

УДК 556.551:556.114.6:546.21

Г. Г. Гавриленко¹
Г. Э. Здравеннова²
С. Ю. Волков³
С. Р. Богданов⁴
Р. Э. Здравеннов⁵

***Устойчивость водной массы и ее
влияние на кислородный режим
полимиктического озера***

^{1,2,3,4,5} Институт водных проблем Севера – обособленное подразделение ФГБУ науки ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук»
Петрозаводск, пр. А. Невского, д. 50, тел.: +7 (814-2) 57-63-81, факс: +7 (814-2) 57-84-64
e-mail: ¹gg.gavrylenko@gmail.com,
²zdrovennova@gmail.com, ³taranarmo@gmail.com,
⁴Sergey.R.Bogdanov@mail.ru, ⁵romga74@gmail.com

Аннотация. В статье приводятся результаты анализа данных непрерывных многолетних измерений температуры и растворенного кислорода в полимиктическом озере. Оценены периоды летней стратификации и придонной аноксии в озере в разные по погодным условиям годы. Для количественной оценки устойчивости водной массы использованы индексы устойчивости Шмидта (*St*) и *Lake Number (Ln)*. Показано, что устойчивость водного столба отличается в разные по погодным условиям годы, что отражается на кислородном режиме озера.

Ключевые слова: мелководное озеро, температура, режим перемешивания, стратификация, устойчивость Шмидта, *Lake Number*, растворенный кислород, региональный климат.

Введение

Термодинамика озер играет важнейшую роль в функционировании их экосистем. Температура и режим перемешивания определяют интенсивность биохимических процессов, жизненные циклы гидробионтов. В частности, в работе [28] на примере озера Эркен (Швеция) показано, что стабильность водной толщи озера является одним из ведущих факторов, определяющих состав планктонного сообщества на разных этапах периода открытой воды. Термическая стратификация заметно снижает вертикальные потоки вещества и энергии, приводя к отчетливо выраженному контрасту свойств вод эпи- и гипolimниона. Ограниченная аэрация гипolimниона создает предпосылки для появления придонного дефицита кислорода и накопления парниковых газов [10]. Наибольшая опасность развития придонной аноксии существует в высокотрофных димиктических озерах, в которых полное перемешивание водной толщи происходит лишь дважды в год – весной и осенью, а период летней стратификации продолжается несколько месяцев [19].

Данные натурных измерений показывают, что в последние десятилетия под влиянием изменений климата наблюдаются существенные сдвиги в термическом и динамическом режимах водоемов умеренной зоны: изменяются сроки ледовых явлений [9], режим перемешивания [8], продолжительность основных периодов

термического цикла [7]. Происходящие на фоне изменений климата рост поверхностной температуры озер [21], увеличение продолжительности летней стратификации и усиление придонной аноксии [12, 15] закономерно отражаются на условиях жизни гидробионтов [24]. В озерах происходят заметные сдвиги в пищевых цепях, в частности выявлено нарушение трофических связей в озере Вашингтон (США) между фито- и зоопланктоном из-за различной чувствительности видов к весеннему потеплению [27], в составе рыбного сообщества озер Карелии отмечен рост более теплолюбивых видов [2]. Подобные изменения в трофических цепях со временем могут привести к заметным экосистемным перестройкам, что определяет актуальность изучения термического и динамического режимов водоемов на фоне изменчивости регионального климата.

При изучении отклика озер на климатические изменения широко используется оценка продолжительности летней стратификации, а также тенденций дат ее начала и окончания. Однако, как отмечено в работе [11], для адекватного сопоставления данных разных исследований требуются единые критерии определения продолжительности летней стратификации. Обычно для установления дат наступления или окончания стратификации используются пороговые значения индексов устойчивости [11, 27] или достижение определенной разницы поверхностных и придонных температур [25].

Авторы работы [11] отмечают, что существенным недостатком большинства проводимых исследований динамического режима озер является их эпизодичность, так как дискретные измерения, еженедельные или квартальные, не позволяют точно определять продолжительность летней стратификации и, следовательно, адекватно анализировать ее межгодовую изменчивость для выявления влияния климатических изменений. Авторы показывают, что среднее отличие оценки продолжительности стратификации при использовании недельных и 15-минутных данных измерений достигает 15.8 суток. В работе [25] подчеркнута, что требования к непрерывности рядов измерений наиболее важны в отношении полимиктических озер, в которых стратификация существует на относительно коротких временных масштабах.

В этой работе мы приводим результаты анализа многолетних круглогодичных непрерывных измерений температуры и содержания растворенного кислорода в небольшом полимиктическом озере Вендюрском (юг Карелии) в период открытой воды. Мы использовали данные измерений температуры с минутной дискретностью, что позволило нам адекватно оценить межгодовую изменчивость продолжительности стратифицированного периода в полимиктическом озере. Это озеро по морфометрическим особенностям и прозрачности, определяющим режим его перемешивания, является типичным представителем класса мелководных полимиктических озер, широко распространенных на территории Карелии [4]. Цель исследования – изучение режима перемешивания и кислородных условий в полимиктическом озере в разные по погодным условиям годы.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования было выбрано небольшое мезотрофное озеро Вендюрское, расположенное на юге Карелии (62°10–62°20'N, 33°10'–

33°20'Е). Средняя ширина водоема составляет 1,5 км, длина – 7 км, площадь зеркала – 10,4 км², объем вод ~5,5·10⁷ м³, средняя глубина – 5,3 м, максимальная – 13,4 м, площадь водосборного бассейна – 82,8 км². В период открытой воды озеро неоднократно перемешивается [3]. В анализе использовались данные, полученные в ходе круглогодичных непрерывных измерений температуры воды и содержания растворенного кислорода в центральной глубоководной части озера в 2008–2013 и 2015–2016 гг. Данные были получены с помощью высокоточных температурных и кислородных датчиков производства канадской компании RBR Ltd. (точность и разрешающая способность по температуре ± 0,002°С и < 0,00005°С, по кислороду ±1 % соответственно). Коса с датчиками, закрепленными на расстоянии 0,5–2 м друг от друга в водной толще (верхний датчик располагался на глубине 2–2,5 м от поверхности воды) и через 2–20 см в придонном слое, находилась в озере круглогодично, за исключением 2–4 суток в июне и октябре, когда приборы извлекались для снятия данных, калибровки и замены батарей. Интервал измерений составлял одну минуту, что позволило получить непрерывные ряды данных и с высокой точностью оценить продолжительность стратификации и придонной аноксии, а также достоверно проанализировать их межгодовую изменчивость. Некоторые дополнительные сведения об объекте исследований приведены в работах [1, 29], там же рассмотрены основные закономерности формирования кислородного и температурного режимов озера Вендюрского в период открытой воды.

По данным измерений на косе была оценена продолжительность стратификации (разница поверхностных и придонных температур в центральной глубоководной части озера более одного градуса [11, 25]) и придонной аноксии (концентрация растворенного кислорода в придонном слое менее 1 мг/л [20]). Для оценки устойчивости водной массы мы использовали два параметра: устойчивость Шмидта (St), характеризующую устойчивость стратифицированного водного столба к механическому перемешиванию, и Lake Number (Ln) – параметр, использующийся для описания процессов перемешивания внутри водного столба под влиянием ветровой активности [14]. Для расчета St и Ln использовалась программа LakeAnalyzer 2.0, находящаяся в открытом доступе (<http://lakeanalyzer.gleon.org/>) и предназначенная для анализа показателей физического состояния озер [22].

Устойчивость Шмидта характеризует количество работы, необходимое для перемешивания стратифицированного водного столба без теплообмена со средой в расчете на единицу поверхности, и может быть определена по формуле [13]:

$$S_T = \frac{g}{A_s} \int_0^{z_D} (z - z_v) \rho_z A_z dz,$$

где g – ускорение силы тяжести, A_s – площадь поверхности озера, A_z – площадь озера под изобатой z , ρ_z – плотность воды, z_D – максимальная глубина озера, z_v – глубина центра масс озера.

Безразмерный параметр Ln может быть использован как количественный показатель динамической устойчивости и степени турбулентного перемешивания, учитывающий батиметрию водоема; задается этот параметр согласно формуле [14]:

$$L_N = \frac{S_T(z_e + z_h)}{2\rho_h u_*^2 A_s^{0.5} z_v},$$

где z_e и z_h – глубины верхней и нижней границ металимниона соответственно, ρ_h – плотность воды на нижней границе металимниона, u_*^2 – динамическая скорость ветра.

При значении $L_n < 1$ в озерах наблюдается глубокое перемешивание.

Для анализа метеорологических условий района исследований, а также для задания входных метеорологических параметров в программе LakeAnalyzer 2.0 использовались данные по температуре воздуха, скорости и направлению ветра с трехчасовой дискретностью по одной из наиболее близко расположенных к озеру Вендюрскому метеостанций – МС «Петрозаводск», полученные из архива открытого доступа на сайте «Расписание погоды» (gr5.ru).

Результаты

Изменчивость регионального климата.

Климат района исследований умеренно-континентальный с чертами морского. Зима продолжительная и относительно мягкая, лето короткое и прохладное. Погода в течение года неустойчивая, что связано с частыми циклонами, идущими с запада. Наибольшие скорости ветра в районе исследований наблюдаются в холодную половину года, в летние месяцы ветровая активность понижена. В апреле – мае повторяемость ветра более 5 м/с не превышает 5 %, в июне – августе снижается до 1,9 %. Больше половины дней в году – пасмурные. Годовая сумма осадков – 650–750 мм. Погодные условия региона исследований характеризуются тем, что в мае – июле нередки продолжительные похолодания (от 2–3 до 7–10 суток) с резким падением температуры воздуха (в мае – часто до отрицательных значений), обусловленные вторжением арктического воздуха.

Анализ данных станции «Петрозаводск» за 2008–2016 гг. по температуре воздуха показал, что все годы с 2008 по 2016 были теплее климатической нормы (1961–1990 гг.) [3]. При этом наиболее часто теплее нормы оказывались апрель, май, август и сентябрь, а холоднее – июнь и октябрь. Отрицательные отклонения среднемесячной температуры от климатической нормы были отмечены в мае 2008 г., в июне 2008–2010 и 2014 гг., в июле 2008 и 2015 гг., в августе и сентябре 2008 г. Наиболее жарким был май в 2010, 2013 и 2016 гг., когда отклонение температуры воздуха от климатической нормы достигало 2,9, 2,7 и 4,3°C соответственно. Июнь был наиболее жарким в 2011 и 2013 гг. (отклонения от нормы – 2,0 и 3,6°C соответственно), а июль – в 2010 и 2011 гг. (отклонения от нормы – 6,2 и 4,0°C соответственно).

Стратификация и оценки устойчивости водной толщи озера Вендюрского.

Во все годы исследований на фоне неустойчивой погоды в мае водная толща озера находилась в состоянии слабо выраженной стратификации, или гомотермии, за исключением 2010 и 2016 гг., когда теплая маловетренная погода (среднемесячная температура воздуха в мае в эти годы составляла 11,3 и 12,7°C, средняя скорость ветра – 2,6 и 2,4 м/с соответственно) способствовала заметному прогреву поверхностных слоев озера и установлению стратификации (разница температур в поверхностных и придонных слоях достигала 4–5°C) (Рис. 1).

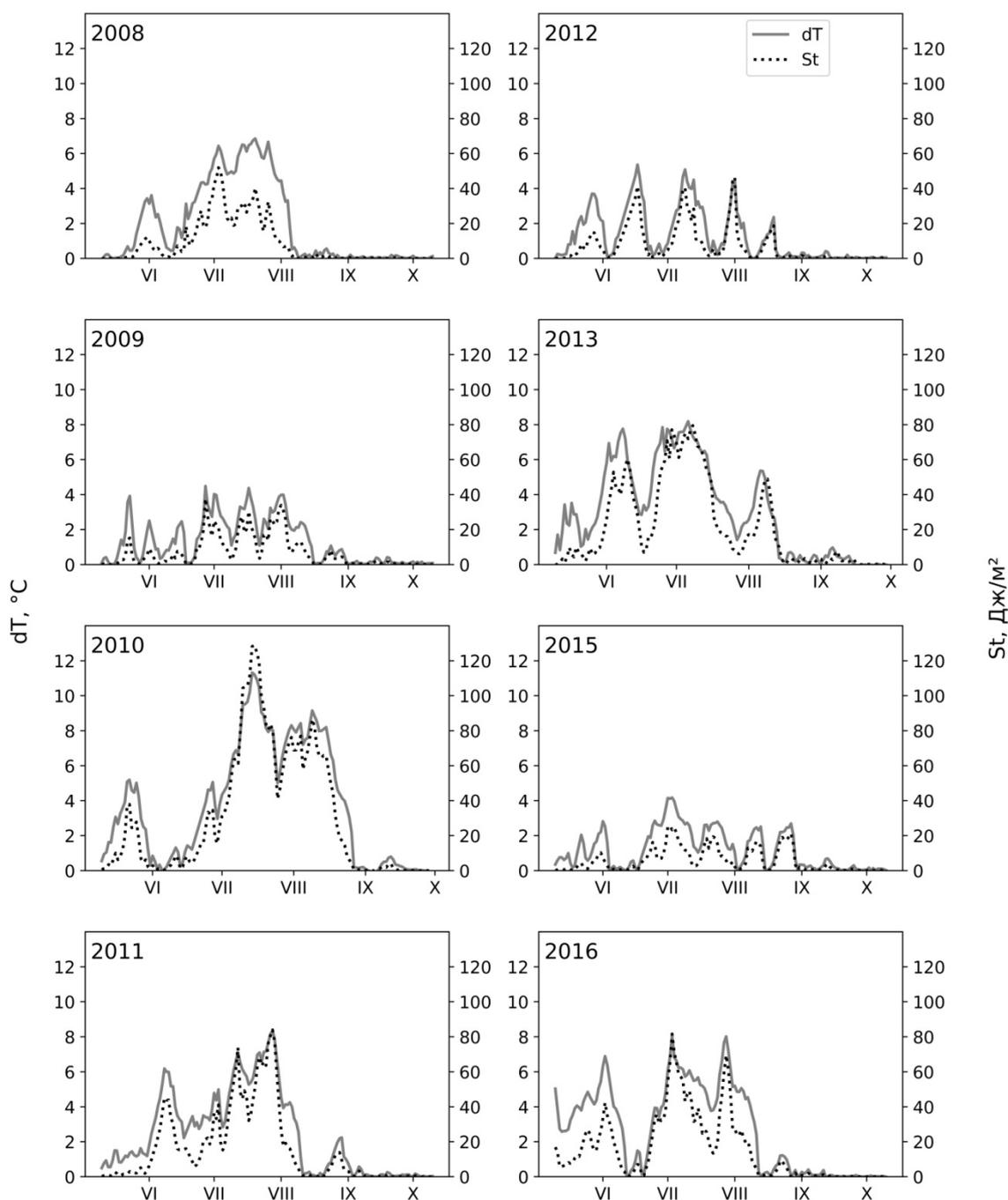


Рис. 1. Разница температур поверхностных и придонных слоев водной толщи озера Вендюрского (dT) и ее устойчивость (St) в период открытой воды в разные годы. Составлено автором

Погодные условия первой половины июня также обычно характеризуются ветреной, прохладной погодой, периодическими резкими похолоданиями, что препятствует установлению стратификации, однако в 2011 и 2013 гг. аномально теплая погода этого периода (средняя температура первой половины июня в эти

годы составляла 15,5 и 15,8°C, максимальная превышала 28°C, средняя скорость ветра – 2,2 и 2,5 м/с соответственно) способствовала установлению выраженной стратификации с разницей температур по водному столбу до 6–8°C.

В июле в годы исследований стратификация водной толщи обычно была хорошо выражена, за исключением 2009, 2012 и 2015 гг., когда на фоне холодной ветреной погоды (средняя температура июля в эти годы составляла 16,2, 17,4 и 14,3°C, частые усиления ветра до 5–6 м/с) разница температур между поверхностными и придонными слоями водоема редко превышала 4°C и периодически снижалась до нуля, то есть стратификация разрушалась и сменялась гомотермией.

В годы исследований в первой половине августа период летней стратификации заканчивался, и в дальнейшем до установления льда озеро охлаждалось в состоянии гомотермии. Однако в 2010 г. на фоне аномально жаркой погоды июля и августа (средняя температура этих месяцев достигала 22,3 и 17,0°C, что выше климатической нормы на 6,2 и 3,0°C соответственно, максимальная превышала 33,2°C и июле и 31,9°C в августе) окончание периода летней стратификации произошло лишь в последних числах августа.

Продолжительность периода, когда разница температуры воды в поверхностных и придонных слоях озера Вендюрского превышала один градус, то есть водная толща была стратифицирована, в годы исследований изменялась от 63 до 96 суток (Таблица).

Устойчивость водной толщи озера Вендюрского характеризовалась значительной межгодовой изменчивостью (Рис. 1). Максимальные за период открытой воды значения St варьировали от 25 Дж/м² в холодные летние месяцы 2015 г. до 128 Дж/м² в жаркие месяцы 2010 г. (Рис. 1) При этом средние за период стратификации значения St изменялись от 5 до 28 Дж/м² в разные годы, а количество дней с $St > 30$ варьировало от нуля (2015 г.) до 55 (2010 г.).

Растворенный кислород в придонных слоях водной толщи озера Вендюрского.

В годы исследований выраженное снижение концентраций растворенного кислорода в придонных слоях водной толщи озера Вендюрского отмечалось начиная с конца мая (Рис. 2). Однако в 2016 г. истощение кислорода в придонных слоях озера началось заметно раньше – с конца первой декады мая – в результате того, что озеро вышло из-под льда устойчиво стратифицированным и полного перемешивания его водной толщи и аэрации придонных слоев после взлома льда не наблюдалось. Затем в течение мая на фоне жаркой безветренной погоды стратификация водной толщи усилилась, что создало предпосылки для быстрого снижения концентраций кислорода в придонных слоях (к концу первой декады июня 2016 г. – до 4–5 мг/л). И лишь полное перемешивание водной толщи озера в середине июня на фоне продолжительного периода холодной ветреной погоды способствовало насыщению кислородом придонных слоев до 8–9 мг/л.

Таблица 1
Характеристики устойчивости водной толщи озера Вендюрского и продолжительность придонной аноксии в период открытой воды в разные по погодным условиям годы.

Год	Средняя температура, °С				dT>1, сут.	St>30, сут.	PK<1, сут.	Ln>1, сут.
	май	июнь	июль	август				
2008	7,5	12,3	16,0	13,3	67	16	12	41
2009	10,4	12,9	16,2	14,6	73	5	8	49
2010	11,3	13,2	22,3	17,0	95	55	26	71
2011	9,2	15,5	20,3	14,9	90	33	12	60
2012	10,1	13,6	17,4	14,3	63	9	2	36
2013	11,1	17,1	16,9	16,4	94	43	25	65
2015	10,4	14,2	14,3	15,5	71	0	0	39
2016	12,7	14,2	18,5	15,3	96	32	27	67

Составлено автором

В годы исследований снижение концентраций растворенного кислорода в придонных слоях центральной котловины озера ниже порогового значения 1 мг/л отмечалось в период с середины июля до первых чисел августа. При ослаблении стратификации или полном перемешивании водной толщи на фоне резких похолоданий и усиления ветра наблюдалось увеличение концентраций растворенного кислорода в придонных слоях озера (см., например, июнь 2016 г., июль 2015 г. на рис. 2). В августе после разрушения летней стратификации и полного перемешивания водной толщи происходило скачкообразное увеличение концентраций растворенного кислорода в придонных слоях озера (синхронное с резким ростом температуры придонных слоев). На этапе осеннего охлаждения концентрация растворенного кислорода по водному столбу выравнивалась, постепенно повышаясь по мере уменьшения температуры воды, в связи с увеличением его растворимости. Наименее продолжительная аноксия отмечалась в озере в течение холодных летних месяцев в 2008, 2009 и 2012 гг., при этом в летние месяцы 2015 г. аноксия в придонных слоях озера вообще не наблюдалась (Рис. 2, Таблица). Наиболее неблагоприятные условия с заметным истощением кислорода и формированием выраженной зоны аноксии в придонных слоях наблюдались на фоне жаркой маловетреной погоды в 2010, 2011, 2013 и 2016 гг. Общее количество дней, когда параметр Ln был выше единицы, в исследуемые годы изменялось от 36 до 71 суток с наибольшими значениями в годы с хорошо выраженной стратификацией (Таблица 1).

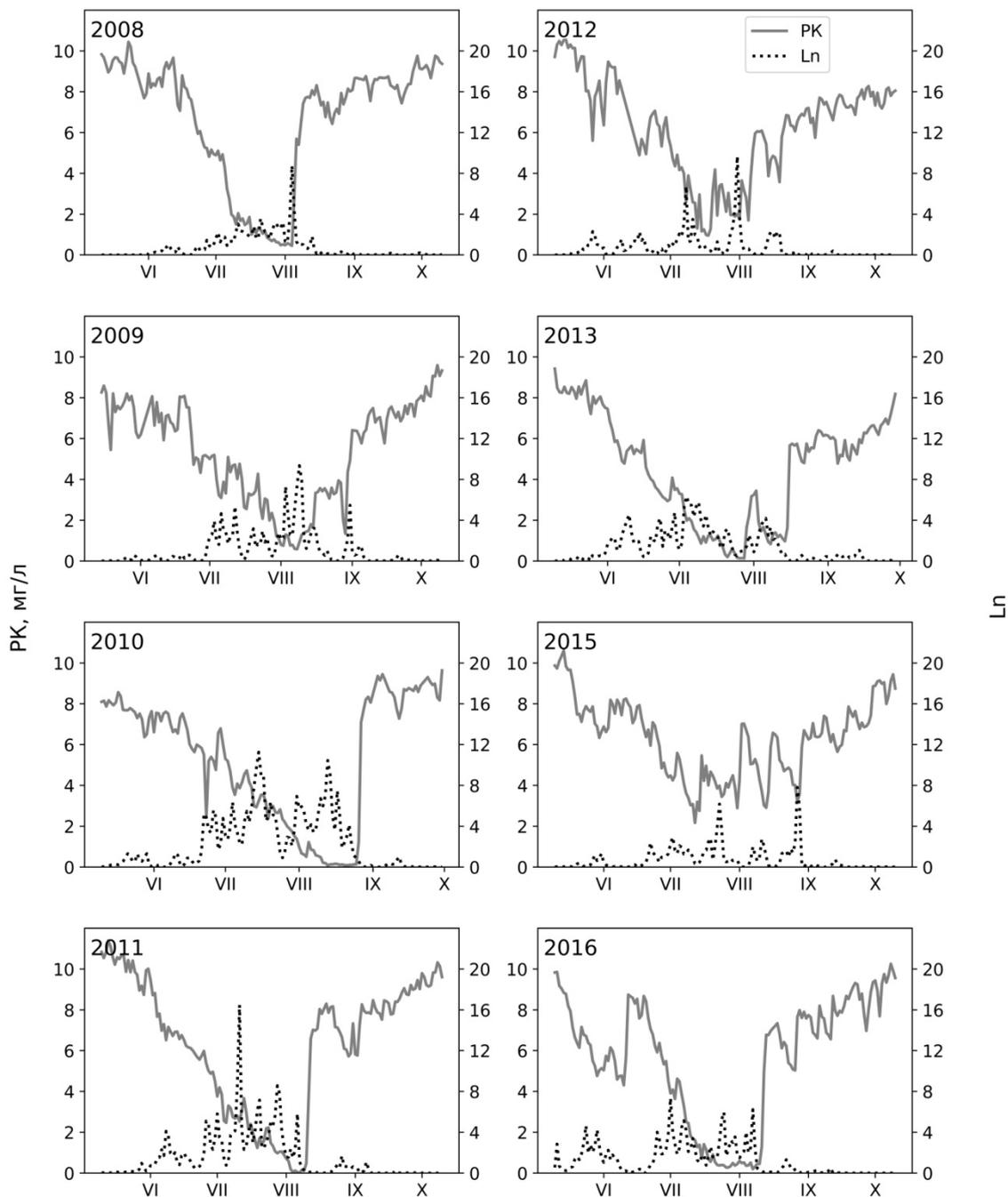


Рис. 2. Концентрация растворенного кислорода (PK) в придонном слое центральной котловины озера Вендюрского и параметр Ln, характеризующий динамическую устойчивость и степень турбулентного перемешивания в период открытой воды в разные годы. *Составлено автором*

Обсуждение

Мы использовали несколько критериев для определения продолжительности летней стратификации и оценки устойчивости водной массы: устойчивость

Шмидта, Lake Number и достижение порогового значения в один градус разницы поверхностных и придонных температур.

В ряде исследований значение устойчивости Шмидта 30 Дж/м^2 рассматривается как пороговое для определения дат установления и окончания летней термической стратификации [11, 25]. Полученные в рамках нашего исследования результаты показывают, что в случае озера Вендюрского разнице придонной и поверхностной температур, равной 1°C (также широко применяемый критерий стратифицированного состояния), соответствуют невысокие величины устойчивости Шмидта (от 1 до 11 Дж/м^2 при среднем значении $3,6 \text{ Дж/м}^2$), а пороговому значению St , равному 30 Дж/м^2 , соответствуют разницы температур от $3,1^\circ\text{C}$ до $7,6^\circ\text{C}$ при среднем $4,9^\circ\text{C}$ (Рис. 1, Таблица 1). Таким образом, использование порогового значения устойчивости Шмидта 30 Дж/м^2 в случае Вендюрского озера заметно уменьшает оценки продолжительности стратификации по сравнению с определением этого периода вторым методом (см. Таблицу 1). Поэтому мы считаем спорным применение предложенного в работах [11, 25] порогового значения устойчивости Шмидта 30 Дж/м^2 для определения стратифицированного периода. Очевидно, что вопрос применимости указанного порогового значения этого критерия на разнотипных водоемах умеренной зоны нуждается в дальнейших исследованиях.

В работе [18] показано, что в условиях холодного, но маловетреного лета возможны формирование выраженного расслоения толщи озера и более высокие значения индекса L_p по сравнению с более теплым летом, когда при непродолжительном усилении скорости ветра происходит снижение поверхностных температур за счет перераспределения тепла по водному столбу и уменьшение величины L_p . Наше исследование позволило обнаружить сходный результат. Мы установили, что холодным летом 2008 г., когда температура воздуха в июне – августе была ниже климатической нормы на $0,1-1,1^\circ\text{C}$ [3], в озере сформировалась стратификация, даже более выраженная и существовавшая дольше, чем в более теплые месяцы 2012 г. (июнь – август теплее климатической нормы на $0,1-1,3^\circ\text{C}$) и 2015 г. (июль холоднее нормы на 18°C , а июнь и август – теплее на $0,7$ и $1,5^\circ\text{C}$ соответственно) (Рис. 1, Таблица 1). Такая ситуация объясняется более спокойной ветровой обстановкой в летние месяцы 2008 г. по сравнению с 2012 и 2015 гг. При близких среднемесячных значениях скорости ветра июня, июля и августа в эти годы (2008 г. – $2,5, 2,2, 2,6 \text{ м/с}$, 2012 г. – $2,3, 2,3, 2,2 \text{ м/с}$, 2015 г. – $3,0, 2,2, 2,5 \text{ м/с}$) количество дней со штилем было наименьшим в 2008 г., а количество дней с усилениями ветра до $5-8 \text{ м/с}$ было заметно большим в 2015 г. В частности, в период с 18 июня по 5 августа 2008 г. скорость ветра не превышала 4 м/с , было зарегистрировано 12 дней со штилем. В 2012 и 2015 гг. за тот же период скорость ветра более 4 м/с отмечалась в течение трех и восьми суток, а штилевые условия – в течение 12 и пяти суток соответственно. Как показано в работе [5], при усилениях ветра до 5 м/с и более и снижении кинематического потока тепла на поверхности до $5 \cdot 10^{-5} \text{ К} \cdot \text{м/с}$ и менее водная толща озера Вендюрского будет перемешана до дна. Таким образом, решающую роль в сохранении стратифицированного состояния озера Вендюрского холодным летом 2008 г. сыграли небольшие скорости ветра, в то время как в течение более теплых и более ветреных летних месяцев 2012 и 2015 гг. водная толща озера была менее устойчива и неоднократно перемешивалась.

Значения параметра L_n тесно связаны с концентрациями кислорода в придонных областях, что подтверждается как данными натурных измерений, так и модельными расчетами, представленными в работе [23], где параметр L_n использовался для определения потока кислорода через термоклин в небольшом озере. Авторы указывают на тесную взаимосвязь высоких значений L_n с низкими концентрациями растворенного кислорода в придонной области. Полученные нами результаты также демонстрируют обратную зависимость указанных параметров (Рис. 2). При этом формирование бескислородной зоны в придонной области озера Вендюрского фиксировалось с интервалом 23–47 суток от момента, когда значение L_n превышало единицу. Авторы работы [23] оценивают этот период в 10 недель для озера Мендота.

Наше исследование показало, что промежуточные перемешивания водной толщи действительно способствуют восстановлению запасов растворенного кислорода в придонных слоях водоема. Сопоставление данных, приведенных на рисунках 1 и 2, позволяет заключить, что каждому эпизоду ослабления стратификации либо полного перемешивания озера соответствовало увеличение концентраций кислорода в придонном слое. В работе [17] обсуждается, что даже непродолжительные эпизоды перемешивания, разрушающие или ослабляющие стратификацию, приводят к увеличению или полному возобновлению запасов кислорода в гипolimнионе. Авторы также подчеркивают, что чувствительность озер к подобным эпизодам определяется степенью выраженности стратификации, которая, в свою очередь, зависит от морфометрических характеристик водоема и оптических свойств водной толщи. Так, в сходных метеорологических условиях озеро с большой площадью поверхности и более прозрачной водой перемешивалось до дна, тогда как небольшое гуминовое озеро демонстрировало высокую стабильность водной толщи.

Во все годы исследований резкий рост концентраций растворенного кислорода в придонных слоях озера Вендюрского происходил в конце стратифицированного периода на фоне полного перемешивания его водной толщи. Авторы работы [11] предлагают использовать сведения о содержании кислорода в придонных слоях в качестве индикатора окончания стратификации, отмечая одновременный рост придонной температуры и резкий рост содержания растворенного кислорода при полном перемешивании водной толщи димиктического озера осенью. Наше исследование показало, что момент резкого роста концентраций растворенного кислорода в придонных слоях озера Вендюрского в конце периода стратификации соответствовал разнице поверхностных и придонных температур 0,1–2,4°C и значениям устойчивости Шмидта 0,6–10,1. Пороговое значение разницы поверхностных и придонных температур в один градус фиксировалось либо в тот же день, либо накануне, либо на следующий день после начала резкого роста концентраций кислорода в придонных слоях. Расхождение не превышало одного дня для всех лет исследований, в то время как пороговое значение устойчивости Шмидта 30 Дж/м² отмечалось в разные годы на 3–14 суток раньше (в среднем на 7,6 суток) начала резкого роста концентраций кислорода в придонных слоях, что является еще одним доводом в пользу утверждения о нецелесообразности использования такого порогового значения индекса для определения продолжительности стратификации.

Заключение

Наше исследование позволило установить выраженную межгодовую изменчивость продолжительности летней стратификации и степени устойчивости водной толщи небольшого полимиктического озера в разные по погодным условиям годы. Было показано, что использование в качестве критерия стратификации порогового значения устойчивости Шмидта 30 Дж/м^2 существенно занижает оценки ее продолжительности по сравнению с методом определения этого периода по достижению разницы в один градус между поверхностными и придонными температурами.

Наше исследование позволило установить, что в наиболее теплые годы наблюдалась наибольшая продолжительность существования стратификации и, как следствие, придонной аноксии, что согласуется с результатами модельных расчетов, прогнозирующих при сохранении современных тенденций изменения климата к концу текущего столетия изменение режима перемешивания на полимиктических водоемах и переход их в разряд димиктических с заметным ухудшением кислородных условий [16]. Однако нами было показано также, что даже в холодные годы продолжительность стратификации может быть больше, чем в теплые на фоне пониженной ветровой нагрузки.

Несмотря на то, что тенденция к повышению поверхностной температуры озер имеет глобальный характер [21], реакция водоемов с разным типом перемешивания на изменения климата зачастую различна [25]. Кроме того, поскольку озера чувствительны к процессам, происходящим на водосборе [26], для адекватной оценки изменений условий функционирования их экосистем необходим учет ряда других действующих факторов, таких как особенности регионального климата, эвтрофикация и т. п. [6], что определяет необходимость дальнейших исследований.

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

Литература

1. Гавриленко Г. Г., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., и др. Термический и кислородный режимы мелководного озера на этапе летнего нагревания // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. № 10 (1). С. 414–421.
2. Георгиев А. П., Назарова Л. Е. Трансформация рыбной части сообщества в пресноводных экосистемах Республики Карелия в условиях изменчивости климата // Экология. 2015. № 4. С. 272–279.
3. Здоровеннова Г. Э., Гавриленко Г. Г., Здоровеннов Р. Э., и др. Эволюция температуры водной толщи бореальных озер на фоне изменений регионального климата // Известия РГО. 2017. Т. 149. № 6. С. 59–74.
4. Тержевик А. Ю., Пальшин Н. И., Голосов С. Д. и др. Гидрофизические аспекты формирования кислородного режима мелководного озера, покрытого льдом // Водные ресурсы. 2010. Т. 37. № 5. С. 568–579.
5. Тержевик А. Ю., Голосов С. Д., Гавриленко Г. Г., и др. Возможное влияние «необычной» весны на режим растворенного кислорода в мелководном озере в

- летний период // Труды КарНЦ РАН. Серия «Лимнология». 2017. № 10. С. 17–27, DOI: 10.17076/lim712.
6. Adrian R., O'Reilly C. M., Zagarese H., et al. Lakes as sentinels of climate change // *Limnology and Oceanography*. 2009. Vol. 54. I. 6. P. 2283-2297. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283.
 7. Arvola L., George G., Livingstone D. et al. The impact of the changing climate on the thermal characteristics of lakes // *The Impact of Climate Change on European Lakes*. 2010. Aquatic Ecology Series. V. 4. P. 85-101. DOI: 10.1007/978-90-481-2945-4_6
 8. Butcher J. B., Nover D., Johnson T. E. et al. Sensitivity of lake thermal and mixing dynamics to climate change. *Climatic Change*. 2015. V. 129 (1-2). P. 295-305. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1326-1>.
 9. Chojiński A., Ptak M., Skowron R., Strzelczak A. Changes in ice phenology on polish lakes from 1961 to 2010 related to location and morphometry // *Limnologica - Ecology and Management of Inland Waters*. 2015. V. 53. P. 42-49, DOI: 10.1016/j.limno.2015.05.005.
 10. Diaz R. J. Overview of hypoxia around the World // *J. Env. Qual*. 2001. V. 30 (2). P. 275-281. DOI: 10.2134/jeq2001.302275x.
 11. Engelhardt C., Kirillin G. Criteria for the onset and breakup of summer lake stratification based on routine temperature measurements// *Fundam.Appl.Limnol*. 2014. V.184 (3). P. 183-194. DOI: 10.1127/1863-9135/2014/0582.
 12. Foley B., Jones I. D., Maberly C. M., Rippey B. Long-term changes in oxygen depletion in a small temperate lake: effects of climate change and eutrophication//*Freshwater Biology*. 2012. V. 57. I.2. P. 278-289. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2011.02662.x.
 13. Idso S. B. On the concept of lake stability // *Limnology and Oceanography*. 1973. V. 18. I. 4. P. 681-683.
 14. Imberger J., Patterson J. C. Physical limnology // *Advances in Applied Mechanics*. 1990. V. 27. P. 303-475. DOI:10.1016/S0065-2156(08)70199-6.
 15. Jankowski T., Livingstone D. M., Buhner H., et al. Consequences of the 2003 European heat wave for lake temperature profiles, thermal stability, and hypolimnetic oxygen depletion: Implications for a warmer world // *Limnology and Oceanography*. 2006. V. 51. I. 2. P. 815–819. DOI: 10.4319/lo.2006.51.2.0815.
 16. Kirillin G. Modelling the impact of global warming on water temperature and seasonal mixing regimes in small temperate lakes // *Bor. Environ. Res*. 2010. V. 15. P. 279–293.
 17. Kuha J., Arvola L., Hanson P. C., et al. Response of boreal lakes to episodic weather-induced events//*Inland Waters*. 2016. V. 6(4). P. 523-534. DOI: 10.1080/IW-6.4.886
 18. McIntyre S., Fram J. P., Kushner P. J., et al. Climate-related variations in mixing dynamics in an Alaskan arctic lake // *Limnology and Oceanography*. 2009. V. 54 I.6 (2). P. 2401-2417. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2401.
 19. Miettinen H., Pumpanen J., Heiskanen J., et al. Towards a more comprehensive understanding of lacustrine greenhouse gas dynamics – two-year measurements of concentrations and fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O in a typical boreal lake surrounded by managed forests // *Boreal Environment Research*. 2015. V20. I.1. P. 75–89.
 20. Nürnberg G. K. Quantifying anoxia in lakes // *Limnology and Oceanography*. 1995. V. 40. I. 6. P. 1100–1111. DOI: 10.4319/lo.1995.40.6.1100.

21. O'Reilly C. M., Sharma S., Gray D. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe// *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. I. 24. P. 10773-10781. DOI:10.1002/2015GL066235.
22. Read J. S., Hamilton D. P., Jones I. D., et al. Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data // *Environmental Modelling & Software.* 2011.V. 26. I. 11.P. 1325-1336. DOI: 10.1016/j.envsoft.2011.05.006.
23. Robertson D. M., Imberger J. Lake Number, a Quantitative Indicator of Mixing Used to Estimate Changes in Dissolved Oxygen // *International Review of Hydrobiology.* 1994. V.79. I.2. P. 159-176. DOI: 10.1002/iroh.19940790202
24. Wagner C., Adrian R. Consequences of changes in thermal regime for plankton diversity and trait composition in a polymictic lake: a matter of temporal scale // *Freshwater Biology.* 2011. V.56. I. 10. P. 1949-1961. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2011.02623.x.
25. Wilhelm S., Adrian R. Impact of summer warming on the thermal characteristics of a polymictic lake and consequences for oxygen, nutrients and phytoplankton// *Freshwater Biology.* 2008. V. 53. I. 2. P. 226-237. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2007.01887.x.
26. Williamson C. E., Dodds W., Kratz T. K., Palmer M. Lakes and streams as sentinels of environmental change in terrestrial and atmospheric processes. *Front. Ecol. Environ.* 2008. V. 6 (5). P. 247–254. DOI: 10.1890/070140.
27. Winder M., Schindler D.E. Climate change uncouples trophic interactions in an aquatic ecosystem// *Ecology.* 2004. V. 85. I. 8. P. 2100-2106. DOI: 10.1890/04-0151.
28. Yang Y., Colom W., Pierson D., Pettersson K. Water column stability and summer phytoplankton dynamics in a temperate lake (Lake Erken, Sweden) // *Inland waters.* 2016. V. 6 (4). P. 499-508. DOI: 10.1080/IW-6.4.874.
29. Zdorovenova G., Palshin N., Zdorovenov R., et al. The oxygen regime of a shallow lake // *Geography, environment, sustainability.* 2016. № 2. P. 47–57.

G. G. Gavrilenko
G. E. Zdorovenova
S. Y. Volkov
S. R. Bogdanov
R. E. Zdorovenov

***Water mass stability and its effect on the
polymictic lake oxygen regime.***

185030 Petrozavodsk, A.Nevsky av., 50. +7 (814-2) 57-63-81, fax: +7 (814-2) 57-84-64
e-mail: gg.gavrylenko@gmail.com

Abstract. *The article presents the results of data analysis from continuous multi-year measurements of temperature and dissolved oxygen in a polymictic lake. The periods of summer stratification and bottom anoxia in the lake in years with different weather conditions are estimated. To quantify the stability of the water mass, the Schmidt (St) and Lake Number (Ln) indices are used. It is shown that the water column stability differs in various in terms of weather conditions years, thus reflecting in the oxygen regime of the lake.*

Keywords: *shallow lake, temperature, mixing regime, stratification, Schmidt stability, Lake Number, dissolved oxygen, regional climate.*

References

1. Gavrilenko G. G., Zdorovennova G. E., Zdorovennov R. E., i dr. Termicheskiy i kislorodnyj rezhimy melkovodnogo ozera na ehtape letnego nagrevaniya // Geopolitika i ekogeodinamika regionov. 2014. № 10 (1). S. 414-421. (in Russian)
2. Georgiev A. P., Nazarova L. E. Transformation of ichthyofauna in freshwater ecosystems of Karelia under conditions of climate change // Russian Journal of Ecology. 2015. T. 46. № 4. S. 345-352. (in Russian)
3. Zdorovennova G. E., Gavrilenko G. G., Zdorovennov R. E., i dr. Evolyutsiya temperatury vodnoy tolshchi borealnykh ozer na fone izmeneniy regionalnogo klimata // Izvestiya RGO. 2017. T. 149. № 6. S. 59-74. (in Russian)
4. Terzhevnik A. Y., Pal'shin N. I., Zdorovennov R. E., et al. Hydrophysical aspects of oxygen regime formation in a shallow ice-covered lake // Water Resources. 2010. T. 37. № 5. S. 662-673. (in Russian)
5. Terzhevnik A. Yu., Golosov S. D., Gavrilenko G. G., i dr. Vozmozhnoye vliyanie "neobychnoy" vesny na rezhim rastvorennogo kisloroda v melkovodnom ozere v letniy period // Trudy KarNTs RAN. Seriya Limnologiya. 2017. №10. S. 17-27. DOI: 10.17076/lim712 (in Russian)
6. Adrian R., O'Reilly C. M., Zagarese H., et al. Lakes as sentinels of climate change // Limnology and Oceanography. 2009. Vol. 54. I. 6. P. 2283-2297. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283. (in English)
7. Arvola L., George G., Livingstone D. et al. The impact of the changing climate on the thermal characteristics of lakes // The Impact of Climate Change on European Lakes. 2010. Aquatic Ecology Series. V. 4. P. 85-101. DOI: 10.1007/978-90-481-2945-4_6 (in English)
8. Butcher J. B., Nover D., Johnson T. E. et al. Sensitivity of lake thermal and mixing dynamics to climate change. Climatic Change. 2015. V. 129 (1-2). P. 295-305. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1326-1> (in English)
9. Chojiński A., Ptak M., Skowron R., Strzelczak A. Changes in ice phenology on polish lakes from 1961 to 2010 related to location and morphometry // Limnologica - Ecology and Management of Inland Waters. 2015. V. 53. P. 42-49, DOI: 10.1016/j.limno.2015.05.005 (in English)
10. Diaz R. J. Overview of hypoxia around the World // J. Env. Qual. 2001. V. 30 (2). P. 275-281. DOI: 10.2134/jeq2001.302275x (in English)
11. Engelhardt C., Kirillin G. Criteria for the onset and breakup of summer lake stratification based on routine temperature measurements // Fundam.Appl.Limnol. 2014. V.184 (3). P. 183-194. DOI: 10.1127/1863-9135/2014/0582 (in English)
12. Foley B., Jones I. D., Maberly C. M., Rippey B. Long-term changes in oxygen depletion in a small temperate lake: effects of climate change and eutrophication // Freshwater Biology. 2012. V. 57. I.2. P. 278-289. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2011.02662.x (in English)
13. Idso S. B. On the concept of lake stability // Limnology and Oceanography. 1973. V. 18. I. 4. P. 681-683. (in English)
14. Imberger J., Patterson J.C. Physical limnology // Advances in Applied Mechanics. 1990. V. 27. P. 303-475. DOI:10.1016/S0065-2156(08)70199-6 (in English)
15. Jankowski T., Livingstone D. M., Buhner H., et al. Consequences of the 2003 European heat wave for lake temperature profiles, thermal stability, and hypolimnetic

- oxygen depletion: Implications for a warmer world // *Limnology and Oceanography*. 2006. V. 51. I. 2. P. 815–819. DOI: 10.4319/lo.2006.51.2.0815 (in English)
16. Kirillin G. Modelling the impact of global warming on water temperature and seasonal mixing regimes in small temperate lakes // *Bor. Environ. Res.* 2010. V. 15. P. 279–293. (in English)
 17. Kuha J., Arvola L., Hanson P. C., et al. Response of boreal lakes to episodic weather-induced events // *Inland Waters*. 2016. V. 6(4). P. 523-534. DOI: 10.1080/ IW-6.4.886 (in English)
 18. McIntyre S., Fram J. P., Kushner P. J., et al. Climate-related variations in mixing dynamics in an Alaskan arctic lake // *Limnology and Oceanography*. 2009. V. 54 I.6 (2). P. 2401-2417. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2401. (in English)
 19. Miettinen H., Pumpanen J., Heiskanen J., et al. Towards a more comprehensive understanding of lacustrine greenhouse gas dynamics —two-year measurements of concentrations and fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O in a typical boreal lake surrounded by managed forests // *Boreal Environment Research*. 2015. V20. I.1. P. 75–89. (in English)
 20. Nürnberg G. K. Quantifying anoxia in lakes // *Limnology and Oceanography*. 1995. V. 40. I. 6. P. 1100–1111. DOI: 10.4319/lo.1995.40.6.1100
 21. O'Reilly C. M., Sharma S., Gray D. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe// *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. I. 24. P. 10773-10781. DOI:10.1002/2015GL066235. (in English)
 22. Read J. S., Hamilton D. P., Jones I. D., et al. Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data // *Environmental Modelling & Software*. 2011. V. 26. I. 11.P. 1325-1336. (in English)
 23. Robertson D. M., Imberger J. Lake Number, a Quantitative Indicator of Mixing Used to Estimate Changes in Dissolved Oxygen // *International Review of Hydrobiology*. 1994. V.79. I.2. P. 159-176. DOI: 10.1002/iroh.19940790202. (in English)
 24. Wagner C., Adrian R. Consequences of changes in thermal regime for plankton diversity and trait composition in a polymictic lake: a matter of temporal scale // *Freshwater Biology*. 2011. V.56. I. 10. P. 1949-1961. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2011.02623.x. (in English)
 25. Wilhelm S., Adrian R. Impact of summer warming on the thermal characteristics of a polymictic lake and consequences for oxygen, nutrients and phytoplankton // *Freshwater Biology*. 2008. V. 53. I. 2. P. 226-237. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2007.01887.x. (in English)
 26. Williamson C. E., Dodds W., Kratz T. K., Palmer M. Lakes and streams as sentinels of environmental change in terrestrial and atmospheric processes. *Front. Ecol. Environ.* 2008. V. 6 (5). P. 247–254. DOI: 10.1890/070140. (in English)
 27. Winder M., Schindler D.E. Climate change uncouples trophic interactions in an aquatic ecosystem // *Ecology*. 2004. V. 85. I. 8. P. 2100-2106. DOI: 10.1890/04-0151.
 28. Yang Y., Colom W., Pierson D., Pettersson K. Water column stability and summer phytoplankton dynamics in a temperate lake (Lake Erken, Sweden) // *Inland waters*. 2016. V. 6 (4). P. 499-508. DOI: 10.1080/IW-6.4.874. (in English)
 29. Zdorovenova G., Palshin N., Zdorovenov R., et al. The oxygen regime of a shallow lake // *Geography, environment, sustainability*. 2016. №2. P. 47-57. (in English)

Поступила в редакцию 20.02.2017