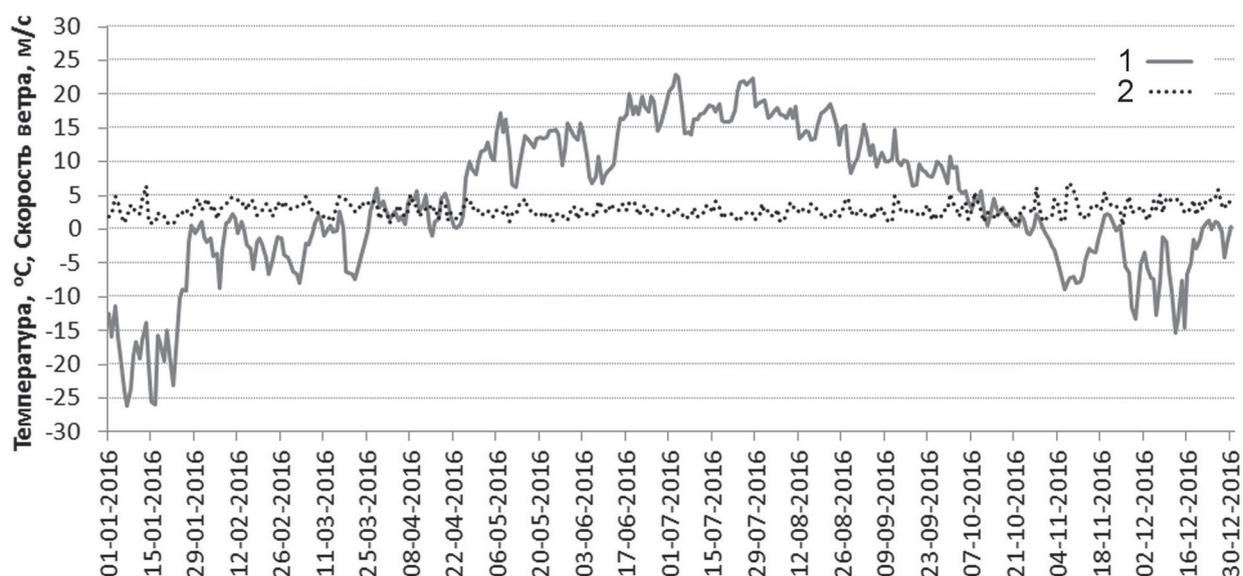


Рис. 2. Среднесуточные значения температуры воздуха (1) и скорости ветра (2) по метеостанции Петрозаводск в 2016 г.

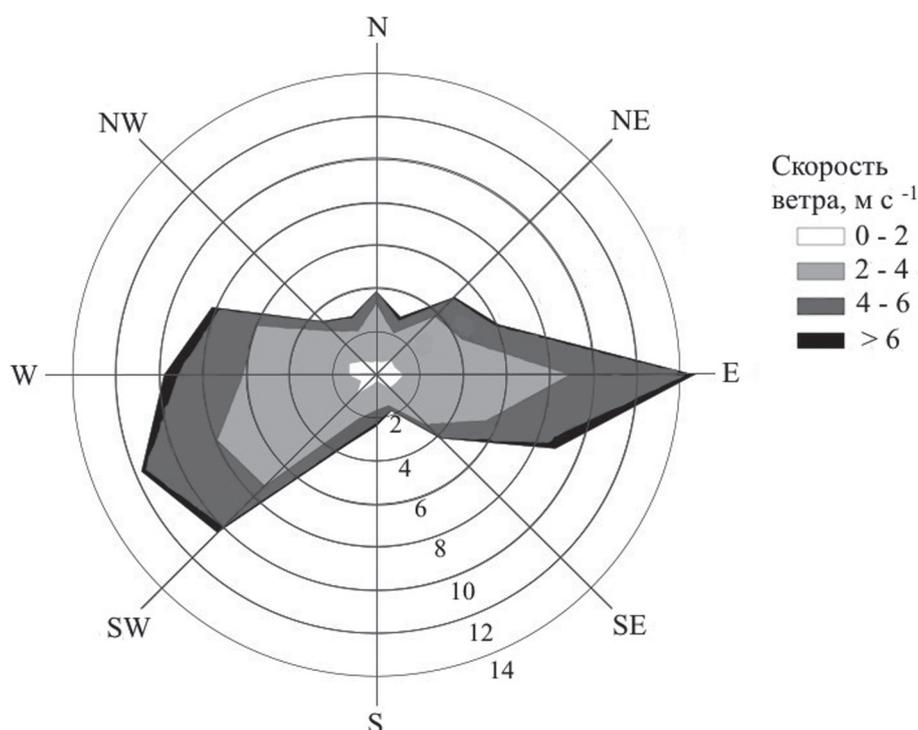


Рис. 3. Повторяемость (%) направлений и скорости ветра в мае на МС Петрозаводск. Диаграмма построена на основании данных срочных наблюдений в 2005–2017 гг. Цифры на графике характеризуют процент повторяемости

В таблице приведены значения отношения h_1 к максимальной глубине водоема D , позволяющие определить, при каких скоростях ветра и величине кинематического потока водоем будет перемешан до дна (значения h_1/D более единицы, заштрихованные ячейки в таблице).

Анализ таблицы позволяет предположить, что при скоростях ветра более 6 м/с и величине потока менее $5 \cdot 10^{-5}$ К·м/с водоем будет

перемешан до дна. Анализ метеоинформации по станции Петрозаводск показал, что в весенне-летние месяцы 2016 г. среднесуточные значения скорости ветра не превышали 5 м/с (рис. 2). Таким образом, условия для полного перемешивания озера за счет ветровой нагрузки были неблагоприятными.

Нетипичная картина выхода водоема из-под льда весной 2016 г. побудила провести

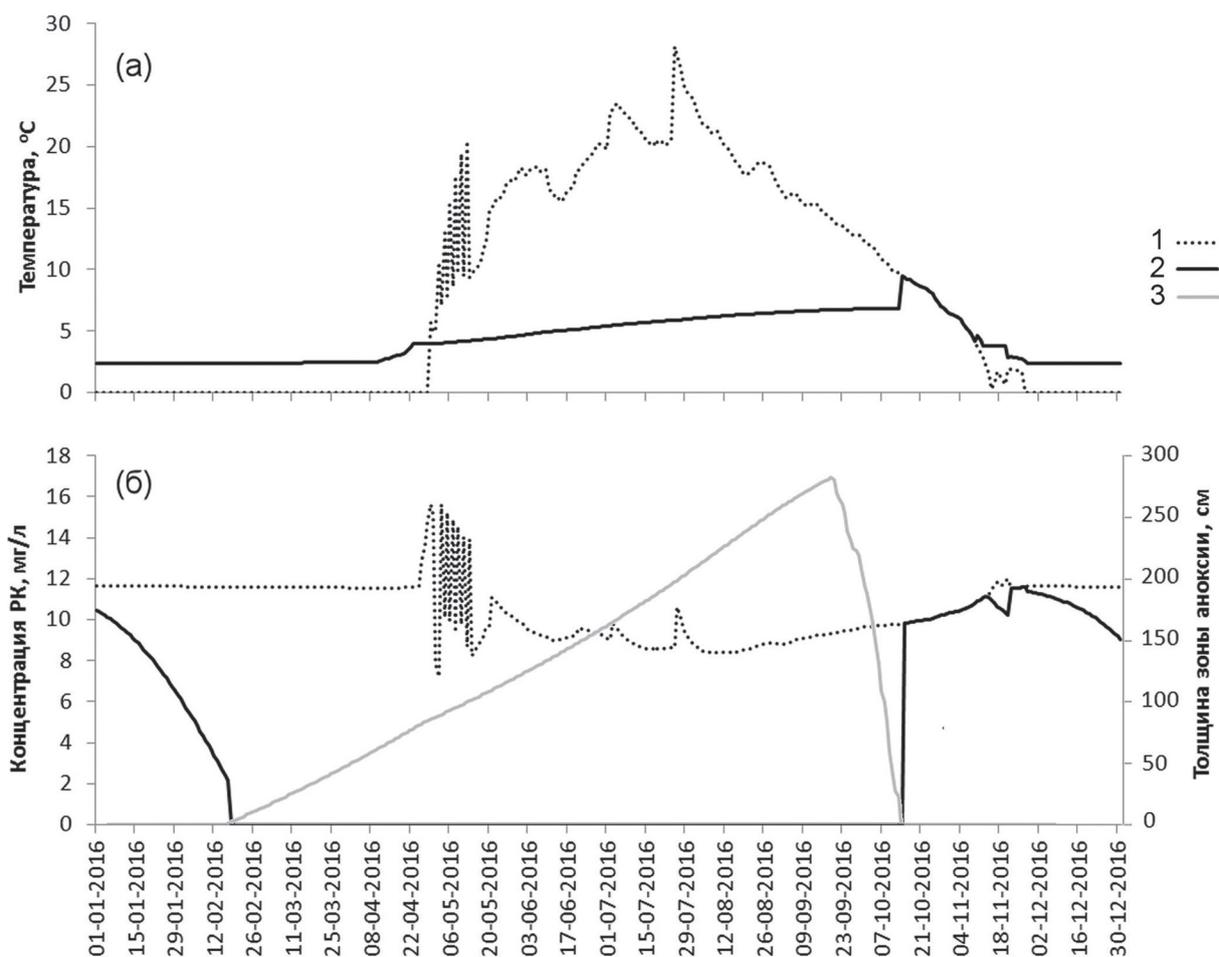


Рис. 4. Температура воды (а) и концентрация растворенного кислорода (б) в поверхностных (1) и придонных (2) слоях оз. Вендюрского, а также толщина зоны анооксии (3). Результаты модельных расчетов с погодными условиями 2016 года со сценарными изменениями в мае

серию численных экспериментов с использованием модели FLake для определения гидрометеорологической ситуации, при которой весеннее перемешивание после взлома льда могло и не произойти. В этом случае возможно формирование и длительное существование острого дефицита РК, включая полную аноксию в придонном слое, когда озеро из состояния зимней стагнации сразу переходит в состояние летней стратификации. Опираясь на полученные масштабные оценки и результаты предшествующих исследований, сформулировали следующий сценарий. При выходе озера из-под льда с вертикальным профилем температуры явно летнего характера достаточно нескольких дней с безоблачной погодой и слабым ветром, чтобы сформировался острый вертикальный градиент плотности в верхнем 1–2-метровом слое водной толщи. При сохранении такой погоды хотя бы в течение одного-двух синоптических периодов сформировавшийся термоклин может стать препятствием

для полного перемешивания озера над локальными углублениями на длительный срок, вплоть до конца лета. Следует отметить, что анализ имеющейся информации о скоростях ветра в мае за период 2005–2017 гг. показал, что вероятность ветров сильнее 5 м/с очень мала – менее 2 % (рис. 3).

В соответствии с модельными расчетами (рис. 4), сразу после выхода озера из-под льда разница поверхностных и придонных температур начинает быстро расти, то есть в озере формируется термическая стратификация, усиливающаяся в течение летних месяцев, и в результате озеро остается в стратифицированном состоянии до начала октября. Концентрация РК в придонном слое в подледный период достигает нулевых значений уже к середине февраля. С этого момента начинает формироваться придонная анаэробная зона, толщина которой к концу ледостава достигает метра. Поскольку весеннее перемешивание после взлома льда отсутствует, насыщения

глубоководных горизонтов кислородом не происходит; в дальнейшем, в условиях ограниченного вертикального перемешивания, аноксия усиливается вплоть до начала осеннего перемешивания (начало октября). Таким образом, продолжительность непрерывной придонной аноксии достигает семи с половиной месяцев. Расчет показал, что толщина бескислородного слоя к моменту разрушения сезонного термоклина превысила 2,5 м.

Заключение

Анализ данных непрерывных круглогодичных полевых измерений температуры и концентраций РК в мелководном полимиктическом озере Вендюрском показал, что на фоне длительной подледной конвекции в озере может сформироваться прямая стратификация уже под ледяным покровом. Подобная ситуация наблюдалась весной 2016 г. После взлома льда на фоне теплой маловетреной погоды стратификация может усилиться так, что озеро потеряет способность к перемешиванию до дна на длительный период. Результаты модельных расчетов на одномерной параметрической модели FLake демонстрируют, что, если погодные условия первых дней и недель открытой воды будут способствовать усилению стратификации (слабый ветер, теплая ясная погода), возможна ситуация, в которой озеро будет оставаться стратифицированным до начала осеннего охлаждения. При этом кислородный режим в озере существенно ухудшится: продолжительность придонной аноксии, сформировавшейся еще в середине зимы, будет достигать семи с половиной месяцев, а толщина придонной анаэробной зоны может превысить 2,5 м, что заметно превосходит наблюдаемые значения.

Литература

Гавриленко Г. Г., Здравеннова Г. Э., Здравеннов Р. Э., Пальшин Н. И., Терзевик А. Ю. Термический и кислородный режимы мелководного озера на этапе летнего нагревания // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10, вып. 1. С. 414–421.

Гавриленко Г. Г., Здравеннова Г. Э., Здравеннов Р. Э. Динамика температуры водной толщи мелководного озера на финальном этапе ледостава и после взлома льда // География: развитие науки и образования: Мат. между. науч.-практ. конф. СПб., 2017. С. 134–138.

Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Здравеннова Г. Э., Терзевик А. Ю. Влияние экстремально жаркого лета 2010 г. на температуру воды и распределение кислорода в озерах Карелии // Метеорология и гидрология. 2015. № 9. С. 67–76.

Зайков Б. Д. Очерки по озероведению. Л.: Гидрометеиздат, 1955. 271 с.

Здравеннов Р. Э., Здравеннова Г. Э., Пальшин Н. И., Терзевик А. Ю. Изменчивость термического и кислородного режимов мелководного озера зимой // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 57–63.

Здравеннова Г. Э., Здравеннов Р. Э., Пальшин Н. И., Гавриленко Г. Г., Терзевик А. Ю. Термический режим мелководного озера после разрушения льда // Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей: Труды VIII Междунауч.-практ. конф. М.: РУДН, 2014. С. 390–401.

Здравеннова Г. Э., Здравеннов Р. Э., Пальшин Н. И., Ефремова Т. В., Гавриленко Г. Г., Богданов С. Р., Терзевик А. Ю. Тепловой режим мелководного озера зимой // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 5. С. 3–12. doi: 10.17076/lim314

Зилитинкевич С. С. Проникающая турбулентная конвекция. Таллинн: Валгус, 1989. 207 с.

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

Назарова Л. Е. Климат Республики Карелия (Россия): температура воздуха, изменчивость и изменения // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10, вып. 1. С. 746–749.

Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий / Ред. Г. М. Островский. СПб.: Профессионал, 2004. Ч. 2. 920 с.

Терзевик А. Ю., Пальшин Н. И., Голосов С. Д., Здравеннов Р. Э., Здравеннова 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.

Arvola L., George G., Livingstone D. M., Järvinen M., Blenckner T., Dokulil M. T., Jennings E., Aonghusa C. N., Nöges P., Nöges T., Weyhenmeyer G. A. The impact of the changing climate on the thermal characteristics of lakes, in The Impact of Climate Change on European Lakes // Aquatic Ecology. Series 4. Ed. by D. G. George. P. 85–101. Springer Verlag, 2010. doi: 10.1007/978-90-481-2945-4_6

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

Golosov S., Zverev I., Terzhevik A. Modelling thermal structure and heat interaction between water column and bottom sediments in ice-covered lakes / A. Terzhevik (ed.), Proc. 7th Workshop on Physical Processes in Natural Waters, Petrozavodsk, 2003. P. 83–88.

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

Kirillin G. Modelling the impact of global warming on water temperature and seasonal mixing regimes in small temperate lakes // Boreal Env. Research. 2010. Vol. 15. P. 279–293.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. Temperature and salt

content regimes in three shallow ice-covered lakes: 1. Temperature, salt content, and density structure // *Nordic Hydrology*. 1997. Vol. 28. P. 99–128.

Mironov D., Terzhevnik A., Kirillin G., Jonas T., Malm J., Farmer D. Radiatively-driven convection in ice-covered lakes: observation, scaling and a mixed-layer model // *Journal of Geophysical Research*. 2002. Vol. 107, I. C4. P. 7–1–7–16. doi: 10.1029/2001JC00089

Mironov D., Heise E., Kourzeneva E., Ritter B., Schneider N., Terzhevnik A. Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO // *Boreal Env. Res.* 2010. Vol. 15. P. 218–230.

Read J. S., Hamilton D. P., Jones I. D., Muraoka K., Winslow L. A., Kroiss R., Wu Ch. H., Gaiser E. Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data // *Env. Modelling and*

Software. 2011. Vol. 26, no. 11. P. 1325–1336. doi: 10.1016/j.envsoft.2011.05.006

Wüest A., Lorke A. Small-scale hydrodynamics in lakes // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2003. Vol. 35. P. 373–412. doi: 10.1146/annurev.fluid.35.101101.161220

Zdorovenkov R., Palshin N., Zdorovenkova G., Efremova T., Terzhevnik A. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake // *Estonian Journal of Earth Sciences*. 2013. Vol. 61, no. 1. P. 26–32.

Zdorovenkova G., Palshin N., Zdorovenkov R., Golosov S., Efremova T., Gavrilenko G., Terzhevnik A. The oxygen regime of a shallow lake // *Geography, Environment, Sustainability*. 2016. No. 2. P. 47–57. doi: 10.15356/2071-9388_02v09_2016_04

Поступила в редакцию 29.09.2017

References

Efremova T. V., Pal'shin N. I., Zdorovenkova G. E., Terzhevnik A. Y. Vliyanie ekstremal'no zharkogo leta 2010 g. na temperaturu vody i raspredelenie kisloroda v ozerakh Karelii [The effects of the extremely hot summer 2010 on water temperature and oxygen distribution in Karelian lakes]. *Meteorologiya i gidrologiya [Russian Meteorology and Hydrology]*. 2015. Vol. 40, no. 9. P. 612–618. doi: 10.3103/S106837391509006X

Gavrilenko G. G., Zdorovenkova G. E., Zdorovenkov R. E., Pal'shin N. I., Terzhevnik A. Yu. Termicheskie i kislorodniy regimy melkovodnogo ozera na etape letnego nagrevaniya [Thermal and oxygen regimes of a shallow lake at the stage of summer heating]. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov [Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions]*. 2014. Vol. 10, iss. 1. P. 414–421.

Gavrilenko G. G., Zdorovenkova G. E., Zdorovenkov R. E. Dinamika temperatury vodnoi tolshchi melkovodnogo ozera na final'nom etape ledostava i posle vzloma l'da [Temperature dynamics of the water layer of a shallow lake at the final freeze-up stage and after ice fracturing]. *Geografiya: razvitie nauki i obrazovaniya: Mat. mezhd. nauch.-prakt. konf. [Geography: Development of Science and Education: Proceed. of the Int. Scientific and Practical Conf.]*. St. Petersburg, 2017. P. 134–138.

Litinskaya K. D., Polyakov Ju. K. Ozera Vendyurskoi gruppy – Uros, Rindozero, Vendyurskoe [Lakes of the Vendyur group – Uros, Rindozero, and Vendyurskoe]. *Vodnye resursy Karelii i ikh ispol'zovanie [Water Resources of Karelia and their Use]*. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1975. P. 57–66.

Nazarova L. E. Klimat Respubliki Kareliya (Rossiya): temperatura vozdukh, izmenchivost' i izmeneniya [The climate of the Republic of Karelia (Russia): air temperature, variability and changes]. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov [Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions]*. 2014. Vol. 10, iss. 1. P. 746–749.

Novyi spravochnik khimika i tekhnologa. Protsessy i apparaty khimicheskikh tekhnologii [A new guide for chemists and technologists. Processes and instruments of chemical engineering]. Ed. G. M. Ostrovskii. St. Petersburg: Professional, 2004. Part. 2. 920 p.

Terzhevnik A. Yu., Pal'shin N. I., Golosov S. D., Zdorovenkov R. E., Zdorovenkova G. E., Mitrokhov A. V., Potakhin M. S., Shipunova E. A., Zverev I. S. Gidrofizicheskie aspekty formirovaniya kislorodnogo rezhima melkovodnogo ozera, pokrytogo l'dom [Hydrophysical aspects of oxygen regime formation in a shallow ice-covered lake]. *Vodnye resursy [Water Resources]*. 2010. Vol. 37, no. 5. P. 662–673. doi: 10.1134/S0097807810050064

Zaikov B. D. Ocherki po ozerovedeniyu [Studies on limnology]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1955. 271 p.

Zdorovenkov R. E., Zdorovenkova G. E., Palshin N. I., Terzhevnik A. Yu. Izmenchivost' termicheskogo i kislorodnogo rezhimov melkovodnogo ozera zimoi [Variability of thermal and oxygen regimes of a shallow lake in winter]. *Trudy KarNTs RAN [Trans. of KarRC of RAS]*. 2011. No. 4. P. 57–63.

Zdorovenkova G. E., Zdorovenkov R. E., Palshin N. I., Gavrilenko G. G., Terzhevnik A. Yu. Termicheskiy rezhim melkovodnogo ozera posle razrusheniya l'da [Thermal regime of a shallow lake after ice fracturing]. *Dinamika i termika rek, vodokhranilishch i pribrezhnoi zony morei: Trudy VIII mezhd. nauch.-prakt. konf. [Dynamics and Thermics of Rivers, Reservoirs, and Sea Coastal Areas: Proceed. of VIII Int. Scientific and Practical Conf.]* Moscow: RUDN, 2014. P. 390–401.

Zdorovenkova G. E., Zdorovenkov R. E., Palshin N. I., Efremova T. V., Gavrilenko G. G., Bogdanov S. R., Terzhevnik A. Yu. Teplovoi rezhim melkovodnogo ozera zimoi [Thermal regime of a shallow lake in winter]. *Trudy KarNTs RAN [Trans. of KarRC of RAS]*. 2016. No. 5. P. 3–12. doi: 10.17076/lim314

Zilitinkevich S. S. Pronikayushchaya turbulentsnaya konveksiya [Turbulent penetrative convection]. Tallinn: Valgus, 1989. 207 p.

Arvola L., George G., Livingstone D. M., Järvinen M., Blenckner T., Dokulil M. T., Jennings E., Aonghusa C. N., Nöges P., Nöges T., Weyhenmeyer G. A. The impact of the changing climate on the thermal characteristics of lakes, in *The Impact of Climate Change on European Lakes. Aquatic Ecology. Series 4*. Ed. by D. G. George. P. 85–101. Springer Verlag, 2010. doi: 10.1007/978-90-481-2945-4_6

Golosov S., Maher O. A., Schipunova E., Terzhevik A., Zdorovenнова G., Kirillin G. Physical background of the development of oxygen depletion in ice-covered lakes. *Oecologia*. 2007. Vol. 151. P. 331–340.

Golosov S., Zverev I., Terzhevik A. Modelling thermal structure and heat interaction between water column and bottom sediments in ice-covered lakes. Ed. A. Terzhevik. Proc. 7th Workshop on Physical Processes in Natural Waters. Petrozavodsk, 2003. P. 83–88.

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

Kirillin G. Modelling the impact of global warming on water temperature and seasonal mixing regimes in small temperate lakes. *Boreal Env. Research*. 2010. Vol. 15. P. 279–293.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. Temperature and salt content regimes in three shallow ice-covered lakes: 1. Temperature, salt content, and density structure. *Nordic Hydrology*. 1997. Vol. 28. P. 99–128.

Mironov D., Terzhevik A., Kirillin G., Jonas T., Malm J., Farmer D. Radiatively-driven convection in ice-covered lakes: observation, scaling and a mixed-layer model. *Journal of Geophysical Research*. 2002. Vol. 107, I. C4. P. 7–1–7–16. doi: 10.1029/2001JC00089

Mironov D., Heise E., Kourzeneva E., Ritter B., Schneider N., Terzhevik A. Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO. *Boreal Env. Res*. 2010. Vol. 15. P. 218–230.

Read J. S., Hamilton D. P., Jones I. D., Muraoka K., Winslow L. A., Kroiss R., Wu Ch. H., Gaiser E. Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data. *Env. Modelling and Software*. 2011. Vol. 26, no. 11. P. 1325–1336. doi: 10.1016/j.envsoft.2011.05.006

Wüest A., Lorke A. Small-scale hydrodynamics in lakes. *Annu. Rev. Fluid Mech*. 2003. Vol. 35. P. 373–412. doi: 10.1146/annurev.fluid.35.101101.161220

Zdorovenнов R., Palshin N., Zdorovenнова G., Efremova T., Terzhevik A. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake. *Estonian Journal of Earth Sciences*. 2013. Vol. 61, no. 1. P. 26–32.

Zdorovenнова G., Palshin N., Zdorovenнов R., Golosov S., Efremova T., Gavrilenko G., Terzhevik A. The oxygen regime of a shallow lake. *Geography, Environment, Sustainability*. 2016. No. 2. P. 47–57. doi: 10.15356/2071-9388_02v09_2016_04

Received September 29, 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Терзhevik Аркадий Юрьевич

ведущий научный сотрудник лаборатории гидрофизики,
к. т. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: ark1948@list.ru
тел.: +79217267356

Голосов Сергей Дмитриевич

старший научный сотрудник лаборатории гидрофизики,
к. ф.-м. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030

старший научный сотрудник
Институт озераведения РАН
ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105
эл. почта: sergey_golosov@mail.ru

Гавриленко Галина Геннадиевна

младший научный сотрудник лаборатории гидрофизики
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: south.sun.cr@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Terzhevik, Arkady

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: ark1948@list.ru

Golosov, Sergey

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia

Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences
9 Sevastyanov St., 196105 St. Petersburg, Russia

e-mail: sergey_golosov@mail.ru

Gavrilenko, Galina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: south.sun.cr@gmail.com

Здоровеннов Роман Эдуардович

старший научный сотрудник лаборатории гидрофизики,
к. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: romga74@gmail.com
тел.: +79212209438

Здоровеннова Галина Эдуардовна

и. о. заведующего лаб. гидрофизики, 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.: +79116660369

Волков Сергей Юрьевич

и. о. младшего научного сотрудника, аспирант
лаборатории гидрофизики
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: taranarmo@gmail.com

Пальшин Николай Иннокентьевич

старший научный сотрудник лаборатории гидрофизики,
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

Ефремова Татьяна Владимировна

старший научный сотрудник лаборатории гидрофизики,
к. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: efremova@nwpi.krc.karelia.ru

Богданов Сергей Рэмович

ведущий научный сотрудник лаборатории гидрофизики
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: sergey.r.bogdanov@mail.ru

Zdorovennov, Roman

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: romga74@gmail.com
tel.: +79212209438

Zdorovennova, Galina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: zdorovennova@gmail.com
tel.: +79116660369

Volkov, Sergey

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: taranarmo@gmail.com

Palshin, Nikolai

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: npalshin@mail.ru

Efremova, Tatyana

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

Bogdanov, Sergey

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: sergey.r.bogdanov@mail.ru