

УДК 556.114.2: 551.312: 556.555.5

## **ПОГЛОЩЕНИЕ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА ВЕРХНИМ СЛОЕМ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В МАЛОМ ОЗЕРЕ В КОНЦЕ ПЕРИОДА ЛЕДОСТАВА**

**Н. И. Пальшин, Г. Э. Здравеннова, Т. В. Ефремова,  
Р. Э. Здравеннов, Г. Г. Гавриленко, С. Р. Богданов,  
С. Ю. Волков, А. Ю. Тержевик**

*Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск*

В работе приводятся результаты исследования содержания растворенного кислорода вблизи границы вода-донные отложения в малом мезотрофном озере Вендюрском (юг Карелии) в конце периода ледостава. Измерения проводились в апреле 2008 г. на 18 склоновых станциях с глубинами от 2,5 до 9,3 м с преобладанием жидких илистых отложений. Установлено, что вблизи границы с илами содержание растворенного кислорода резко уменьшается, при этом максимальный его градиент достигает 9 (мгО<sub>2</sub>/л)/см непосредственно на границе воды и ила. Показано, что скорость потребления кислорода донными отложениями на станциях с глубинами 6–8 м максимальна и в 1,5 раза выше, чем на станциях с меньшими и большими глубинами. С учетом батиметрической кривой озера оценен объем поглощения растворенного кислорода всей площадью донных отложений. Сопоставление полученных оценок с данными измерений содержания растворенного кислорода в водной толще озера в этот же период позволяет утверждать, что более 60 % его уменьшения на этапе зимней стагнации приходится на поглощение илами и менее 40 % – на деструкцию лабильного органического вещества в водной толще.

Ключевые слова: растворенный кислород; донные отложения; поглощение кислорода; мелководное озеро; период ледостава.

**N. I. Palshin, G. E. Zdrovennova, T. V. Efremova, R. E. Zdrovennov,  
G. G. Gavrilenko, S. R. Bogdanov, S. Yu. Volkov, A. Yu. Terzhevik.  
ABSORPTION OF DISSOLVED OXYGEN BY THE UPPER LAYER OF BOTTOM  
SEDIMENTS IN A SMALL LAKE DURING LATE WINTER**

The results of measurements of dissolved oxygen in the vicinity of the water-sediment interface in a small mesotrophic Lake Vendyurskoe (Southern Karelia) at the end of the ice-covered period are reported. The measurements were carried out in April 2008 on 18 slope sites (depths from 2.5 m to 9.3 m), with a predominance of water-saturated silt. The content of dissolved oxygen decreased sharply at the contact with silt. The maximum oxygen gradient reached 9 (mgO<sub>2</sub>/l)/cm on the silt surface. The rate of oxygen consumption by the sediment was maximal at a depth of 6–8 m. This rate was 1.5 times lower in shallower and deeper areas. The amount of dissolved oxygen absorption by sediments was estimated based on the lake's bathymetric curve. A comparison of our estimates with the measured dissolved oxygen content in the water column suggests that

over 60 % of oxygen reduction is the result of absorption by silt and less than 40 % is due to the destruction of labile organic matter in the water column at the stage of winter stagnation.

**Keywords:** dissolved oxygen; bottom sediments; absorption of dissolved oxygen; shallow lake; ice-covered period.

## Введение

Основными факторами, определяющими кислородный режим водоемов суши в подледный период, когда подавлен фотосинтез и минимален газообмен с атмосферой, можно считать поступление кислорода с речными водами и его расход на деструкцию органического вещества (ОВ) в водной толще и потребление донными отложениями. Скорость потребления кислорода (СПК) в водной толще малопроточных озер и водохранилищ зимой определяется температурой воды, содержанием ОВ и растворенного кислорода (РК), а также дефицитом РК; кроме того, важную роль играют погодные условия предледоставного периода [Кременецкая, 2007; Golosov et al., 2007]. СПК характеризуется выраженной пространственно-временной изменчивостью: ее максимум приходится на первые недели зимы и приурочен к придонным слоям глубоководных районов [Тержевик и др., 2010]. Оценки СПК в озерах и водохранилищах умеренной зоны для периода ледостава находятся в одном диапазоне: в центральном районе Можайского водохранилища 0,04–0,07 (мгО<sub>2</sub>/л)/сут [Пуклаков и др., 2002], в водах Рыбинского водохранилища – 0,02–0,05 (мгО<sub>2</sub>/л)/сут [Романенко, 1967], в оз. Красном – 0,02–0,09 (мгО<sub>2</sub>/л)/сут [Стравинская, 1971], в оз. Вендюрском – 0,01–0,1 (мгО<sub>2</sub>/л)/сут. СПК на границе с донными отложениями зависит от типа грунта. В частности, исследования на Можайском водохранилище в летний период показали, что для песков, занимающих обычно малые глубины, фактором, определяющим СПК, является содержание ОВ, в то время как для илов, преобладающих в глубоководных частях водоемов, где высока вероятность развития аноксии, решающим фактором выступает содержание РК в придонной воде [Бреховских и др., 2006].

До настоящего времени зимний кислородный режим водоемов суши остается слабоизученной областью лимнологии. Основной целью настоящей работы являлась количественная оценка поглощения растворенного кислорода донными отложениями в течение подледного периода в малом мезотрофном озере.

## Материалы и методы

**Объект исследования.** Озеро Вендюрское расположено в южной части Карелии (62°10'–62°20' с. ш., 33°10'–33°20' в. д.), Россия. Оно относится к классу малых бореальных озер мезотрофного типа. Длина озера 7 км, средняя ширина 1,5 км, площадь 10,5 км<sup>2</sup>, средняя глубина 5,3 м, наибольшая 13,4 м (рис. 1). В донных отложениях в основном доминируют илы коричневой окраски, иногда с примесью песка и руды, а на прибрежных склонах до глубины 1–2 м встречаются преимущественно песчаные грунты. По гранулометрическому составу преобладают мелкоалевритовые илы. Мощность иловой толщи составляет 0,4–0,9 м, а в обособленных углублениях дна превышает метр [Литинская, Поляков, 1975]. Содержание воды в верхнем 10-сантиметровом слое илистых отложений в оз. Вендюрском изменяется от 94 до 97 %, плотность твердой части осадков составляет 1,9–2,0 г/см<sup>3</sup> [Malm et al., 19976].

В период открытой воды толща оз. Вендюрского достаточно хорошо насыщена кислородом вследствие периодического перемешивания [Гавриленко и др., 2014]. Во время осенней и весенней гомотермии насыщение водных масс кислородом часто превышает 90 %. С июня по август при жаркой безветренной погоде в озере нередко устанавливается термическая стратификация, при этом в придонных слоях обособленных котловин создаются неблагоприятные кислородные условия с формированием выраженного дефицита [Ефремова и др., 2015]. В предледоставный период при понижении температуры воды на 0,2–0,3 °С за сутки содержание РК в озере увеличивается в среднем на 0,1 мгО<sub>2</sub>/л за сутки в соответствии с ростом его растворимости. Ледовый покров обычно устанавливается с середины ноября до середины декабря при температуре водного столба в центральной глубоководной части озера 0,5–1,5 °С [Malm et al., 1997a; Пальшин, 1999; Петров и др., 2006]. К моменту установления льда происходит обогащение воды кислородом до 12–13 мгО<sub>2</sub>/л (насыщение 90–98 %).

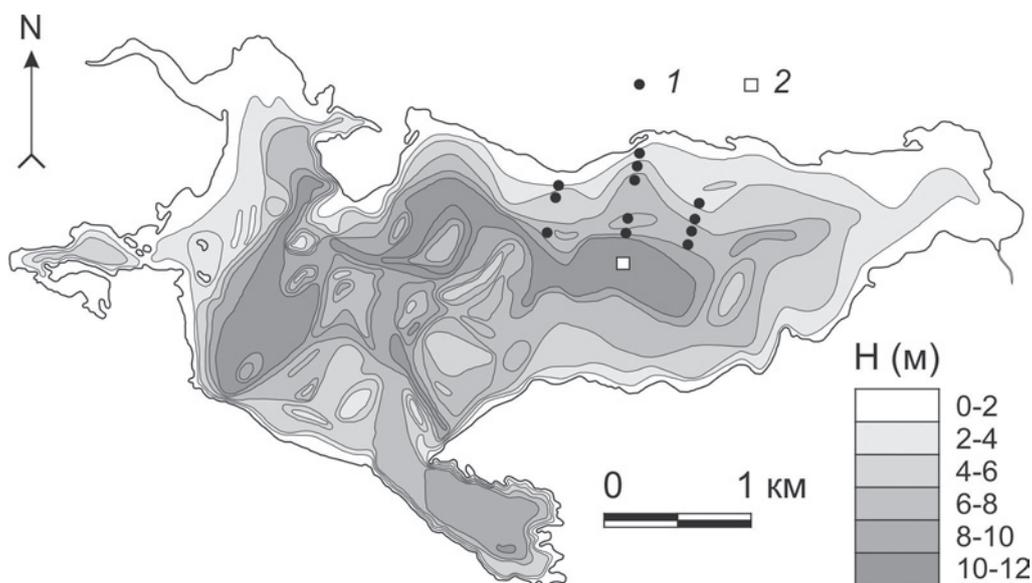


Рис. 1. Батиметрия озера Вендюрского и положение станций измерений концентрации РК с илистыми донными отложениями (1) и термокосы (2)

Кислородный режим озера Вендюрского в период ледостава достаточно подробно изучался в 2002–2013 гг. [Пальшин и др., 2006; Terzhevik et al., 2009; Тержевик и др., 2010]. Было показано, что в течение нескольких суток после установления льда средняя концентрация РК по всей водной толще озера уменьшается на 1,5–2 мгО<sub>2</sub>/л в результате того, что снежно-ледяной покров препятствует газообмену водной массы озера с атмосферой, подавляет фотосинтез, а потребление РК на окисление ОВ преобладает над первичной продукцией. Уже через несколько дней ледостава в придонных слоях начинает формироваться стратификация РК. В тонком придонном слое происходит снижение концентрации РК почти до нуля. Со второго месяца ледостава концентрация РК в верхних слоях водной толщи существенно не меняется, а у дна в локальных углублениях повсеместно образуются слои воды с дефицитом кислорода, толщина которых постепенно растет. К началу пятого месяца ледостава верхняя граница градиентного слоя поднимается до глубин 2–4 м. В глубоководной части озера образуется придонная анаэробная зона толщиной до 1,0–1,5 м. При этом горизонтальные неоднородности в распределении РК обычно не превышают 2 мгО<sub>2</sub>/л в поверхностном слое по акватории озера, а в тонких придонных слоях (10–20 см) почти на всех склоновых станциях наблюдается существенное уменьшение кислорода.

**Методика измерений.** Детальные исследования концентрации РК вблизи границы вода-дно были выполнены 17–19 апреля

2008 г. Измерения проводились со льда зондирующим прибором Oxi 340i WTW, Германия (диапазон измерений РК от 0 до 19,99 мгО<sub>2</sub>/л, разрешение 0,01 мгО<sub>2</sub>/л, точность <2 % от измеренного значения). Для улучшения проникновения датчика в ил он был утяжелен дополнительным грузом, а конец кабеля выправлен, чтобы во время зондирования мембрана датчика (диаметром около 10 мм) располагалась почти параллельно поверхности дна. Это позволяло без существенной погрешности проводить измерения с высоким разрешением по вертикали. При измерениях на станциях высверливались две лунки приблизительно в 1,5 м друг от друга. В одной из них с помощью ручного лота определялась глубина с точностью до 1–2 см и отбиралась проба грунта на визуальный анализ. Измерения РК проводились в соседней лунке. На приборном кабеле изоляцией ставились марки для контроля положения датчика на заданных горизонтах измерений. Для установки датчика кислорода на нужном горизонте применялись две дощечки, уложенные над лункой на лед; между ними пропускался кабель, который фиксировался щипковым (химическим) зажимом. При перемещении датчика на нужный горизонт использовалась плашка, размеры которой соответствовали необходимым вертикальным сдвигам (3×10×50 мм). Для исключения колебаний и возможных возмущений в воде датчик с горизонта на горизонт перемещался плавно только в вертикальном направлении. Наблюдения проводились на 18 склоновых станциях с глубинами от 2,5 до 9,3 м, с шагом по вертикали

1–5 см в придонном слое воды толщиной 20–25 см, а вблизи границы вода-дно (1–2 см выше и ниже поверхности ила) – меньше 1 см. Измерения продолжались до снижения концентрации кислорода меньше 1 мгО<sub>2</sub>/л.

При проведении измерений концентраций РК в озере *in situ* трудно точно установить границу воды и донных отложений. В октябре 2007 г. на нескольких станциях были отобраны колонки придонной воды и верхнего слоя донных отложений «стратометром» (рис. 2, а). При проведении измерений в этих колонках можно было визуально проследить положение датчика относительно поверхности дна (рис. 2, б). Измерения концентраций РК вблизи границы с донными отложениями проводились через 2–3 мм. Было установлено, что максимальные градиенты РК

всегда соответствовали непосредственно границе раздела воды и донных отложений. Поэтому в анализе данных апрельских зондирований было принято предположение о том, что граница воды и донных отложений соответствует максимальному значению градиента РК.

С октября 2007 г. по май 2008 г. в центральной глубоководной части озера Вендюрского была установлена коса, оснащенная датчиками температуры и растворенного кислорода с автономными логгерами производства канадской фирмы RBR Ltd (рис. 1). Измерения проводились в водной толще через 1–1,5 м с дискретностью по времени одна минута. По данным косы вычислены среднесуточные концентрации РК на горизонтах (для исключения мелко-масштабных флуктуаций). Учитывая эти данные

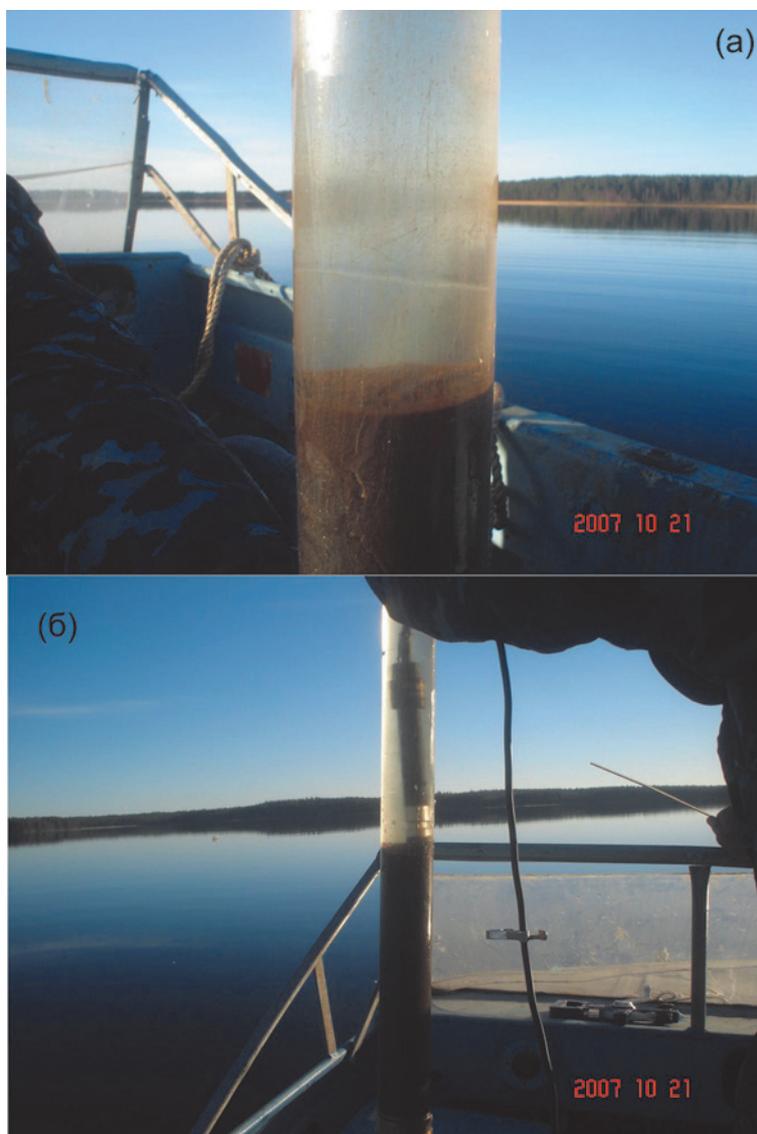


Рис. 2. Колонка надилловой воды и седиментов, отобранная стратометром в октябре 2007 года (а). Измерение концентраций РК вблизи границы вода-дно прибором Oxi 340i WTW (б)

и батиграфическую кривую озера, были выполнены оценки содержания РК и скорости его изменений в объеме всего озера через каждые 30-е сутки зимнего сезона, начиная с третьих суток после образования ледового покрова.

Потребление растворенного кислорода донными отложениями обычно описывают первым законом Фика [Мизандронцев, 1990]:

$$F = D_{эф} \partial C / \partial z, \quad (1)$$

где  $D_{эф}$  – эффективный коэффициент диффузии,  $см^2/сут$ , зависящий от температуры и пористости грунтов;  $C$  – концентрация РК,  $мг/см^3$ ;  $z$  – глубина,  $см$ .

Коэффициент  $D_{эф}$  можно определить как

$$D_{эф} = D_0 \rho^m, \quad 1.3 < m < 3, \quad (2)$$

где  $D_0$  – коэффициент молекулярной диффузии в разбавленном водном растворе при данной температуре;  $\rho$  – пористость, соответствует свободному поровому раствору и рассчитывается из весовой влажности и плотности скелета осадков;  $m$  – фактор монолитности, в расчетах был принят равным двум. Коэффициенты  $D_0$  рассчитывались по формуле для молекулярной диффузии кислорода в разбавленном водном растворе, приведенной в работе [Мизандронцев, 1990], в зависимости от температуры у дна на каждой станции и динамической вязкости воды. Их изменения составляли от 0,95 до 1,15  $см^2/сут$  при увеличении температуры воды от 0 до 5 °C соответственно. В работе [Lerman, 1979] приводятся отдельные значения коэффициентов, которые лишь на 5 % меньше.

Верхний тонкий слой илов озера Вендюрского насыщен водой больше, чем нижележащие слои, что хорошо видно на фотографии колонки грунта, отобранной стратометром в октябре 2007 г. (рис. 2, а): верхний слой ила – около 1,5 см, светло-коричневой окраски (окисленный) и очень жидкий, ниже ил уплотненный, почти черного цвета. Существенное уплотнение ила наблюдается лишь на глубинах более 20–30 см. Поэтому при расчете пористости седиментов для слоя толщиной меньше одного сантиметра можно с определенной уверенностью принять  $\rho = 0,99$  для глубоководных и 0,98 для мелководных станций.

Содержание органических веществ в илистых отложениях определялось по результатам выпаривания и потерь при прокаливании по 10 образцам. Потери при прокаливании составляли в среднем около 30 % от общего веса твердого материала. Одновременно со сжиганием органических веществ происходит разрушение и минеральных веществ, что, по данным П. А. Лозовика [1991], составляет 70 и 30 % соответственно. Таким образом, в твердом материале илистых отложений оз. Вендюрского содержание органических веществ может достигать 20 % и даже быть выше – для самого верхнего слоя седиментов, насыщенного водой на 95–99 %.

## Результаты

Анализ данных многочисленных зондирований позволил выделить три основных типа вертикальных профилей РК, которые могут

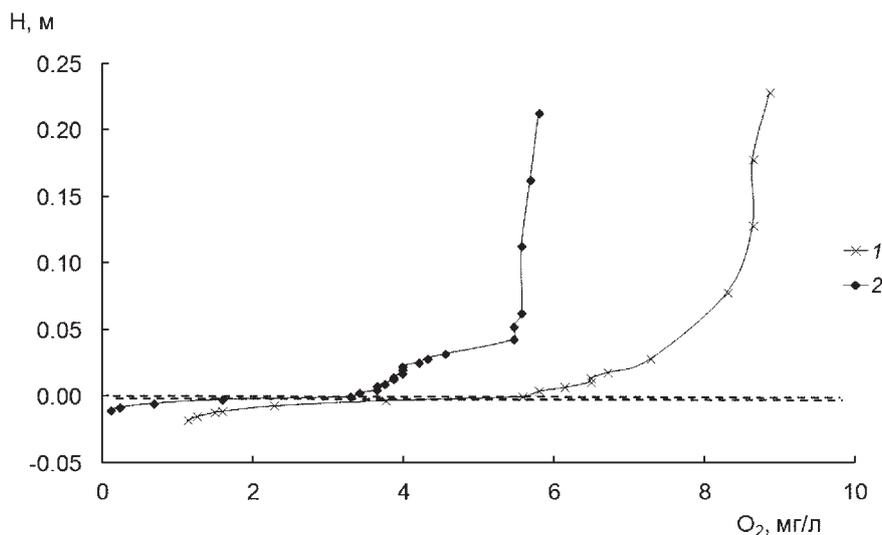


Рис. 3. Концентрация РК в придонном слое воды и верхнем слое ила (апрель 2008 г.) на двух склоновых станциях: 1 – 60 м от берега, глубина 2,5 м; 2 – 300 м от берега, глубина 6,2 м. Маркерами показаны горизонты измерений, горизонтальная пунктирная линия – граница вода-дно

оказывать влияние на диффузионные процессы на границе вода-дно: (1) при плотном грунте (песок, галька), часто встречающемся у берегов и на лудах, и небольшом содержании ОВ на вертикальных профилях кислорода отсутствуют градиенты в придонном слое, то есть поглощение РК поверхностью донных отложений тут минимально; (2) в глубоководной центральной котловине и локальных углублениях кислород к концу зимы в придонной воде отсутствует практически полностью, поэтому градиент кислорода в придонном слое равен нулю; (3) значительная площадь поверхности дна озера представлена склонами различной крутизны с жидкими илистыми отложениями, в придонном слое которых наблюдаются резкие градиенты РК, что является признаком его активного поглощения илами.

В анализе потребления РК поверхностью донных отложений использовались данные с 12 станций, на которых преобладали жидкие илистые отложения (рис. 1), то есть с третьим типом вертикального распределения РК. Данные с мелководных участков с твердым грунтом, как и с участков, относящихся к обособленным углублениям дна, при оценке потоков кислорода в седименты не учитывались. Такие участки дна занимают относительно небольшую площадь по сравнению с площадью склонов.

Анализ вертикальных профилей РК и его градиента показал, что толщина слоя с максимальным градиентом РК не превышает 1–2 см на всех рассмотренных станциях. Выше и ниже величина градиента существенно уменьшается. Типичные профили РК в придонном слое толщиной

около 25 см для двух склоновых станций с мягкими илистыми донными отложениями из разных районов озера (прибрежное мелководье и средние глубины) приведены на рисунке 3.

На станциях с глубинами менее 5 м концентрация РК в верхней части придонного пограничного слоя (10–20 см выше поверхности дна) составляла 6–9 мгО<sub>2</sub>/л. Вертикальный градиент РК в тонком слое (2–4 мм) вблизи границы вода-дно и самой верхней части ила достигал 6–7 (мгО<sub>2</sub>/л)/см и изменялся мало без определенной зависимости от концентрации РК или температуры воды. На станциях с глубинами от 5 до 7 м в зоне контакта воды и донных отложений наблюдался рост градиента кислорода до 9 (мгО<sub>2</sub>/л)/см, что происходило в результате уменьшения толщины слоя ила, в котором присутствовал кислород. На станциях с глубинами больше 8 м концентрация РК в верхней части придонного пограничного слоя была меньше 5 мгО<sub>2</sub>/л, и одновременно резко уменьшался градиент кислорода у поверхности дна. В анаэробной зоне озера ниже 10 м градиент кислорода на дне соответственно был равен нулю.

На рисунке 4 приведены скорости потребления РК верхним тонким слоем ила, оцененные по формулам (1) и (2), для 12 склоновых станций с разными глубинами. Максимальная скорость потребления кислорода илистыми донными отложениями отмечается на станциях с глубинами 6–8 м, где она в 1,5 раза выше, чем на станциях с меньшими и большими глубинами.

С учетом батиметрической кривой озера нами был оценен объем поглощения кислорода

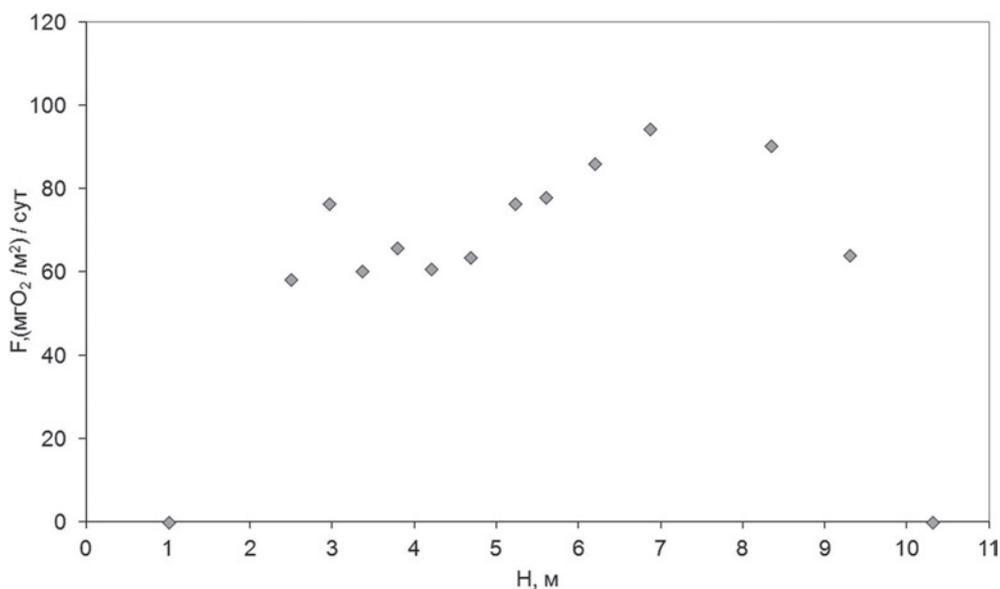


Рис. 4. Скорости потребления РК илами на станциях с разными глубинами в оз. Вендюрском (апрель 2008 г.)

Содержание РК в оз. Вендюрском и скорость его уменьшения ( $\Delta PK/\Delta t$ ) в течение зимы 2007–2008 гг. по данным косы

Период измерений	$\Delta t$ , сут	РК, т		$\Delta PK$ , т	$\Delta PK/\Delta t$ , т/сут	$C_0$ , мг/л	$C_1$ , мг/л
		начало	конец				
15.11.07–15.12.07	30	570,8	547,8	23,0	0,77	11,4	11,0
15.12.07–14.01.08	30	547,8	525,3	22,5	0,75	11,0	10,5
14.01.07–13.02.08	30	525,3	495,0	30,3	1,01	10,5	9,9
13.02.07–14.03.08	30	495,0	459,1	35,9	1,20	9,9	9,2
14.03.07–13.04.08	30	459,1	430,2	28,9	0,96	9,2	8,6

Примечание.  $C_0$  и  $C_1$  – начальное и конечное значения средневзвешенных по озеру концентраций РК в рассматриваемые периоды  $\Delta t$ .

всей площадью донных отложений, который составил 645 кг  $O_2$  за сутки. Если принять во внимание, что примерно 10 % площади озера покрыто твердыми седиментами (песок, галька, глина), где потребление РК поверхностью донных отложений незначительно, то полученное нами значение должно быть уменьшено также на 10 %, что дает оценку около 590 кг  $O_2$  за сутки.

Содержание РК в объеме всего озера на каждые 30-е сутки зимнего сезона 2007–2008 гг., а также скорость изменения РК, рассчитанная по данным косы, приведены в таблице. Скорость уменьшения содержания РК в озере в течение зимнего сезона изменялась от 0,75 до 1,20 т/сут. Наименьшие значения соответствовали первым двум месяцам ледостава. Это, вероятно, было вызвано тем, что оценки скорости изменения РК были получены по данным косы, расположенной в центральной части озера, а формирование вертикального профиля РК во времени здесь может отличаться от склоновых станций. По данным пространственных съемок ранее была установлена обратная тенденция изменений скорости РК. Во второй половине марта – первой половине апреля скорость уменьшения РК составляла 0,96 т/сут и была близка к средней скорости за весь зимний сезон – 0,94 т/сут. Сопоставление средней величины скорости уменьшения РК в озере со скоростью потребления кислорода донными отложениями (около 600 кг  $O_2$  за сутки) говорит о том, что в оз. Вендюрском им принадлежит основная роль (на 62–67 %) в изменениях содержания РК в конце зимнего сезона. На деградацию лабильного ОВ в водной толще, как остаточный член, приходится меньше 40 %.

### Обсуждение результатов

При определении величины потребления РК донными отложениями в соответствии с законом Фика описывается чисто физический процесс переноса вещества. В то же время распределение концентрации РК в седиментах

следует не физической, а биологической закономерности [Пельш, 1939]. В толще ила сверху вниз убывает питательная ценность детрита и одновременно со снижением кислорода уменьшается количество аэробных бактерий. Скорость процесса окисления определяется «вероятностью встречи аэробных бактерий с молекулами растворенного кислорода и пропорциональна произведению концентрации РК в осадке на численность микроорганизмов, отнесенную к единице объема водонасыщенного пористого осадка» [Мизандронцев, 1990]. Наибольшей напряженности микробиологические процессы, определяющие поток РК в ил, достигают у самой его поверхности, где осажены свежие порции детрита. При переходе от поверхности ила в более глубокие его слои развитие аэробных микроорганизмов ослабевает по мере уменьшения концентраций кислорода и количества легкоусвояемых углеводов. Тем самым контролируется толщина слоя окисления и устанавливаются абсолютные значения максимальных градиентов РК вблизи границы вода-дно в соответствии с соотношением скоростей его потребления в результате микробиологической деятельности и физического диффузионного выравнивания концентрации. Скорость химических реакций и активность бактерий зависят от температуры воды. В результате увеличения температуры воды на один градус при низких ее значениях (от 5 до 7 °C) скорость обмена РК в соответствии с температурными поправками возрастает на 15 % [Мизандронцев, 1990]. В качестве важных факторов, определяющих потребление кислорода донными отложениями, также можно назвать типы грунтов и количество макрозообентоса, который не только расходует кислород, но и создает сеть каналов в осадках, изменяя их текстуру [Бреховских и др., 2006].

Поверхностный слой ила с максимальными градиентами РК в оз. Вендюрском имеет толщину около 1–2 см. По измерениям окислительно-восстановительного потенциала в донных отложениях других водоемов [Mortimer, 1971;

Бреховских, 1988] толщина деятельного слоя аэробных микроорганизмов также ограничена очень тонким слоем до нескольких мм. Полученные нами оценки толщины градиентного слоя РК на границе вода-донные отложения для озера Вендюрского превышают результаты, приведенные в работе [Gundersen, Jorgensen, 1991], почти на порядок: измерения *in situ* на границе вода-морские седименты микроэлектродным датчиком позволили установить, что толщина градиентного слоя РК не превышает 1–3 мм. Столь заметное различие связано с тем, что морские донные осадки, вероятно, были в большей степени уплотнены, чем сильно насыщенные водой илы в малом озере, в результате чего в них могла быть выше концентрация ОВ на единицу объема пористого осадка.

Нами была установлена зависимость скорости потребления РК поверхностью донных отложений от глубины. Меньшие скорости потребления РК илами в оз. Вендюрском на глубинах до 5 м (рис. 4), по сравнению с горизонтами 6–8 м, можно объяснить более низкой температурой воды у дна на мелководных станциях и меньшим процентным содержанием лабильного ОВ в донных отложениях, поскольку осевшее на дно свежееобразованное ОВ в осенний период при усилении ветров легко взмучивается и в конечном итоге переносится в глубоководную зону. Уменьшение скорости деструкции ОВ на поверхности илов на глубинах более 8 м обусловлено существенным снижением концентрации РК в придонном пограничном слое в конце зимы. Полученные нами результаты совпадают с выводами о ведущей роли количества ОВ в донных отложениях, как фактора, определяющего интенсивность потребления РК донными отложениями в начале зимы, и содержания РК в придонной воде – в конце периода ледостава [Бреховских и др., 2003].

Кислородный режим оз. Вендюрского по результатам измерений в зимние месяцы 2002–2009 гг. детально рассмотрен в работе [Тержевик и др., 2010]. По данным пространственных съемок в разные периоды зимы были получены средневзвешенные концентрации кислорода в целом для всего озера (с учетом его батиграфической кривой) и оценена скорость изменения содержания РК в течение зимы. Было показано, что изменение содержания РК в озере Вендюрском зимой обусловлено главным образом деструкцией ОВ в водной толще и донных отложениях, при этом максимальная скорость снижения РК была отмечена в придонных слоях центральной котловины и локальных углублениях дна, что косвенно подтверждает полученный нами вывод о преобладании поглощения

РК илами (более 60 %) по сравнению с водной толщей (менее 40 %). Как показано в работе Бреховских с соавторами [2003], вклад донных отложений Можайского водохранилища в потребление РК в придонном слое не превышал 40 % в первую половину зимы и увеличился до 50–75 % во вторую, что также неплохо согласуется с полученными нами оценками для конца периода ледостава.

## Заключение

Показана возможность проведения измерений *in situ* растворенного кислорода с высоким разрешением по вертикали вблизи границы вода-донные отложения в мелком озере в период ледостава. Измерения в отобранных стратометром колонках показали, что максимальные градиенты РК на склоновых станциях наблюдаются у самой поверхности донных отложений. Толщина слоя ила, где концентрация кислорода резко снижается до десятых долей мгО<sub>2</sub>/л, не превышает 1–2 см. Поэтому для получения корректных оценок скоростей обмена РК на границе с донными отложениями необходимо проводить измерения с разрешением по вертикали через несколько мм.

На примере оз. Вендюрского показана зависимость скорости потребления растворенного кислорода илистыми донными отложениями от глубины места. Наибольшие скорости потребления соответствуют глубинам 6–8 м, где температура воды выше, чем на прибрежных станциях, но еще достаточно высокие концентрации кислорода в надилловой воде. Они в 1,5 раза выше, чем на станциях с меньшими и большими глубинами. В центральной котловине озера и других локальных углублениях дна обмен между водой и донными отложениями лимитируется низким содержанием растворенного кислорода в придонных слоях.

В период ледостава в мелком мезотрофном озере основную роль в изменениях содержания кислорода играет его потребление донными отложениями на окисление осажденных органических веществ. Вклад поглощения РК поверхностью донных отложений в оз. Вендюрском превышает 60 % от общего объема его уменьшения во всей водной толще.

## Литература

- Бреховских В. Ф. Гидрофизические факторы формирования кислородного режима водоемов. М.: Наука, 1988. 168 с.
- Бреховских В. Ф., Вишневская Г. Н., Кремневецкая Е. Р., Ломова Д. В. Об оценке потребления

кислорода разными типами грунтов долинных водохранилищ в летний период // Метеорология и гидрология. 2006. № 10. С. 82–91.

Бреховских В. Ф., Гашкина Н. А., Кременецкая Е. Р., Ломова Д. В. Особенности кислородного режима Можайского водохранилища в период ледостава // Метеорология и гидрология. 2003. № 1. С. 103–109.

Гавриленко Г. Г., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Пальшин Н. И., Терзевик А. Ю. Термический и кислородный режимы мелководного озера на этапе летнего нагревания // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. № 10(1). С. 414–421.

Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Здоровеннова 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. doi: 10.3103/S106837391509006X

Кременецкая Е. Р. Оценка скорости потребления кислорода в толще воды Можайского и Иваньковского водохранилищ // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 3. С. 310–317.

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.

Лозовик П. А. Химический состав взвеси, твердой и жидкой фракций илов и обменные процессы «вода – дно». Изменение гидрохимического режима оз. Суоярви // Поверхностные воды озерно-речной системы Шуи в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: Карельский фил. АН СССР, 1991. С. 114–118.

Мизандронцев И. Б. Химические процессы в донных отложениях водоемов. Новосибирск: Наука, 1990. 176 с.

Пальшин Н. И. Термические и гидродинамические процессы в озерах в период ледостава. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1999. 86 с.

Пальшин Н. И., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э., Митрохов А. В., Петров М. П., Терзевик А. Ю. Гидрофизические аспекты развития экосистемных процессов замерзающих озер // Водные ресурсы Европейского Севера России: итоги и перспективы исследований: матер. юбил. конф., посвящ. 15-летию ИВПС. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 359–377.

Пельш А. Д. О неоднородности жидкой фазы ила (гидрохимическая роль микроорганизмов) // Ученые записки ЛГУ. 1939. № 30, вып. 8. С. 5–46.

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. doi: 10.1134/S0097807806020035

Поверхностные воды озерно-речной системы Шуи в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: КарНЦ АН СССР, 1991. 212 с.

Пуклаков В. В., Эдельштейн К. К., Кременецкая Е. Р., Гашкина Н. А. Самоочищение вод Можайского водохранилища зимой // Водные ресурсы. 2002. Т. 29, № 6. С. 711–720.

Романенко В. И. Микрофлора, фитопланктон и высшая водная растительность внутренних водоемов. Л.: Наука, 1967. 61 с.

Сабылина А. В., Лозовик П. А., Калмыков М. В. Изменение гидрохимического режима озера Крошнозера в результате антропогенного воздействия. Петрозаводск: Карелия, 1990. 37 с.

Стравинская Е. А. Особенности гидрохимического режима оз. Красного // Озера Карельского перешейка. Л.: Наука, 1971. С. 129–210.

Терзевик А. Ю., Пальшин Н. И., Голосов С. Д., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э., Митрохов А. В., Потахин М. С., Шипунова Е. А., Зверев И. С. Гидрофизические аспекты формирования кислородного режима мелководного озера, покрытого льдом // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 568–579. doi: 10.1134/S0097807810050064

Golosov S., Maher O. A., Shipunova E., Terzhevik A., Zdorovennova G., Kirillin G. Physical background of the development of oxygen depletion in ice-covered lakes // Oecologia. 2007. No. 151. P. 331–340.

Gundersen J. K., Jergensen B. B. Fine-scale in situ measurements of oxygen distribution in marine sediments // Kieler Meeresforsch. Sonderh. 1991. 8. P. 376–380.

Lerman A. Geochemical Processes: Water and Sediment Environments. N. Y.: Wiley-Interscience. 1979. 481 p.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. Temperature and salt content regimes in three shallow ice-covered lakes: 1. Temperature, salt content, and density structure // Nordic Hydrol. 1997a. Vol. 28, no. 2. P. 99–128.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. Temperature and salt content regimes in three shallow ice-covered lakes: 2. Heat and mass fluxes // Nordic Hydrology. 1997b. Vol. 28, no. 2. P. 129–152.

Mortimer C. H. Chemical exchange between sediment and water in the Great Lakes – speculations on probable regulatory mechanisms // Limnol. Oceanogr. 1971. Vol. 16, no. 2. P. 387–404.

Terzhevik A., Golosov S., Palshin N., Mitrokhov A., Zdorovennov R., Zdorovennova 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

Поступила в редакцию 21.07.2016

## References

Brekhovskikh V. F. Gidrofizicheskie factory formirovaniya kislorodnogo rezhima vodoemov [Hydrophysical

factors of formation of oxygen regime of water bodies]. Moscow: Nauka, 1988. 168 p.

Brekhovskikh V. F., Vishnevskaya G. N., Kremetskaya E. R., Lomova D. V. Ob otsenke potrebleniya kisloroda raznymi tipami gruntov dolinnykh vodokhranilishch v letnii period [On the oxygen demand estimation of different types of bottoms in valley reservoirs during summer]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology]. 2006. No. 10. P. 82–91.

Brekhovskikh V. F., Gashkina N. A., Kremetskaya E. R., Lomova D. V. Osobennosti kislorodnogo rezhima Mozhaiskogo vodokhranilishcha v period ledostava [Oxygen regime peculiarities of the Mozhaisk reservoir during freeze-up]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology]. 2003. No. 1. P. 103–109.

Efremova T. V., Pal'shin N. I., Zdorovenova G. E., Terzhevik A. Yu. Vliyanie ekstremal'no zharkogo leta 2010 g. na temperaturu vody i raspredelenie kisloroda v ozerakh Karelii [Effects of the extremely hot summer 2010 on water temperature and oxygen distribution in the Karelian lakes]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology]. 2015. No. 9. P. 67–76. doi: 10.3103/S106837391509006X

Gavrilenko G. G., Zdorovenova G. E., Zdorovenov R. E., Pal'shin N. I., Terzhevik A. Yu. Termicheskie i kislorodnye rezhimy melkovodnogo ozera na etape letnego nagrevaniya [Thermal and oxygen regimes of a shallow lake during summer heating]. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov* [Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions]. 2014. No. 10(1). P. 414–421.

Kremetskaya E. R. Otsenka skorosti potrebleniya kisloroda v tolshche vody Mozhaiskogo i Ivan'kovskogo vodokhranilishch [Assessment of the oxygen consumption rate in the water column for the Mozhaisk and Ivankovo reservoirs]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2007. Vol. 34, no. 3. P. 310–317.

Litinskaya K. D., Polyakov Yu. K. Ozera Vendyurskoi gruppy – Uros, Rindozero, Vendyurskoe [Lakes of Vendyury 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.

Lozovik P. A. Khimicheskii sostav vzvesi, tverdoi i zhidkoi fraktsii ilov i obmennye protsessy "voda – dno". Izmenenie gidrokhimicheskogo rezhima oz. Suoyarvi [Chemical composition of dredge, solid and liquid fractions of silt and "water-bottom" exchange processes]. *Poverkhnostnye vody ozerno-rechnoi sistemy Shui v usloviyakh antropogennogo vozdeistviya* [Surface Waters of the Lake-River System of Shuya under Human Impact]. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1991. P. 114–118.

Mizandrntsev I. B. Khimicheskie protsessy v donnykh otlozheniyakh vodoemov [Chemical processes in bottom sediments of water reservoirs]. Novosibirsk: Nauka, 1990. 176 p.

Pal'shin N. I. Termicheskie i gidrodinamicheskie protsessy v ozerakh v period ledostava [Thermal and hydrodynamic processes in lakes during freeze-up]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 1999. 86 p.

Pal'shin N. I., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E., Mitrokhov A. V., Petrov M. P., Terzhevik A. Yu. Gidrofizicheskie aspekty razvitiya ekosistemnykh protsessov zamerzayushchikh ozer [Hydrophysical aspects of ecosystem processes development of freezing

lakes]. *Vodnye resursy Evropeiskogo Severa Rossii: itogi i perspektivy issledovaniya: mater. yubil. konf., posvyasch. 15-letiyu IVPS* [Water Res. of the European North of Russia. Research Results and Prospects: Materials of the Anniv. Conf. Dedicated to the 15<sup>th</sup> Anniv. of the NWPI]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2006. P. 359–377.

Pel'sh A. D. O neodnorodnosti zhidkoi fazy ila (gidrokhimicheskaya rol' mikroorganizmov) [On the heterogeneity of a liquid phase of silt (hydrochemical role of microorganisms)]. *Uchenye zapiski LGU* [Proceed. of LSU]. 1939. No. 30, iss. 8. P. 5–46.

Petrov M. P., Terzhevik A. Yu., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E. Osobennosti termicheskoi struktury melkovodnogo ozera v nachale zimy [Thermal structure peculiarities of a shallow lake in early winter]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2006. Vol. 33, no. 2. P. 154–162. doi: 10.1134/S0097807806020035

*Poverkhnostnye vody ozerno-rechnoi sistemy Shui v usloviyakh antropogennogo vozdeistviya* [Surface waters of the lake-river system of Shuya under human impact]. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1991. 212 p.

Romanenko V. I. Mikroflora, fitoplankton i vysshaya vodnaya rastitel'nost' vnutrennykh vodoemov [Microflora, phytoplankton and higher aquatic plants of inland water reservoirs]. Leningrad: Nauka, 1967. 61 p.

Sabylina A. V., Lozovik P. A., Kalmykov M. V. Izmenenie gidrokhimicheskogo rezhima ozera Kroshnozera v rezul'tate antropogennogo vozdeistviya [Change of the hydrochemical regime of Kroshnozera lake as a result of human impact]. Petrozavodsk: Kareliya, 1990. 37 p.

Stravinskaya E. A. Osobennosti gidrokhimicheskogo rezhima oz. Krasnogo [Hydrochemical regime peculiarities of Krasnoe lake]. *Ozera Karelskogo peresheika* [Lakes of the Karelian Isthmus]. Leningrad: Nauka, 1971. P. 129–210.

Terzhevik A. Yu., Pal'shin N. I., Golosov S. D., Zdorovenov R. E., Zdorovenova 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. C. 568–579. doi: 10.1134/S0097807810050064

Golosov S., Maher O. A., Shipunova E., Terzhevik A., Zdorovenova G., Kirillin G. Physical background of the development of oxygen depletion in ice-covered lakes. *Oecologia*. 2007. No. 151. P. 331–340.

Gundersen J. K., Jergensen B. B. Fine-scale in situ measurements of oxygen distribution in marine sediments. *Kieler Meeresforsch. Sonderh.* 1991. 8. P. 376–380.

Lerman A. *Geochemical Processes: Water and Sediment Environments*. N. Y.: Wiley-Interscience. 1979. 481 p.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. Temperature and salt content regimes in three shallow ice-covered lakes: 1. Temperature, salt content, and density structure. *Nordic Hydrol.* 1997a. Vol. 28, no. 2. P. 99–128.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. Temperature and salt content regimes in three shallow ice-covered lakes: 2. Heat and mass fluxes. *Nordic Hydrology*. 1997b. Vol. 28, no. 2. P. 129–152.

*Mortimer C. H.* Chemical exchange between sediment and water in the Great Lakes – speculations on probable regulatory mechanisms. *Limnol. Oceanogr.* 1971. Vol. 16, no. 2. P. 387–404.

*Puklakov V. V., Edelshtein K. K., Kremetskaya E. R., Gashkina N. A.* Water self-purification in Mozhaisk reservoir in winter. *Water Resources.* 2002. Vol. 29, no. 6. P. 655–664.

*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

Received July 21, 2016

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### **Пальшин Николай Иннокентьевич**

старший научный сотрудник лаб. 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

### **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.: 89116660369

### **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

### **Здоровеннов Роман Эдуардович**

ведущий 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.: 89212209438

### **Гавриленко Галина Геннадиевна**

аспирант, 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  
тел.: 89602115561

### **Богданов Сергей Рэмович**

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

## CONTRIBUTORS:

### **Palshin, Nikolai**

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

### **Zdorovennova, Galina**

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

### **Efremova, Tatyana**

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

### **Zdorovennov, Roman**

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

### **Gavrilenko, Galina**

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: south.sun.cr@gmail.com  
tel.: +79602115561

### **Bogdanov, Sergey**

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

**Волков Сергей Юрьевич**

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

**Тержевик 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

**Volkov, Sergey**

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

**Terzhevik, Arkady**

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: ark1948@list.ru  
tel.: +79217267356