

ГАЛИНА ЭДУАРДОВНА ЗДОРОВЕННОВА

кандидат географических наук, заведующий лабораторией гидрофизики, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук (Петрозаводск, Российская Федерация)
zdorovennova@gmail.com

РОМАН ЭДУАРДОВИЧ ЗДОРОВЕННОВ

кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидрофизики, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук (Петрозаводск, Российская Федерация)
romga74@gmail.com

НИКОЛАЙ ИННОКЕНТЬЕВИЧ ПАЛЬШИН

кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидрофизики, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук (Петрозаводск, Российская Федерация)
npalshin@mail.ru

АРКАДИЙ ЮРЬЕВИЧ ТЕРЖЕВИК

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории гидрофизики, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук (Петрозаводск, Российская Федерация)
ark1948@list.ru

ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРЫ И РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА В МЕЛКОВОДНОМ ОЗЕРЕ НА ФОНЕ ПОГОДНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ*

Рассматриваются особенности динамики температуры воды и растворенного кислорода в мелководном озере в течение трех последовательных лет с заметно отличающимися погодными условиями. Показано, что погодные условия конкретного года определяют продолжительность ледостава, биологического лета, летней стратификации, а также интенсивность теплообменных процессов с донными отложениями, скорость поглощения кислорода в придонных слоях водоема. Межгодовая изменчивость продолжительности биологического лета достигает месяца и обусловлена высокой вариабельностью дат его начала. Показано, что на фоне холодных осенних и весенних месяцев длительность ледостава увеличивается, при этом придонная аноксия существует до полугода, а общее уменьшение содержания растворенного кислорода в озере в течение зимы превышает 50 %, что может привести к катастрофическим последствиям для рыбного сообщества. Промежуточный взлом ледового покрова в начале зимы на фоне нетипично продолжительной теплой погоды, напротив, оказывает положительное влияние на кислородный режим озера зимой, уменьшая общее потребление кислорода до 30 % и снижая выраженность придонной аноксии. Аномально теплая погода конца зимы и начала весны может спровоцировать раннее развитие подледной конвекции и формирование прямой стратификации под ледяным покровом, а ее усиление после взлома льда на фоне теплой маловетреной погоды может заметно ухудшить кислородные условия в придонных слоях озера летом. Летняя аноксия выражена заметно слабее зимней; максимальное развитие получает при длительной стратификации водной толщи.

Ключевые слова: мелководное озеро, период ледостава, погодные условия, температура воды, биологическое лето, растворенный кислород, аноксия

ВВЕДЕНИЕ

Мелководные озера умеренной зоны северного полушария ввиду их относительно малой термической инерции испытывают значительные изменения в термическом и ледовом режимах и условиях перемешивания на фоне меняющегося климатического воздействия [8], [19]. Эти изменения определяют продолжительность биологи-

ческого лета (периода с температурой поверхности воды озер выше 10 °C) [7], жизненные циклы гидробионтов [3], рыбопродуктивность [4], [21], а также влияют на химико-биологические процессы в период ледостава, в том числе на кислородный режим [9], [20], что делает озерные экосистемы потенциально уязвимыми. Растворенный кислород (РК) является одним из важнейших

параметров, определяющих функционирование озерных экосистем, особенно в период ледостава, когда увеличивается риск развития придонной аноксии и массовой гибели рыб [12], [18]. Чувствительность рыб к недостатку кислорода широко варьирует от вида к виду, а также зависит от температуры воды, однако при концентрации РК менее 1–1,3 мг/л (насыщение 7–10 %) зимой и 1–2,5 мг/л (насыщение 15–25 %) летом для большинства видов рыб наступает предел функционирования компенсаторных механизмов дыхательной системы [2]. Большое влияние на содержание РК и его изменения во времени и пространстве оказывают физические факторы, связанные с обменом на границах раздела вода – атмосфера, вода – дно и процессами переноса внутри водной толщи. Так, наибольшие абсолютные значения РК в озерах наблюдаются в период осенне-зимнего охлаждения, поскольку его растворимость увеличивается при понижении температуры воды [5]. В периоды интенсивного весеннего и осеннего перемешивания распределение РК в озерах относительно однородно, а летом и зимой при устойчивой термической стратификации в придонных слоях мелководных озер наблюдается его дефицит, формирующийся, главным образом, за счет диффузии в донные отложения и бактериального потребления при разложении органического вещества [15], [16]. Летняя аноксия хорошо выражена в высокопродуктивных димиктических озерах, в то время как в полимиктических если и формируется, то существует относительно недолго в силу квазипериодического ветрового перемешивания [10], [22]. Явление зимней аноксии наиболее опасно для озер, длительно покрытых льдом [13]. Зимой в мелководных озерах температура придонных слоев глубоководных котловин повышается вследствие теплообмена с донными отложениями, что увеличивает бактериальную активность и способствует формированию выраженной аноксии [11]. Исследования термического и кислородного режимов водоема, продолжительности периодов аноксии и биологического лета необходимы для оценки условий обитания гидробионтов в течение года. Целью этой работы было изучение термического и кислородного режимов небольшого мелководного озера таежной зоны Фенноскандии на фоне различных погодных условий. Температура и растворенный кислород являются важнейшими параметрами, определяющими качество жизни гидробионтов, их жизненные циклы, и понимание того, как климатические изменения могут влиять на термический и кислородный режимы озер, помогут улучшить управление биологическими ресурсами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Термический и кислородный режимы небольшого (площадь зеркала 10,4 км², объем вод

~5,5·10⁷ м³, средняя глубина 5,3 м, максимальная 13,4 м) малопроточного мезотрофного оз. Вендорское (юг Карелии) были изучены по данным измерений температуры и РК в течение трех последовательных лет, заметно отличающихся по погодным условиям. Использовались данные косы, установленной в центральной глубоководной части озера и оснащенной температурными и кислородными датчиками производства RBR Ltd. (Канада) (точность и разрешающая способность по температуре ± 0,002 °C и < 0,00005 °C, по кислороду ± 1 % соответственно). Коса находится в озере круглогодично, начиная с июля 2007 года до настоящего времени, за исключением нескольких суток в июне и октябре, когда она извлекается из озера для снятия данных и замены элементов питания в датчиках. Расстояние между датчиками на косе в водной толще составляет 0,5–1,5 м, в придонных слоях – 2–5 см, интервал измерений – одна минута. В работе использовались данные косы за период с октября 2014 года по октябрь 2017 года. По данным температурных датчиков косы были определены даты начала и окончания ледостава, начала весенней подледной конвекции, летней стратификации, продолжительность биологического лета. Анализ данных кислородных датчиков позволил определить момент начала придонной аноксии (концентрация РК в придонном слое менее 1 мг/л [17]) и максимальную толщину анаэробной зоны к концу ледостава и на этапе летней стратификации. Было проанализировано поглощение РК в озере в течение зимы на основании оценок отношения C_t/C_0 , где C_t и C_0 – концентрация кислорода в текущий момент времени и в первый день ледостава, мг/л.

Оценки интегральной скорости потребления РК для зимних месяцев исследуемых лет были получены в соответствии с подходом, изложенным в работе [5]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\gamma C,$$

где С – концентрация РК, мг/л; γ – интегральная скорость потребления РК, с⁻¹; t – время, с. Это уравнение имеет аналитическое решение:

$$C_t = C_0 e^{-\gamma t}.$$

Для оценки потока тепла на границе с донными отложениями использовались данные придонной платформы, установленной в центральной части озера в 50 м от косы и оснащенной 10 температурными датчиками RBR, смещенными друг относительно друга на 2 см. Часть датчиков при постановке платформы в озеро попадает в верхний слой донных отложений, часть остается в придонной воде. В предположении, что в верхнем слое донных отложений теплоперенос является молекулярным, поток тепла из донных отложений в воду Q_s (Вт/м²) может быть оценен

по данным датчиков, находящихся в иле, с использованием широко известного градиентного метода:

$$Q_s = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z},$$

где T – температура, $^{\circ}\text{C}$; z – вертикальная координата, м; λ – коэффициент теплопроводности донных отложений, $\text{Вт}/\text{м}\cdot^{\circ}\text{C}$. Значения коэффициента теплопроводности грунтов центральной части оз. Вендинское ($\lambda = 0,62 \text{ Вт}/\text{м}\cdot^{\circ}\text{C}$) были получены из работы [14].

Анализ метеорологического воздействия на озеро выполнялся по данным метеостанции «Петрозаводск», полученным на сайте <http://gr5.ru>.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Погодные условия изученных лет существенно отличались; в частности, осень и первый месяц зимы в 2015 году были наиболее теплыми, а в 2016 году – наиболее холодными за изученный период (табл. 1). Во всех рассматриваемых зимних сезонах месяцы с декабря по март, за исключением января 2016 года, были заметно теплее климатической нормы. В 2015 и 2016 годах апрель, май и июнь были теплее нормы, а в 2017 году – холоднее. Июль 2016 года был наиболее теплым за исследованный период, а июль 2015 – наиболее холодным. Указанные погодные разли-

ния определили существенную разницу в датах наступления, окончания и продолжительности ледостава, летней стратификации, биологического лета (табл. 2) и сказались на кислородном режиме озера как в период ледостава, так и в период открытой воды.

Термический режим. В 2014 году сплошной лед образовался 21–22 ноября (см. табл. 2) при температуре водной толщи в центральной части озера $0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, а на границе с донными отложениями $0,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

В 2015 и 2016 годах сплошной лед образовался 16 и 6 ноября соответственно, при температуре водной толщи около $1,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, на границе с донными отложениями $2,1$ – $2,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако осенью 2015 года через 11 суток после начала ледостава (27 ноября) на фоне теплой ветреной погоды лед был взломан; в период до 11 декабря водная толща озера и верхний слой донных отложений активно выхолаживались, и вновь озеро замерзло лишь 12 декабря при температуре водного столба $0,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $0,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ на границе с донными отложениями. Взлом льда происходил в первых числах мая в 2015 и 2016 годах и лишь в конце второй декады мая в 2017 году. Таким образом, продолжительность ледостава не превышала 160 суток в первую и вторую зимы и была на месяц больше в третью зиму наблюдений (см. табл. 2). Совместный анализ данных метеостанции «Пет-

Таблица 1
Среднемесячная приземная температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$) в период с октября 2014 года по октябрь 2017 года и ее отклонения от климатической нормы за период 1961–1990 годов (значения в скобках) по метеостанции «Петрозаводск»

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2014										2,0 (-1,3)	-1,3 (1,2)	-4,3 (3,3)
2015	-7,1 (4,3)	-2,7 (7,1)	0,7 (5,1)	2,2 (0,7)	10,4 (2,0)	14,2 (0,7)	14,3 (-1,8)	15,5 (1,5)	11,8 (3,0)	3,5 (0,2)	0,1 (2,6)	-1,7 (5,9)
2016	-14,9 (-3,5)	-2,3 (7,5)	-1,2 (3,2)	3,5 (2,0)	12,7 (4,3)	14,2 (0,7)	18,5 (2,4)	15,3 (1,3)	10,0 (1,2)	2,8 (-0,5)	-4,3 (-1,8)	-4,4 (3,2)
2017	-7,3 (4,1)	-7,5 (2,3)	-1,0 (3,4)	0,2 (-1,3)	5,0 (-3,4)	11,7 (-1,8)	15,5 (-0,6)	15,9 (1,9)	9,8 (1,0)			

Таблица 2
Сроки наступления и продолжительность в сутках ледостава, придонной аномалии зимой ($A_{зима}$) и летом ($A_{лето}$), биологического лета (БЛ), а также максимальная толщина придонной анаэробной зоны зимой (ПАЗ_{зима}) и летом (ПАЗ_{лето}) на оз. Вендинское в разные годы

Сезон	Ледостав	$A_{зима}$	ПАЗ _{зима} , м	БЛ	$A_{лето}$	ПАЗ _{лето} , м
2014–2015	21.11.2014–30.04.2015 160 сут.	6,12, 145 сут.	1,3	23.05–05.10.2015 134 сут.	24,07, 21 сут.	0,2
2015–2016	16.11–27.11.2015, 10 сут. 12.12.2015–4.05.2016, 144 сут.	4,01, 110 сут.	0,9	09–05–04.10.2016 148 сут.	7,07, 49 сут.	1,1
2016–2017	6.11.2016–18.05.2017, 193 сут.	20,11, 180 сут.	2,5	06.06.2017–03.10.2017 119 сут.	20,07, 22 сут.	0,75

розаводск» и ледовых явлений озера Вендюрское за 1994–2017 годы показал, что в годы, когда среднемесячные температуры в ноябре, и апреле были заметно ниже климатической нормы, на озере наблюдался наиболее продолжительный ледостав. Такая же зависимость выполняется для расположенного в 20 км южнее и имеющего близкие даты замерзания и схода льда озера Сямозеро (рис. 1) (приведенного здесь в связи с тем, что для этого водоема-аналога ряды наблюдений за ледовыми явлениями в период с 1997 до 2008 года были более регулярными). В годы, когда отклонения среднемесячных температур ноября или в ноябре, и апреля от нормы были положительными, ледостав имел наименьшую продолжительность. Анализ данных, приведенных на рис. 1, позволяет говорить о том, что ледостав продолжительностью более 190 суток довольно редкое явление для оз. Вендюрское (21 % случаев, 5 из 23 лет наблюдений).

После появления сплошного льда температура воды в придонных слоях озера повышается вследствие теплообмена с донными отложениями. В 2014 году, когда температура водной толщи в момент замерзания озера была очень низкой, и в 2015 году, когда наблюдались прерывание установившегося льда и дополнительное выхолаживание, температура придонной воды в центральной котловине повысилась до 3,3–3,5 °C к концу первого месяца существования льда и до 4,6–4,8 °C к концу ледостава. В 2016 году, когда озеро замерзло очень рано – в первую неделю ноября при относительно высокой температуре

водной массы и большом теплозапасе донных отложений, температура воды в придонных слоях глубоководной котловины превысила 5 °C уже к 27 ноября, то есть всего через три недели существования льда, а к середине января достигла 5,8 °C, оставаясь на таком уровне до конца зимы 2016/17 года. Сезонная динамика теплопотока на границе вода – донные отложения в центральной глубоководной части озера в период ледостава в исследованные годы показана на рис. 2а. Во все годы величина теплопотока Q_s резко снижалась в течение первого месяца ледостава от 3,5–5 до 1,2–1,5 Вт/м², затем, по мере истощения запаса тепла в донных отложениях, продолжала уменьшаться и к концу зимы не превышала 0,5–0,7 Вт/м². В первый месяц ледостава величина теплопотока Q_s была на 10–20 % больше зимой 2016/17 года по сравнению с двумя другими зимами, к концу четвертого месяца ледостава эта разница достигла 40–50 %.

Во все исследованные годы февраль и март были аномально теплыми (температура воздуха в эти месяцы превышала климатическую норму на 2,3–7,5 °C, см. табл. 1). Предположительно, это могло обусловить меньшую толщину снежного покрова и его более раннее стаивание и способствовало нетипично раннему началу подледной конвекции (середина – конец марта против середины апреля в другие годы) и ее большей продолжительности (5,5–7 недель против обычных 3–4,5 см [23]). На фоне ветреной погоды весной 2015 года после взлома льда водная толща озера была перемешана, и затем в состоянии, близком

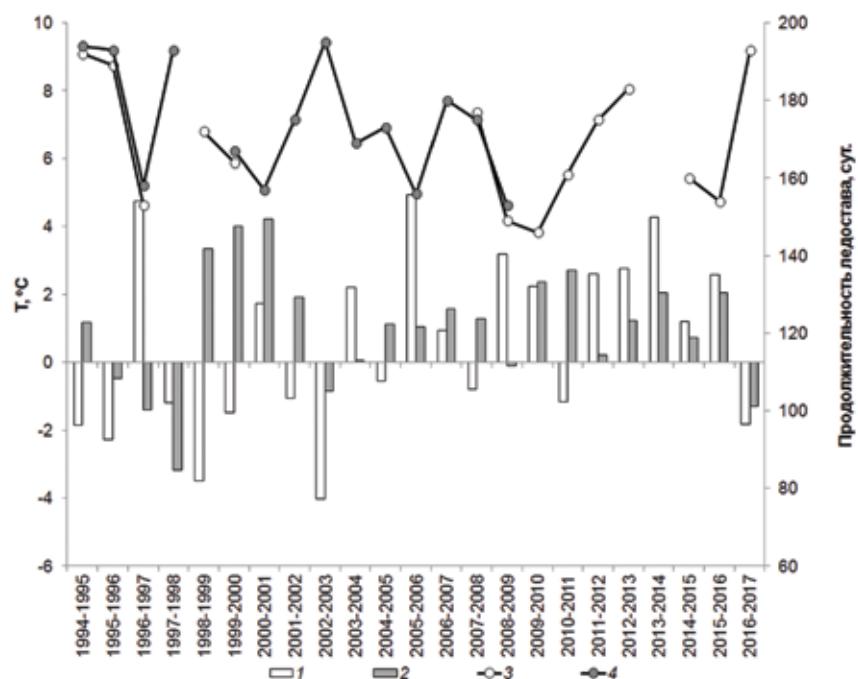


Рис. 1. Отклонения от климатической нормы за период 1961–1990 годов среднемесячных температур воздуха по метеостанции «Петрозаводск» в ноябре (1) и апреле (2), а также продолжительность ледостава на озерах Вендюрское (3) и Сямозеро (4) в разные годы. Данные по продолжительности ледостава на оз. Сямозеро взяты из работы [23]

к гомотермии, озеро нагревалось в течение трех недель. Слабо выраженная стратификация (с разницей температур поверхностных и придонных слоев не более 3–4 °C) отмечалась в период с 26 мая до 26 августа 2015 года. К моменту взлома льда в 2016 и 2017 годах температура подледного слоя воды в результате длительного прогрева достигла 4,5–5,5 °C, то есть в эти годы уже подо льдом сформировалась прямая стратификация, и после взлома льда полного перемешивания водной толщи озера не произошло. После взлома льда в 2016 году при теплой маловетреной погоде стратификация усилилась, и водная толща озера находилась в стратифицированном состоянии более месяца до 10 июня, когда на фоне продолжительного похолодания и усиления ветра была полностью перемешана. Летом хорошо выраженная стратификация (с разницей температур поверхностных и придонных слоев 4–9 °C) на озере наблюдалась до 11 августа. Весной 2017 года после взлома льда слабая стратификация сохранялась до конца мая, затем водная толща озера была полностью перемешана. Летом, начиная с 5 июня и до середины августа, на озере наблюдалась слабо выраженная стратификация с разницей температур поверхностных и придонных слоев озера 2–5 °C.

Описанные температурные условия определили продолжительность биологического лета, которая заметно отличалась в исследованные годы и была наибольшей – почти пять месяцев – в 2016 году и наименьшей – около четырех месяцев – в 2017 году (см. табл. 2). Интересно, что даты окончания биологического лета были очень близки в изученные годы, а даты начала заметно отличались, что было связано с более выраженной межгодовой изменчивостью региональных синоптических условий конца весны – начала лета по сравнению с осенним периодом (см. табл. 1). Выявленные нами заметные межгодовые отличия в сроках начала и продолжительности биологического лета могут оказывать огромное влияние на функционирование озерной экосистемы, в частности, могут привести к заметной перестройке рыбного сообщества. Как показано в работах [1], [7], повышение температуры воздуха и воды и увеличение продолжительности биологического лета приводят к росту в уловах процента тепловодных рыб и уменьшению процента холодноводных. При более раннем начале биологического лета преимущество в развитии получают весенние нерестовые виды рыбного сообщества, доминирование которых в уловах озер Карелии отмечается со второй половины 1970-х годов до настоящего времени [1], [6].

Кислородный режим. В предледоставный период во все годы наблюдений водная толща озера была хорошо насыщена кислородом, его концентрация достигала 12–13 мг/л при насыщении 85–95 %. После появления сплошного льда

содержание РК уменьшалось, незначительно – в поверхностных слоях, наиболее интенсивно – в придонных слоях центральной котловины, что было обусловлено, главным образом, бактериальным разложением органического вещества [5]. К концу третьей недели ледостава в придонном слое центральной котловины концентрация РК понижалась до близких к нулю значений, и начинала формироваться зона придонной аноксии (см. табл. 2). К концу зимы толщина придонной анаэробной зоны в центральной котловине озера была заметно меньше в годы с более низкими придонными температурами и менее продолжительным ледоставом (первые две зимы) по сравнению с третьей зимой, когда придонные температуры были заметно выше (что определяло и более высокую активность бактерий) и продолжительность ледостава существенно больше. При этом наименее развитая придонная аноксия наблюдалась в течение второй зимы, когда установившийся лед в начале зимы был взломан, водная толща перемешана и ее придонные слои насыщены кислородом. Перед повторным замерзанием озера в декабре 2015 года концентрация РК и процент насыщения по водному столбу были заметно выше (13–13,6 мг/л при насыщении 92–97 %), чем перед ноябрьским замерзанием, а также по сравнению с другими годами.

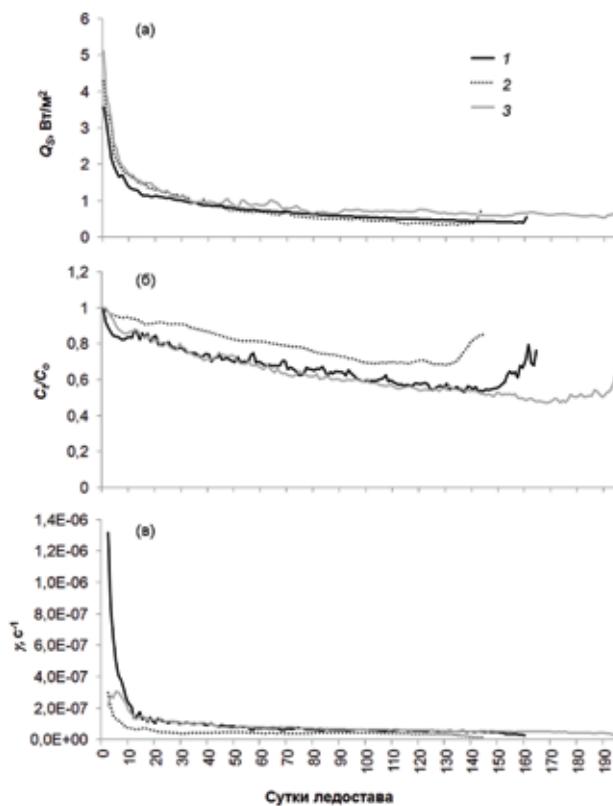


Рис. 2. Эволюция теплопотока на границе вода – донные отложения (а), отношения C/C_0 (б) и скорости поглощения РК (в) в период ледостава: 1 – 2014–2015 годы, 2 – 2015–2016 годы, 3 – 2016–2017 годы

Наиболее интенсивно кислород поглощался в озере в первую и третью зимы, и к концу ледостава общее уменьшение его содержания достигало 45 и 53 % от значения в момент замерзания озера, в то время как в зимний сезон 2015/16 года уменьшение РК не превышало 30 % (рис. 2б). Оценки интегральной скорости потребления кислорода u показали, что наибольшие значения этого показателя отмечались в первые 10 дней ледостава, достигая $3 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ в первую и вторую зимы и $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ – в третью (рис. 2в). Затем на протяжении большей части первой и третьей зим значения u были соизмеримы и постепенно уменьшались до $5 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ к концу ледостава, во вторую зиму значения u были заметно меньше и к концу зимы не превышали $3 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$. Рассчитанные нами значения u хорошо согласуются с оценками, полученными ранее как по результатам пространственных съемок в разные месяцы зимы [5], так и по данным косы за другие годы исследований [24].

К моменту начала весенней подледной конвекции в поверхностном 4-метровом слое водной толщи концентрация РК во все годы наблюдений понижалась до 10–11 мг/л (насыщение 75–85 %), в слое 4–7 м – до 6 мг/л (насыщение 60–70 %). По мере заглубления нижней границы конвективно-перемешанного слоя происходило насыщение кислородом нижележащих слоев.

Обычно после освобождения ото льда водная толща озера находится в состоянии гомотермии от нескольких дней до нескольких недель. За это время происходит насыщение кислородом придонных слоев глубоководных котловин. Полное перемешивание водной толщи озера после взло-

ма льда в мае 2015 года (рис. 3а) способствовало созданию благоприятных кислородных условий на этапе раннего лета; незначительное снижение РК до 6–7 мг/л (насыщение 55–65 %) в придонных слоях центральной котловины наблюдалось лишь в третьей декаде мая. Поскольку после взлома льда в 2016 и 2017 годах водная толща озера была стратифицирована, кислородные условия раннего лета в эти годы были заметно хуже, чем в 2015 году. Уже со второй декады мая 2016 года наблюдалось уменьшение кислорода до 4–5 мг/л (насыщение 40–50 %) в придонных слоях центральной котловины (рис. 3б). После взлома льда в 2017 году на фоне слабой термической стратификации пониженные концентрации РК (5–7 мг/л, насыщение 50–70 %) наблюдались глубже 8 м до конца мая (рис. 3в).

Летом наиболее благоприятные кислородные условия в озере складывались в 2015 году, когда продолжительность придонной аноксии не превышала трех недель, а неблагоприятные – в 2016 году, когда аноксия существовала более 1,5 месяца и толщина придонной анаэробной зоны в центральной части озера достигла 1,1 м (см. табл. 2). Причина выраженных различий в летнем кислородном режиме озера, главным образом, в погодных условиях июля. В частности, в июне и августе 2015 и 2016 годов среднемесячные температуры воздуха (см. табл. 1), как и ветровой режим, были практически одинаковы, в то время как в июле – заметно отличались. В июле 2016 года, который был на 2,4 °C теплее климатической нормы, на фоне достаточно теплой и мало-ветреной погоды стратификация водной толщи

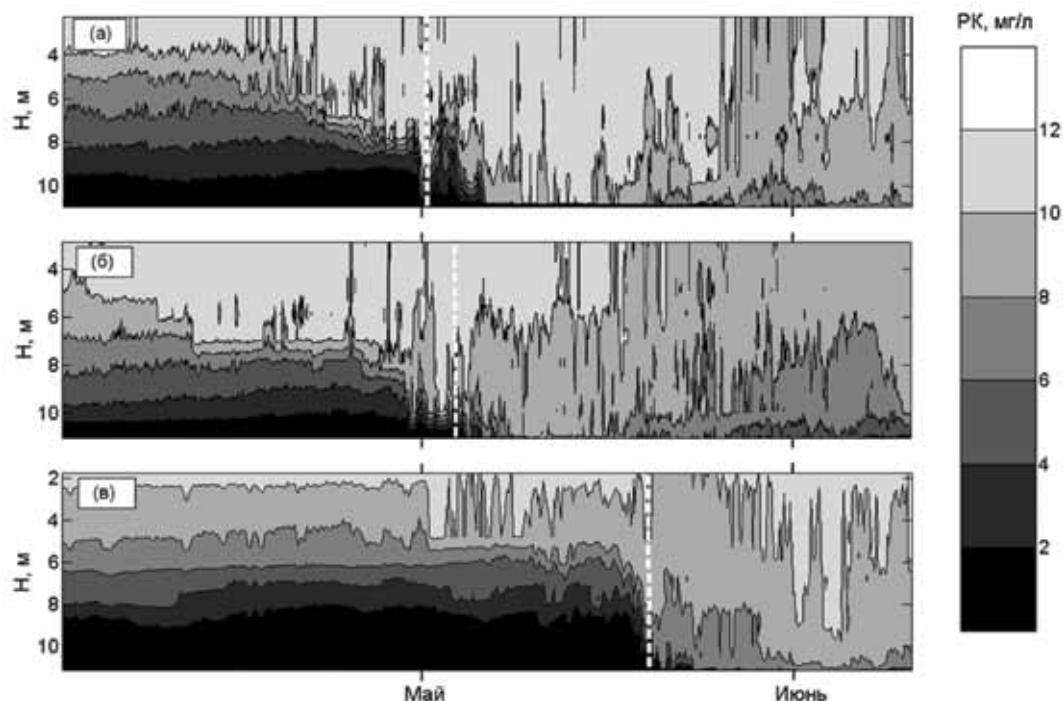


Рис. 3. Концентрация РК в центральной части озера Вендюрское в период с 1 апреля по 10 июня: (а) – 2015 год, (б) – 2016 год, (в) – 2017 год. Пунктирная серая линия – момент взлома льда

была хорошо выражена, что препятствовало аэрации гиполимнона, в то время как в июле 2015 года, который был заметно более холодным и ветреным, стратификация была слабой, а ее непродолжительное усиление в конце июля при ослаблении ветровой нагрузки не привело к существенному ухудшению кислородных условий придонных областей.

Во все исследованные годы в озере Вендюрское продолжительность существования придонной аноксии в период открытой воды была намного меньше, чем в период ледостава, а степень «летнего» кислородного дефицита в придонных областях – заметно менее выражена по сравнению с «зимним». Зимняя аноксия, существующая в озере в течение нескольких месяцев и захватывающая значительную часть объема озерных вод, представляет несомненную опасность для гидробионтов, что определяет важность дальнейших исследований зимнего кислородного режима водоемов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что погодные условия оказывают заметное влияние на термический, ледовый и кислородный режимы мелководного озера таежной зоны Фенноскандии, определяя межгодовую изменчивость продолжительности ледостава, летней стратификации, биологического лета, а также интенсивности теплообмена водной толщи озера с донными отложениями и скорости поглощения РК. Продолжительность биологического лета в разные годы заметно варьирует в зависимости от погодных условий поздней весны и раннего лета, что может оказывать существенное влияние на условия размножения и состав рыбного сообщества – при раннем начале и большой продолжительности биологического лета преимущественно получают теплолюбивые и весенние нерестовые виды. Наиболее продолжительный ледостав наблюдается в годы с аномально холодными осен-

ними и весенними месяцами и способствует максимальному развитию придонной аноксии, что создает потенциальный риск для зимующих гидробионтов. Напротив, прерывание установившегося льда на фоне аномально теплой погоды ранней зимы приводит к улучшению кислородных условий в озере в период ледостава, заметно уменьшая выраженность придонной аноксии. Аномально теплые зимние месяцы могут спровоцировать раннее начало и большую продолжительность весенней подледной конвекции, что может привести к формированию устойчивой стратификации подо льдом, ее усилиению после взлома льда и ухудшению кислородных условий в придонных слоях озера на этапе раннего лета. Выраженность придонной аноксии и продолжительность ее существования заметно меньше летом по сравнению с периодом ледостава, когда анаэробные условия в придонных слоях водоема могут существовать в течение полугода, что может привести к катастрофическим последствиям для рыбного сообщества.

Поскольку озеро Вендюрское является типичным представителем небольших озер водно-ледникового происхождения, широко распространенных на территории Карелии и Финляндии [5], сделанные в работе выводы, касающиеся влияния погодных условий на его термический и кислородный режимы (даты начала и окончания и продолжительность биологического лета, ледостава, летней стратификации, летней и зимней придонной аноксии), а следовательно, на условия существования биоты, могут быть распространены на озера, подобные ему по морфометрии, прозрачности воды и трофическому статусу, для которых имеются данные по динамике рыбного сообщества, что позволит получить новые знания о реакции последнего на изменения регионального климата. Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы специалистами-ихтиологами при изучении межгодовой динамики рыбного сообщества озер юга Карелии и Финляндии.

* Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ 16-05-00436_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Кляшторин Л. Б. Водное дыхание и кислородные потребности рыб. М.: Легкая и пищ. пром-сть, 1982. 168 с.
- Лазарева В. И., Соколова Е. А. Метазоопланктон равнинного водохранилища в период потепления климата: биомасса и продукция // Биология внутренних вод. 2015. № 3. С. 30–38. DOI: 10.7868/S0320965215030092
- Петрова Л. П., Кудерский Л. А. Водозеро: природа, рыбы, рыбный промысел. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. 196 с.
- 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.
- Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Семенов А. В. и др. Изменения и изменчивость климата европейского Севера России и их влияние на водные объекты // Арктика. Экология и экономика. 2012. № 2. С. 80–93.
- Филатов Н. Н., Руховец Л. А., Назарова Л. Е. и др. Влияние изменения климата на экосистемы озер севера европейской территории России // Ученые записки Российской государственной гидрометеорологической университета. Специальный выпуск. СПб.: РГГМУ, 2014. № 34. С. 48–56.

8. Arvola L., George G., Livingstone D. M. et al. The impact of the changing climate on the thermal characteristics of lakes // *The Impact of Climate Change on European Lakes*. D. G. George (ed.). Aquatic Ecology. Series 4. Springer Science+Business Media B. V. 2010. DOI: 10.1007/978-90-481-2945-4_6.
9. Bartosiewicz M., Laurion I., Clayer F., Maranger R. Heat-Wave Effects on Oxygen, Nutrients, and Phytoplankton Can Alter Global Warming Potential of Gases Emitted from a Small Shallow Lake // *Environ. Sci. Technol.* 2016. Vol. 50. № 12. P. 6267–6275. DOI: 10.1021/acs.est.5b06312.
10. Bouffard D., Ackerman J. D., Boegman L. Factors affecting the development and dynamics of hypoxia in a shallow large stratified lake: Hourly to seasonal patterns // *Water Resour. Res.* 2013. Vol. 49. № 5. P. 2380–2394. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/wrcr.20241>.
11. Golosov S., Terzhevsk A., Zverev I. et al. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes // *Tellus A*. 2012. Vol. 64. P. 17264. DOI: 10.3402/tellusa.v64i0.17264.
12. Greenbank J. Limnological conditions in ice-covered lakes, especially as related to winter-kill of fish // *Ecol. Monogr.* 1945. Vol. 15. № 4. P. 343–392.
13. Leppi J. C., Arp C. D., Whitman M. S. Predicting Late Winter Dissolved Oxygen Levels in Arctic Lakes Using Morphology and Landscape Metrics // *Environ. Manage.* 2016. Vol. 57. P. 463–473. DOI: 10.1007/s00267-015-0622-x.
14. Malm J., Terzhevsk A., Bengtsson L. et al. Temperature and Hydrodynamics in Lake Vendurskoe during Winter 1995/1996. Department of Water Resources Engineering, Institute of Technology. University of Lund, 1997. № 3213. 203 p.
15. Meding M. E., Jackson L. J. Biotic, chemical, and morphometric factors contributing to winter anoxia in prairie lakes // *Limnol. Oceanogr.* 2003. Vol. 48. № 4. P. 1633–1642.
16. Müller B., Bryant L. D., Matzinger A., West A. Hypolimnetic oxygen depletion in eutrophic lakes // *Environ. Sci. Technol.* 2012. Vol. 46. № 18. P. 9964–9971. DOI: 10.1021/es301422r.
17. Nürnberg G. K. Quantifying anoxia in lakes // *Limnology and Oceanography*. 1995. Vol. 40. № 6. P. 1100–1111. DOI: 10.4319/lo.1995.40.6.1100.
18. Odum E., Barret G. *Fundamentals of Ecology*. 5th ed. Brooks Cole, Florence, KY, 2004. 624 p.
19. O'Reilly C. M., Sharma S., Gray D. K. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42. № 24. P. 10773–10781. DOI: 10.1002/2015GL066235.
20. Schindler D. W., Bayley S. E., Parker B. R. The effects of climatic warming on the properties of boreal lakes and streams at the Experimental Lakes Area, northwestern Ontario // *Limnol. Oceanogr.* 1996. Vol. 41. № 5. P. 1004–1017.
21. Shuter B., Helland I. P., Zweimüller, Hölker F. The role of winter phenology in shaping the ecology of freshwater fish and their sensitivities to climate change. // *Aquatic Sciences*. 2012. Vol. 74. № 4. P. 637–657. DOI: 10.1007/s00027-012-0274-3.
22. Wetzel R. G. *Limnology: Lake and River ecosystems*. N. Y.: Academic Press, 2001. 1006 p.
23. Zdrovennov R., Palshin N., Zdrovennova G. et al. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake // *Estonian Journal of Earth Sciences*. 2013. Vol. 61. № 1. P. 26–32.
24. Zdrovennova G., Palshin N., Zdrovennov R. et al. The oxygen regime of a shallow lake // *Geography, Environment, Sustainability*. 2016. № 2. P. 47–57. DOI: 10.15356/2071-9388_02v09_2016_04.

Zdrovennova G. E., Northern Water Problems Institute of KRC of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Zdrovennov R. E., Northern Water Problems Institute of KRC of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Palshin N. I., Northern Water Problems Institute of KRC of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Terzhevsk A. Yu., Northern Water Problems Institute of KRC of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

DYNAMICS OF TEMPERATURE AND DISSOLVED OXYGEN IN A SHALLOW LAKE ON THE BACKGROUND OF WEATHER VARIABILITY

The article considers dynamics of the water temperature and dissolved oxygen in a shallow lake for three consecutive years with noticeably different weather conditions. It is shown that the weather conditions of a particular year determine the duration of the ice season, summer stratification, and intensity of the heat exchange with bottom sediments, and, consequently, the speed of the oxygen uptake in the bottom layers of the lake. The interannual variability of the duration of the biological summer reaches a month period due to high variability of the dates of its beginning. It is shown that against the background of cold autumn and spring months, the duration of the ice formation period increases, while the bottom anoxia exists up to six months. The total decrease of dissolved oxygen in the lake exceeds 50 % during winter time, which can lead to catastrophic consequences for the fish community of the lake. Fracturing of the steady ice at the beginning of winter in conditions of the unusually long warm weather, on the contrary, has a positive effect on the oxygen regime of the winter lake. It helps to reduce the total oxygen consumption up to 30 % and to diminish the severity of bottom anoxia. The abnormally warm weather at the end of winter together with early spring can provoke early under-ice convection development. These conditions are also facilitative in the formation of direct stratification under the ice cover. The intensification of stratification under ice fracturing in conditions of warm, low-winded weather can significantly worsen oxygen conditions in the bottom layers of the lake in the summer. The summer anoxia is markedly weaker than the winter one. The summer anoxia gets its maximum development in conditions of prolonged stratification of water columns.

Key words: a shallow lake, ice period, weather conditions, water temperature, biological summer, dissolved oxygen, anoxia

REFERENCES

1. Georgiev A. P., Nazarova L. E. Transformation of ichthyofauna in freshwater ecosystems of Karelia under conditions of climate change. *Russian Journal of Ecology*. 2015. Vol. 46. № 4. P. 345–352.
2. Klyashtorin L. B. *Vodnoe dykhaniye i kislorodnye potrebnosti ryb* [Water respiration and oxygen needs of fish]. Moscow, Legkaya i pishchevaya promyshlennost' Publ., 1982. 168 p.
3. Lazareva V. I., Sokolova E. A. Metazooplankton of the plain reservoir during climate warming: Biomass and production. *Inland Water Biology*. 2015. Vol. 8. № 3. P. 250–258.

4. Petrova L. P., Kuderskij L. A. *Vodlozero: priroda, ryby, rybnyy promysel* [Vodlozero: nature, fish, fishery]. Petrozavodsk, KarNTs RAN Publ., 2006. 196 p.
5. Terzhevik A. Yu., Pal'shin N. I., Golosov S. D. i dr. Hydrophysical aspects of oxygen regime formation in a shallow ice-covered lake. *Water Resources*. 2010. Vol. 37. № 5. P. 662–673.
6. Filatov N. N., Nazarova L. E., Semenov A. V. i dr. Changes and variability of the climate of the European North of Russia and their impact on water bodies [Izmeneniya i izmenchivost' klimata evropeyskogo Severa Rossii i ikh vliyanie na vodnye ob'ekty]. *Arktika. Ekologiya i ekonomika* [Arctic. Ecology and economics]. 2012. № 2. P. 80–93.
7. Filatov N. N., Ruhovec L. A., Nazarova L. E. i dr. The impact of climate change on the ecosystems of lakes in the north of European Russia [Vliyanie izmeneniya klimata na ekosistemy ozer severa evropeyskoy territorii Rossii]. *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta. Spetsial'nyy vypusk* [Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University. Special issue]. St. Petersburg, RGGMU Publ., 2014. № 34. P. 48–56.
8. Arvola L., George G., Livingstone D. M. et al. The impact of the changing climate on the thermal characteristics of lakes // The Impact of Climate Change on European Lakes. D. G. George (ed.). Aquatic Ecology. Series 4. Springer Science+Business Media B. V. 2010. DOI: 10.1007/978-90-481-2945-4_6.
9. Bartosiewicz M., Laurion I., Clayter F., Maranger R. Heat-Wave Effects on Oxygen, Nutrients, and Phytoplankton Can Alter Global Warming Potential of Gases Emitted from a Small Shallow Lake // *Environ. Sci. Technol.* 2016. Vol. 50. № 12. P. 6267–6275. DOI: 10.1021/acs.est.5b06312.
10. Bouffard D., Ackerman J. D., Boegman L. Factors affecting the development and dynamics of hypoxia in a shallow large stratified lake: Hourly to seasonal patterns // *Water Resour. Res.* 2013. Vol. 49. № 5. P. 2380–2394. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/wrcr.20241>.
11. Golosov S., Terzhevik A., Zverev I. et al. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes // *Tellus A*. 2012. Vol. 64. P. 17264. DOI: 10.3402/tellusa.v64i0.17264.
12. Greenbank J. Limnological conditions in ice-covered lakes, especially as related to winter-kill of fish // *Ecol. Monogr.* 1945. Vol. 15. № 4. P. 343–392.
13. Leppi J. C., Arp C. D., Whitman M. S. Predicting Late Winter Dissolved Oxygen Levels in Arctic Lakes Using Morphology and Landscape Metrics // *Environ. Manage.* 2016. Vol. 57. P. 463–473. DOI: 10.1007/s00267-015-0622-x.
14. Malin J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. Temperature and Hydrodynamics in Lake Vendurskoe during Winter 1995/1996. Department of Water Resources Engineering, Institute of Technology. University of Lund, 1997. № 3213. 203 p.
15. Meding M. E., Jackson L. J. Biotic, chemical, and morphometric factors contributing to winter anoxia in prairie lakes // *Limnol. Oceanogr.* 2003. Vol. 48. № 4. P. 1633–1642.
16. Müller B., Bryant L. D., Matzinger A., West A. Hypolimnetic oxygen depletion in eutrophic lakes // *Environ. Sci. Technol.* 2012. Vol. 46. № 18. P. 9964–9971. DOI: 10.1021/es301422r.
17. Nürnberg G. K. Quantifying anoxia in lakes // *Limnology and Oceanography*. 1995. Vol. 40. № 6. P. 1100–1111. DOI: 10.4319/lo.1995.40.6.1100.
18. Odum E., Barret G. Fundamentals of Ecology. 5th ed. Brooks Cole, Florence, KY, 2004. 624 p.
19. O'Reilly C. M., Sharma S., Gray D. K. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42. № 24. P. 10773–10781. DOI: 10.1002/2015GL066235.
20. Schindler D. W., Bayley S. E., Parker B. R. The effects of climatic warming on the properties of boreal lakes and streams at the Experimental Lakes Area, northwestern Ontario // *Limnol. Oceanogr.* 1996. Vol. 41. № 5. P. 1004–1017.
21. Shuter B., Helland I. P., Zweimüller F. The role of winter phenology in shaping the ecology of freshwater fish and their sensitivities to climate change. // *Aquatic Sciences*. 2012. Vol. 74. № 4. P. 637–657. DOI: 10.1007/s00027-012-0274-3.
22. Wetzel R. G. Limnology: Lake and River ecosystems. N. Y.: Academic Press, 2001. 1006 p.
23. Zdrovennov R., Pal'shin N., Zdrovennova G. et al. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake // *Estonian Journal of Earth Sciences*. 2013. Vol. 61. № 1. P. 26–32.
24. Zdrovennova G., Pal'shin N., Zdrovennov R. et al. The oxygen regime of a shallow lake // *Geography, Environment, Sustainability*. 2016. № 2. P. 47–57. DOI: 10.15356/2071-9388_02v09_2016_04.

Поступила в редакцию 18.10.2017