

Гавриленко Г. Г.,
Здоровеннова Г. Э.,
Здоровеннов Р. Э.,
Пальшин Н. И.,
Тержевик А. Ю.

Термический и кислородный режимы мелководного озера на этапе летнего нагревания

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН,
г. Петрозаводск,
e-mail: south.sun.cr@gmail.com

Аннотация. На основании анализа данных измерений 2008-2011 гг. рассматриваются особенности термического и кислородного режимов небольшого мелководного озера Вендюрского на этапе летнего нагревания. Прослеживается процесс формирования, заглупления и разрушения сезонного термоклина, а также придонной анаэробной зоны в годы с разными синоптическими условиями.

Ключевые слова: термический режим, растворенный кислород, мелководное озеро, термоклин, дефицит кислорода

Введение

Изменение термической структуры мелководного озера во времени определяется поглощением солнечной радиации, обменом теплом на границах водной толщи с атмосферой и грунтом, а также перераспределением тепла течениями и турбулентным перемешиванием [1-3]. Гидродинамические процессы, такие как плотностная циркуляция [4], ветро-волновое перемешивание [5], внутренние волны [6, 7], баротропные и бароклинные сейши [8], турбулентное перемешивание в придонном пограничном слое [9] оказывают существенное влияние на термическую структуру и кислородный режим водоемов в течение года. Обострение или ослабление плотностной стратификации может изменять скорость вертикальной диффузии тепла и растворенных веществ и газов, таких как биогены и кислород [10, 11]. К водоемам с хорошим кислородным режимом относятся те, в которых насыщение составляет 60-120%. Низкое насыщение вод кислородом, как правило, наблюдается в придонных слоях в период летней стратификации и во время зимней стагнации [11, 12]. Уменьшение содержания растворенного кислорода происходит при отсутствии аэрации водной толщи вследствие его потребления бактериопланктоном в процессе разложения органического вещества, а также диффузии в донные отложения. В период открытой воды дефицит кислорода в придонных слоях мелководных озер существует относительно недолго в силу квазипериодического ветрового перемешивания, охватывающего весь столб воды даже при умеренных ветрах [12, 13]. Предлагаемая работа посвящена изучению влияния синоптических условий на мезомасштабную изменчивость термической структуры и кислородного режима мелководного озера на этапе летнего нагревания. Уточнение имеющихся представлений об особенностях термического и кислородного режима водоемов в период открытой воды необходимо для более корректного построения численных моделей [14, 15] и адекватного описания сезонного хода вертикальной термической и кислородной структуры водоема.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования было выбрано оз. Вендюрское, расположенное в южной части Карелии (широта 62°10'-62°20'N, долгота 33°10'-33°20'E) (рис. 1). Озеро относительно небольшое (площадь зеркала 10.4 км², объем вод ~5.5·10⁷ м³) и мелководное (средняя глубина 5.3, максимальная – 13.4 м). Площадь его водосборного бассейна составляет 82.8 км². Котловина озера ледникового происхождения (длина ~7.0, ширина ~1.5-2.0 км) вытянута с запада на восток. В озеро впадает р. Риндозерка и несколько небольших ручьев, вытекает р. Кулапдеги, однако объем их стока невелик. Коэффициент условного водообмена озера 0.4 год⁻¹. Прозрачность воды в оз. Вендюрском по диску Секки составляет 3±0.5 м; озеро можно отнести к мезотрофному типу. Донные отложения представляют собой песок на мелководье (на глубинах не более 2-3 м) и коричневые и темно-коричневые илы в глубоководной части озера. Толщина слоя илов достигает 0.4-1.0 м [16].

В период с июля 2007 до июня 2013 гг. на оз. Вендюрском проводилось круглогодичное измерение температуры воды и содержания растворенного кислорода на 2-3 станциях. Автономные буйковые станции – косы, оснащенные высокочувствительными датчиками давления, растворенного кислорода и температуры производства канадской фирмы «RBR Ltd» – были размещены в центральной глубоководной части озера на глубине около 11 м, на восточном склоне на глубине порядка 7 м и в локальном углублении дна в 300 м от северного берега озера на глубине около 7.5 м (рис. 1).

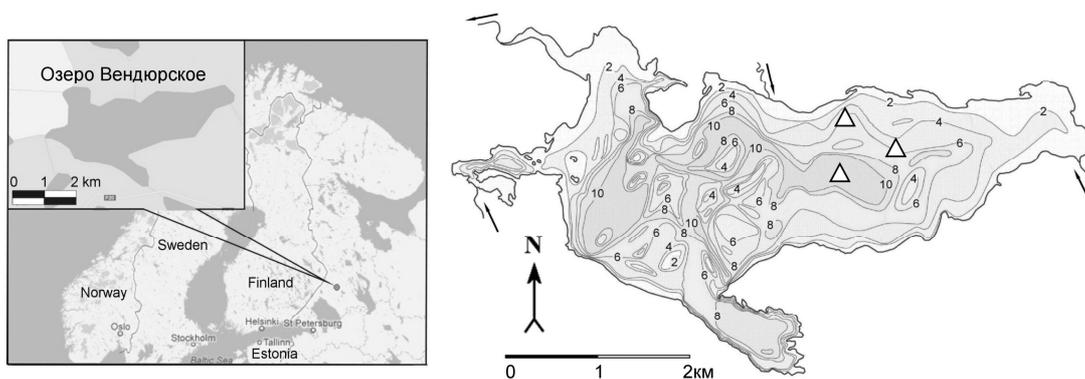


Рис. 1. Географическое положение озера Вендюрского (слева), батиметрия озера и расположение станций измерений (треугольники) (справа).

Сведения об используемых приборах с указанием измеряемых параметров, диапазона измерений, точности, разрешающей способности приведены в таблице. Коса представляла собой фал с прикрепленными к нему через 0.5-2 м в водной толще и через 2-20 см в придонном слое датчиками. В целях сохранности приборов верхний датчик, расположенный под шаром с положительной плавучестью, обычно находился на глубине 1.5-2.5 м. Косы находились в озере непрерывно в течение года. Временной интервал измерений составлял одну минуту. В июне и октябре косы извлекались из озера на 2-4 дня для снятия данных, калибровки и перезарядки датчиков, после чего помещались на прежнее место. Местоположение станций определялось с помощью GPS с точностью ± 20 м по горизонтали. В настоящем исследовании использовались данные, полученные в 2008-2011 гг. период с момента начала разрушения льда (начало-середина мая) до начала осеннего охлаждения озера (середина августа). В анализе синоптических условий района исследований использовались данные по одной из наиболее близко расположенных к оз. Вендюрскому метеостанций Федеральной службы РФ по гидрометеорологии и мониторингу природной среды – ГМС «Петрозаводск» (<http://www.gismeteo.ru>). Данные по среднемесячным климатическим значениям приземной температуры за реперный период 1961-1990 гг. для станции Петрозаводск были получены на сайте Северо-Евразийского Климатического Центра (<http://seakc.meteoinfo.ru/actuals>).

Таблица 1.
Характеристики приборов с указанием измеряемых параметров, диапазона измерений, точности и разрешающей способности

Прибор	Параметр	Диапазон	Точность	Разрешение
TR-1060	Температура	-5...+ 35°C	± 0.002 °C	<0.00005 °C
TDR-2050	Давление	100дБ	$\pm 0.05\%$	<0.001%
	Температура	-5...+ 35°C	± 0.002 °C	<0.00005°C
DO-1050	Содержание РК	0...150%	$\pm 1\%$	-

Результаты и обсуждение

Климатические особенности района исследований.

Климат района исследований – умеренно-континентальный с чертами морского, с продолжительной, относительно мягкой зимой и коротким прохладным летом. Среднегодовая температура воздуха $+3$ - $+4$ °, продолжительность безморозного периода – 120-130 дней. Погода в течение года неустойчивая, что связано с частыми циклонами, идущими с запада. Больше половины дней в году – пасмурные. Годовая сумма осадков – 650-750 мм. Изменчивость температуры и относительной влажности воздуха имеет ярко выраженный сезонный ход. Максимум температуры воздуха ($+25$ - $+30$ °C) приходится на июль, минимум (-25 - -30 °C) – на январь-февраль. Хорошо выражен весенне-летний рост температур (с конца марта до начала июля) и осеннее уменьшение (с середины августа до ноября-декабря). Зимой нередко наблюдаются оттепели, весной, а иногда и летом – заморозки. С сентября до марта относительная влажность составляет 80-90%, с конца марта-начала апреля ее значения понижаются, и годовой минимум наблюдается в мае (около 50%), в летние месяцы ее значения повышаются до 70-90%. Скорость ветра в среднем за год составляет около 2.5 м·с⁻¹. Наиболее сильные ветры (более 6 м·с⁻¹) наблюдаются в осенне-зимние месяцы. Осенью преобладают западные и юго-западные ветры, с мая по июль – восточные. Атмосферное давление в течение года изменяется в пределах от 950 до 1050 мбар и имеет сильно флуктуирующий характер.

Синоптические условия мая-августа 2008-2011 гг.

Лето 2008 г. было самым холодным за исследованный период: среднемесячная температура мая-августа была ниже климатической нормы на 0.5-1.5°C (реперный период 1961-1990 гг.). Средняя скорость ветра в мае-августе составила 2.5 м·с⁻¹, наиболее ветреным был май (среднемесячная скорость ветра 2.7 м·с⁻¹), наименее ветреным – июль (2.2 м·с⁻¹). Лето 2009 г. было близким к климатической норме, средняя температура мая была выше на 2°C, июня – ниже на 1 °C, а июля и августа – близка к норме. Среднемесячная скорость ветра постепенно уменьшалась с 3 м·с⁻¹ в мае до 1.9 м·с⁻¹ в августе. Лето 2010 г. было наиболее жарким и наименее ветреным за исследованные годы. Май 2010 г. был на 3°C теплее, а июнь – близок к климатической норме. Среднемесячная температура июля и августа превышала климатическую норму более чем на 5 и 2°C, соответственно. Средняя за месяц скорость ветра понижалась от 2.6 м·с⁻¹ в мае до 2.1 м·с⁻¹ в августе. Лето 2011 г. было также достаточно теплым, температура мая-июля была выше на 1-4°C, а августа – близка к норме. Среднемесячные скорости ветра в мае и августе составляли 2.8 и 2.6 м·с⁻¹, соответственно, в июне и июле – не превышали 2.2 м·с⁻¹.

Характерными чертами мая-июля во все годы исследований были периодические резкие похолодания – температура воздуха понижалась на 5-15°C в течение 2-5 дней, а также непродолжительные (не более 2-3 суток) усиления скоростей ветра до 5-6 м·с⁻¹ (рис. 2).

Описанные синоптические условия района исследований в 2008-2011 гг. определили особенности кислородного и термического режимов озера Вендюрского на этапе летнего нагревания.

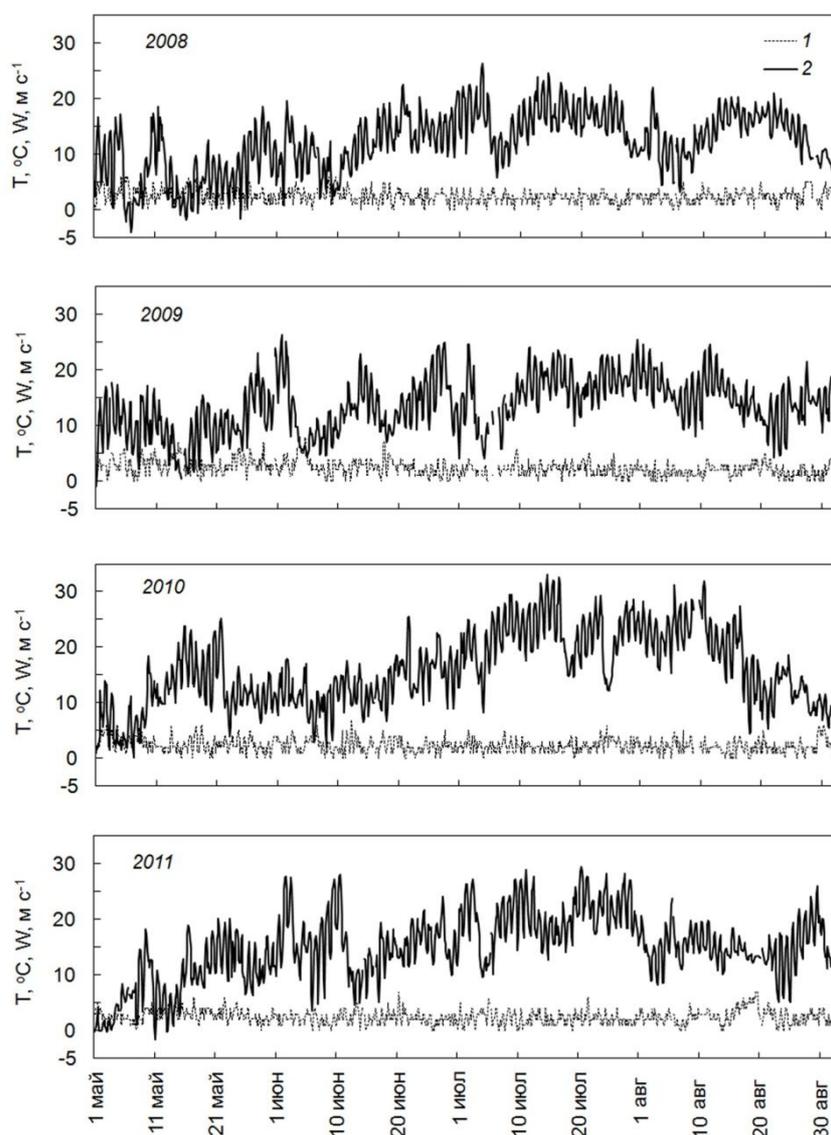


Рис. 2. Скорость ветра (1) и температура воздуха (2) на ГМС «Петрозаводск» в период с 1 мая по 31 августа в 2008-2011 гг.

Температура водной толщи.

Взлом ледового покрова озера Вендюрского происходит обычно в первой половине мая [17]. В годы исследований ледостав заканчивался 10 мая в 2008 г., 8 мая в 2009 г. и 1 мая в 2010 и 2011 гг.

После вскрытия ледового покрова водная масса озера некоторое время (порядка 2-3 недель) находилась в состоянии, близком к гомотермии (рис. 3). В течение мая по мере радиационного прогрева температура поверхностных слоев водной массы озера увеличивалась. Однако, поскольку в этот период нередко заморозки, усиления ветра, резкие похолодания продолжительностью в несколько дней, способствующие развитию конвективно-ветрового перемешивания и передаче тепла к нижележащим слоям, то термическая стратификация озера была слабо выражена. В 2008, 2009 и 2011 гг. к концу мая средняя по вертикали температура повысилась до 8-11°C. В середине мая 2010 г., на фоне жаркой маловетренной погоды поверхностные слои водной массы озера прогрелись до 17-18°C. На глубинах 2-4 м сформировался хорошо выраженный термоклин, градиент температуры в котором достигал $3^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^{-1}$. Передача тепла к нижележащим слоям водной массы озера была затруднена, поэтому придонная температура в конце мая 2010 г. не превышала 7-8°C.

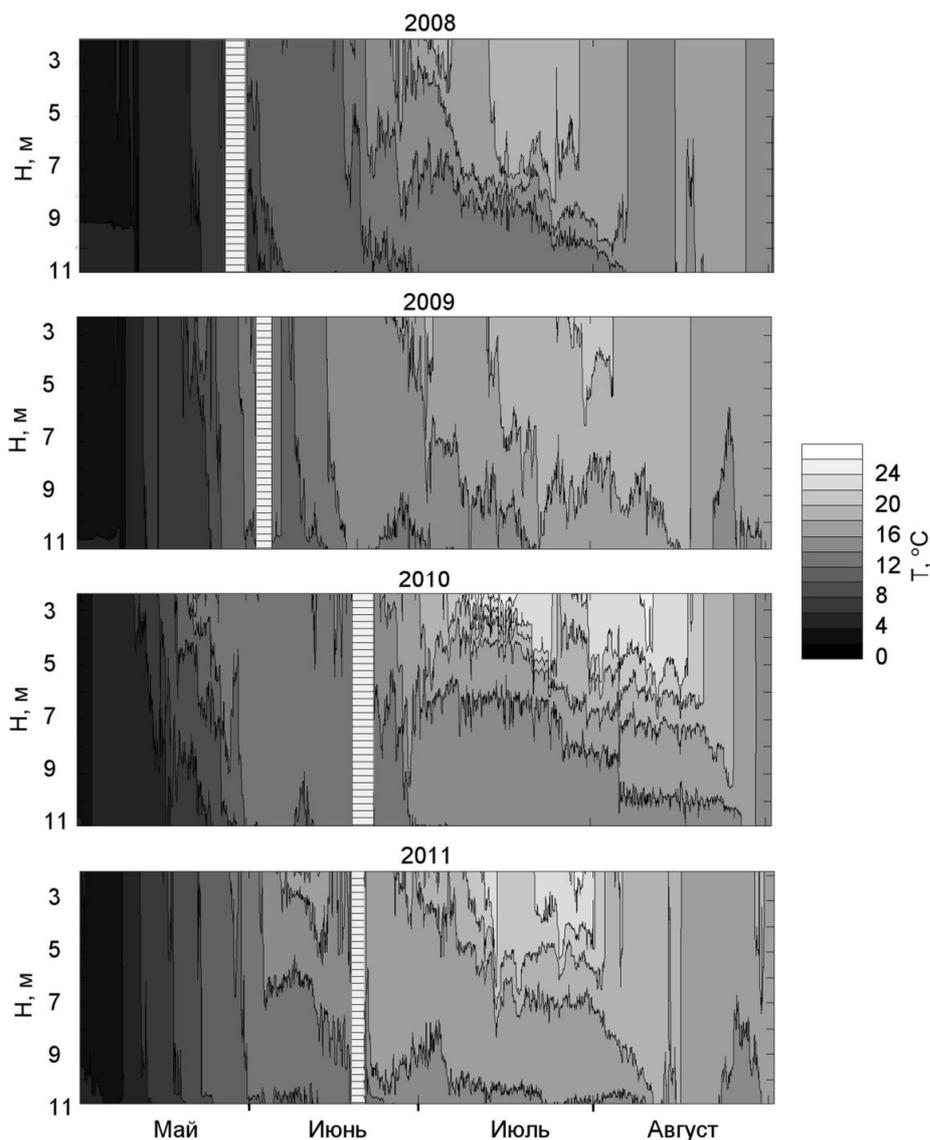


Рис. 3. Изменение температуры воды в глубоководной части озера Вендюрского в период с 1 мая по 31 августа в 2008-2011 гг. Здесь и на рис. 3 заштрихованные области – нет измерений.

Поскольку в июне во все годы исследований погода была неустойчивой, с периодическими похолоданиями и усилениями ветра, водная масса озера находилась в состоянии слабовыраженной стратификации, периодически сменяющейся гомотермией при похолоданиях. Если появлялся термоклин, то он быстро заглублялся и разрушался. Однако на фоне жаркой маловетренной погоды мог сформироваться устойчивый подповерхностный термоклин, как, например, в первых числах июня 2011 г., когда в течение недели на глубинах 2-3 м градиент температуры превышал $1.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^{-1}$.

В июле-первой половине августа продолжалось повышение температуры водной толщи озера. В этот период достигался годовой максимум температуры поверхности ($20-25^{\circ}\text{C}$). Если преобладающая погода в июле была прохладной и ветреной, формирования устойчивого термоклина не наблюдалось, и водная масса озера периодически оказывалась перемешанной до дна, как, например,

в 2009 г. При этом происходила интенсивная передача тепла к придонным слоям воды и верхнему слою донных отложений озера. К началу августа в этот год температура придонных слоев повысилась до 17-18°C.

Если преобладающая погода июля была жаркой и маловетреной, то формировался ярко выраженный термоклин с градиентом температуры в несколько градусов на метр. Например, в середине июля 2010 г. градиент температуры в слое 3-5 м под поверхностью достигал 5°C·м⁻¹. Поскольку термоклин препятствует передаче тепла от поверхности, придонная температура меняется слабо. К началу августа 2008, 2010 и 2011 гг. придонная температура повысилась лишь до 14-15°C.

Постепенно под действием периодических похолоданий и ветрового перемешивания увеличивалась толщина верхнего перемешанного слоя (ВПС). В заглублиение и динамику ВПС также вносит вклад сдвиг скорости на границе с термоклином, генерируемый волновыми движениями [18]. В 2008 и 2011 гг. термоклин достиг дна и полностью разрушился в первых числах августа. Летом 2010 г. термоклин просуществовал в озере до второй половины августа. К середине августа он опустился до глубин 5-7 м, градиент температуры в нем составлял 3-4°C·м⁻¹. Достиг дна и разрушился термоклин лишь после 23 августа.

Во все годы исследований на этапе летнего нагревания в поле температуры регистрировались периодические флуктуации. Наиболее ярко они проявлялись на термоклине, однако отмечались и в нижележащих слоях. Наиболее отчетливо внутренние волны амплитудой до 3-4 м с близким к суткам периодом проявлялись на термоклине в июле и начале августа 2010 г.

Содержание растворенного кислорода.

После очищения ото льда происходило полное перемешивание озерной водной массы, включая придонные слои в глубоководной части озера, и разрушение придонной анаэробной зоны, которая формируется к середине зимы и сохраняется вплоть до разрушения льда [11]. В годы исследований после взлома льда концентрация кислорода в водной толще увеличивалась до 10-11.5 мг·л⁻¹ (рис. 4), насыщение достигало 80-90%. В мае по мере повышения температуры воды насыщение увеличивалось до 100% при мало меняющихся средних значениях концентрации. В июне концентрация кислорода постепенно уменьшалась до 9 мг·л⁻¹ (насыщение 90-100%). В мае-июне при быстром росте температуры воды насыщение кислорода в светлое время суток в верхнем слое водной массы превышало 100% (103-106% – 23-30 мая 2009 г., 105-113% – 15-22 мая 2010 г.). В то же время, в моменты установления кратковременной термической стратификации при маловетреной погоде была отмечена общая тенденция снижения концентрации кислорода по всей водной толще. Это, вероятно, происходило вследствие преобладания биохимического потребления кислорода над его выделением в результате фотосинтеза в условиях ослабления аэрации водоема. В мае-июне пониженные концентрации кислорода (5-7 мг·л⁻¹) отмечались в метровом придонном слое в глубоководной части озера. К началу июля на фоне повышения температуры воды поверхностного слоя до 15-20°C концентрации РК в нем снижались до 8-9 мг·л⁻¹ (при насыщении 80-100%). К концу июля-началу августа концентрация кислорода уменьшалась до 7-8 мг·л⁻¹ (80-90%). При резком повышении температуры в верхнем слое насыщение увеличивалось до 100%.

В центральной глубоководной части озера в периоды обострения термоклина концентрация кислорода понижалась до 3 мг·л⁻¹ (~30%) на горизонтах 2-3-м над дном, а в придонном слое толщиной 0.5-0.7 м опускалась ниже 1 мг·л⁻¹. К концу периода летнего нагревания озера (конец июля-начало августа) толщина слоя с резко выраженным дефицитом кислорода (менее 2 мг·л⁻¹) в центральной глубоководной части озера достигала 0.5-1 м, а в отдельные годы на фоне жаркой безветренной погоды была более 2-3 м (2010 и 2011 гг.).

Наиболее драматическая ситуация наблюдалась в озере летом 2010 г.: в период с 1 по 20 августа в трехметровом придонном слое центральной глубоководной котловины концентрация кислорода не превышала 2.0 мг·л⁻¹, а в полуметровом - была менее 0.5 мг·л⁻¹. К концу июля-началу августа 2010 г. дефицит кислорода отмечался также в придонных слоях локального углубления дна у северного берега и на склоновой станции на глубине, близкой к средней по озеру. Толщина придонного слоя с концентрацией кислорода менее 2 мг·л⁻¹ в локальном углублении дна во второй декаде августа 2010 г. достигала метра, на склоновой станции в этот же период составляла несколько десятков см. В конце июля 2011 г. ситуация была несколько лучше – толщина слоя с концентрацией кислорода менее 2 мг·л⁻¹ в локальном углублении дна не превышала 0.3-0.4 м, на склоновой станции концентрация кислорода в придонном слое 0.2-0.25 м составляла 3-4 мг·л⁻¹.

По мере заглублиения сезонного термоклина выравнивалось содержание растворенного кислорода в ВПС, однако только после полного перемешивания водной массы озера (середина августа) происходило окончательное разрушение придонных зон с резко выраженным дефицитом кислорода.

Во все годы исследований в мае-августе в поверхностных слоях озера регистрировались колебания содержания кислорода амплитудой 5-10% с периодичностью 1-6 суток. При отсутствии или слабой термической стратификации эта изменчивость отмечалась не только в поверхностных слоях, но и по всей водной толще. Изменение насыщения в течение суток было связано как с изменчивостью температуры воды, так и с суточным циклом фотосинтеза. Наряду с долгопериодными, отмечались 12-часовые и более высокочастотные колебания, амплитуда которых не превышала 1 мг·л⁻¹.

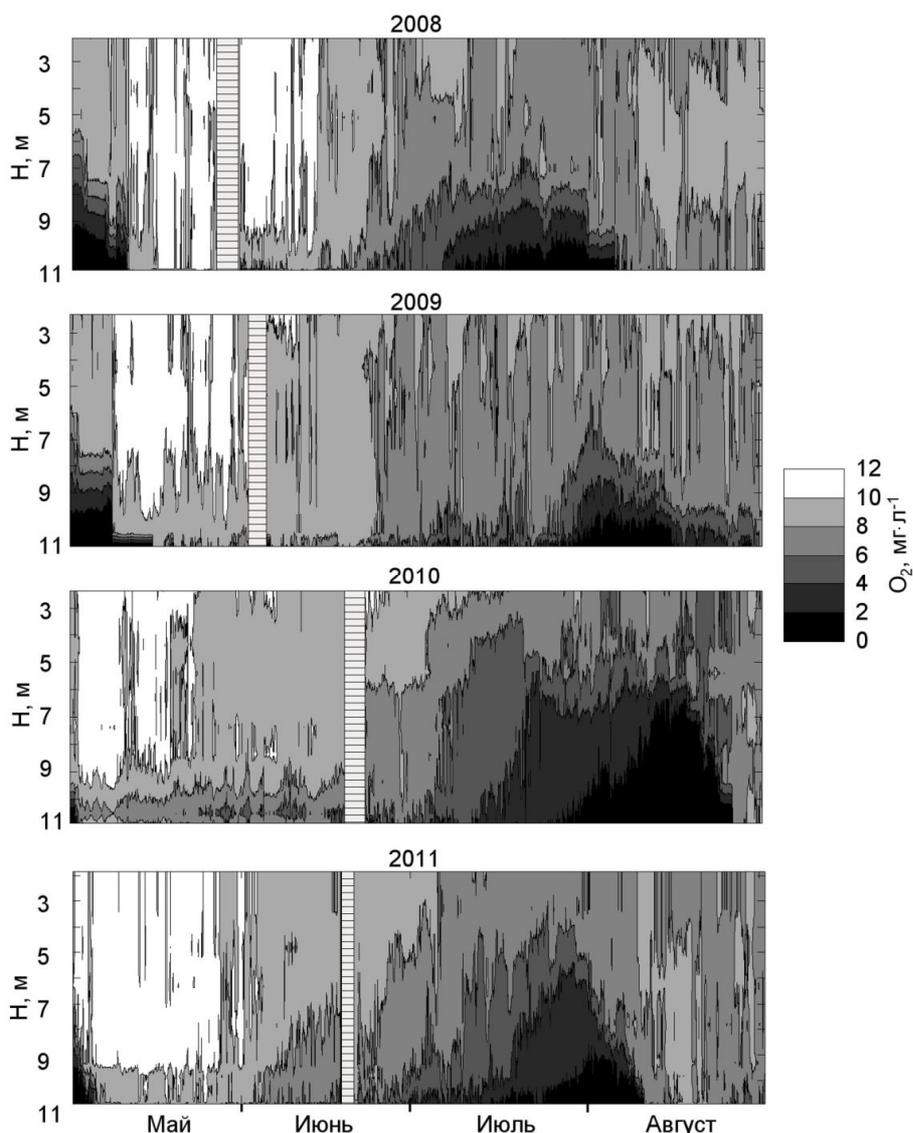


Рис. 4. Изменение содержания растворенного кислорода в глубоководной части озера Вендюрского в период с 1 мая по 31 августа в 2008-2011 гг.

Таким образом, влияние синоптических условий на термодинамику и кислородный режим оз. Вендюрского в период открытой воды существенно. Наиболее благоприятный кислородный режим складывается в озере в прохладные или близкие к климатической норме годы, характеризующиеся неустойчивой погодой с частыми похолоданиями, усилениями ветра. В такие годы термическая стратификация остается слабо выраженной на протяжении всего лета, что способствует аэрации придонных слоев водной массы озера. Дефицит кислорода если и появляется в придонных слоях центральной котловины, то существует недолго. Неблагоприятный кислородный режим характерен для теплых и жарких лет. В такие годы при продолжительной жаркой безветренной погоде в озере формируется устойчивый термоклин, препятствующий аэрации водной толщи и передаче тепла от поверхности к ее нижележащим слоям. При обострении термоклина концентрация кислорода понижается до $1-3 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ ($\sim 30\%$) в придонных слоях. К середине августа толщина слоя с резким дефицитом кислорода в центральной котловине может достигать 2-3 м. Заглубление и разрушение сезонного термоклина в конце периода летнего нагревания озера в такие годы приводит к полному перемешиванию водной массы. При этом скачкообразно повышается температура верхнего слоя донных отложений и происходит насыщение кислородом придонных слоев.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 13-05-00338).

Литература

1. Hutchinson G. A treatise on limnology / Hutchinson G. – N.Y.: V I. J. Wiley and Son, Inc. 1957. 1015 p.
2. Форш Л. Ф. Термический режим, тепловой баланс озер и роль иловой толщи в их тепловом бюджете / Л. Ф. Форш // Озера различных ландшафтов Северо-Запада СССР. Ч. 1. Л.: Наука, 1968. С. 166–208.

3. Кузьменко Л. Г. Структура сезонных термических состояний озер / Л. Г. Кузьменко // Особенности формирования качества воды в разнотипных озерах Карельского перешейка. Л.: Наука, 1984. С. 45–60.
4. Тернер Д. Эффекты плавучести в жидкостях / Д. Тернер. – М.: Мир, 1977. 431 с.
5. Farmer D. M. Wind mixing and restratification in a lake near the temperature of maximum density / D. M. Farmer, E. Carmack // J. Phys. Oceanogr. – 1981. – V. 11. – P. 1516–1533.
6. Boegman L. High-frequency internal waves in large stratified lakes / L. Boegman, J. Imberger, G. N. Ivey, J. P. Antenucci // Limnol. Oceanogr. 2003. V. 48. №2. P. 895–919.
7. Farmer D. F. Observation of long nonlinear waves in a lake / D. F. Farmer // J. Phys. Oceanogr. 1978. V. 8. P. 63–73.
8. Сейши на озерах СССР / Н. М. Арсеньева, Л. К. Давыдов, Л. Н. Дубровина, Н. Г. Конкина – Л.: Изд-во ЛГУ, 1963. 184 с.
9. Lorke A. Shear-induced convective mixing in bottom boundary layers on slopes / A. Lorke, F. Peeters, A. Wuest // Limnol. Oceanogr. 2005. V. 50. P. 1612–1619.
10. Physical background of the development of oxygen depletion in ice-covered lakes / S. Golosov, O. A. Maher, E. Schipunova, et al. // Oecologia. 2007. V. 151. P. 331–340.
11. Гидрофизические аспекты формирования кислородного режима мелководного озера, покрытого льдом / А. Ю. Тержевик, Н. И. Пальшин, С. Д. Голосов, и др. // Водные ресурсы. 2010. Т. 37. №5. С. 568–579.
12. Ульянова Д. С. Кислородный режим озер / Д. С. Ульянова // Особенности формирования качества воды в разнотипных озерах Карельского перешейка. Л.: Наука, 1984. С. 91–95.
13. Сабылина А. В. Абиотические факторы среды, первичная продукция и деструкция органического вещества в водоемах Карелии / А. В. Сабылина, М. И. Басов // Гидроэкологические проблемы Карелии и использование водных ресурсов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. С. 72–91.
14. Параметризованная модель сезонной эволюции теплового режима и режима перемешивания в водоеме / Д. В. Миронов, С. Д. Голосов, С. С. Зилитинкевич, и др. // Гидротермодинамическое взаимодействие озера с атмосферой. Л.: Наука, 1990. С. 87–105.
15. Gu R. Year-round temperature simulation of cold climate lakes / R. Gu, H. G. Stefan // Cold Reg. Sci. Technol. 1990. V. 18. P. 147–160.
16. Литинская К. Д. Озера Вендюрской группы – Урос, Риндозеро, Вендюрское / К. Д. Литинская, Ю. К. Поляков // Водные ресурсы Карелии и их использование. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1975. С. 57–66.
17. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake / R. Zdorovenov, N. Palshin, G. Zdorovenova, et al // Estonian Journal of Earth Sciences. 2013. 61(1). P. 26–32
18. Sherman F. S. Turbulence and mixing in stably stratified waters / F. S. Sherman, I. Imberger, G. M. Corcos // Annu. Rev. Fluid. Mech. 1978. V. 10. P. 267–288.

Анотація Г. Г. Гавриленко, Г. Е. Здорovenнова, Р. Е. Здорovenнов, Н. І. Пальшін, А. Ю. Тержевiк **Термiчний i кисневий режими мiлководного озера на етапi рiчного нагрiвання.** На пiдставi аналізу даних вимiрювань 2008-2011 рр.. розглядаються особливостi термiчного та кисневого режимiв невеликого мiлководного озера Вендюрського на етапi рiчного нагрiвання. Простежується процес формування, заглиблення i раз-рушення сезонного термоклiна, а також придоннiй анаеробної зони в роки з рiзними синоптичними умовами.

Ключові слова: термiчний режим, розчинений кисень, мiлководне озеро, термоклiн, дефiцит кисню.

Abstract. G. G. Gavrilenko, G. E. Zdorovennova, R. E. Zdorovennov, N. I. Palshin, A. Y. Terzhevik **Thermal and oxygen regimes of shallow lake at the stage of summer heating.** Based on analysis of measured data region 2008-2011. discusses the features of thermal and oxygen regime of a small shallow lake Vendyurskogo step summer heat. Traced the process of formation, penetration and time violations seasonal thermocline and the bottom of the anaerobic zone during different synoptic conditions.

Keywords: thermal regime, dissolved oxygen, shallow lake, thermocline, oxygen deficiency

Поступила в редакцию 08.02.2014 г.