

DOI: 10.37279/2309-7663-2020-6-4-116-128

УДК 556.556

Г. Э. Здорвеннова,
Г. Г. Гавриленко,
Н. И. Пальшин,
Т. В. Ефремова,
С. Р. Богданов,
А. Ю. Тержевик,
Р. Э. Здорвеннов

Изменение теплопотока на границе вода– донные отложения в малом озере в течение года

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ
«Карельский научный центр РАН», г. Петрозаводск,
Республика Карелия, Российская Федерация
e-mail: zdrovennova@gmail.com

Аннотация. Особенности изменчивости теплового потока на границе водной толщи с донными отложениями проанализированы по данным круглогодичных измерений температуры в центральной части небольшого полимиктического озера Вендюрского (юг Карелии) в период с ноября 2018 по октябрь 2019 гг. Показано, что величина теплопотока, направленного из донных отложений в воду, достигала в предледоставный период и в моменты установления и взлома льда $6\text{--}8 \text{ Вт/м}^2$, на протяжении большей части зимы не превышала 1 Вт/м^2 . Через неделю после освобождения озера ото льда и полного перемешивания его водной толщи теплопоток поменял знак, то есть началось накопление тепла верхним слоем донных отложений. Величина теплопотока, направленного в донные отложения, с середины мая до конца июля и со второй декады августа до второй декады сентября составляла $4\text{--}6 \text{ Вт/м}^2$, периодически увеличиваясь до $8\text{--}12 \text{ Вт/м}^2$ в моменты полного перемешивания водной толщи озера. На фоне длительного похолодания в течение первой декады августа теплопоток менял знак с суточной периодичностью, амплитуда суточных колебаний достигала $\pm 2.5 \text{ Вт/м}^2$. Осеннее охлаждение водной толщи оз. Вендюрского началось в первых числах сентября 2019 г., смена знака теплопотока произошла 14–16 сентября 2019 г.

Ключевые слова: мелководное озеро, температура воды, донные отложения, тепловой поток.

Введение

Тепло- и массообмен на границе водной массы и донных отложений в мелководных озерах играет важную роль в химических и биологических процессах, таких как перенос растворенных веществ из донных отложений в воду, включая биогенные элементы [1], и флуктуации растворенного кислорода в придонных слоях водоемов [2].

Теплопоток на границе вода-донные отложения играет решающую роль в изменении термической структуры мелководных озер в период ледостава. При наличии сплошного льда на поверхности озера, препятствующего потерям тепла в атмосферу, теплообмен с донными отложениями обуславливает повышение температуры водной толщи озер. Зимой поток тепла направлен из донных отложений в воду, его величина максимальна сразу после установления льда и может достигать $5\text{--}9 \text{ В/м}^2$, к концу зимы заметно уменьшается до $0.5\text{--}2.0 \text{ В/м}^2$ [3].

На этапе весенне-летнего нагревания теплопоток направлен из воды в донные отложения, на этапе осеннего охлаждения – из донных отложений в воду.

В отдельные моменты времени периода открытой воды теплопоток на границе вода-дно может достигать 50–100 Вт/м², что на порядок больше его величины в зимний период [2, 4]. Эпизоды резкого увеличения теплопотока связаны с воздействием внутренних волн, сейш на поверхность донных отложений [2]. При этом теплопоток может многократно менять знак с периодичностью от часов до суток [2, 4]. Величина теплопотока в донные отложения кратковременно увеличивается летом в моменты полного перемешивания водной толщи небольших полимиктических озер, а также при разрушении сезонного термоклина в димиктических водоемах, когда наблюдается быстрое увеличение температуры их придонных слоев [5, 6].

На этапе весенне-летнего нагревания донные отложения мелководных озер накапливают значительные запасы тепла. Данные измерений на неглубоких озерах и водохранилищах показывают, что теплозапас их водной толщи и деятельного слоя донных отложений соизмерим. Теплоактивным принято считать слой донных отложений, ниже которого годовое изменение температуры не оказывает существенного влияния на теплозапас водоема. На оз. Кубенском годовые колебания температур грунтов прослеживаются до глубин 4–5 [7], на оз. Пуннус-Ярви (Красном) — до 5 [8].

Теплопоток на границе водной толщи с донными отложениями характеризуется значительной пространственно-временной изменчивостью и зависимостью от термофизических свойств грунта [9], что обуславливает сложность его параметризации для использования в численных моделях [10, 11].

Данная работа посвящена изучению изменчивости теплопотока вблизи границы вода-дно в течение года в небольшом полимиктическом озере Вендюрском (62°10'–62°20' N, 33°10'–33°20' E) по данным высокочастотных измерений температуры.

Объект исследований и методика измерений

Лимнические характеристики озера Вендюрского приведены в [6]. В центральной глубоководной части озера была установлена коса, оснащенная 15 датчиками температуры «RBR Ltd.» (Канада, диапазон - 5...+ 35°C, точность ± 0.002°C), и придонная платформа [12], оснащенная 10 температурными датчиками, часть которых находилась в придонном слое воды, часть — в верхнем слое донных отложений. Таким образом, зона измерений косы охватывала глубины с 1.5 до 11 м, зона измерений придонной платформы пересекала границу вода-дно и составляла 20 см по вертикали. По данным косы была охарактеризована изменчивость температуры водного столба в центральной части озера, по данным придонной платформы была получена оценка величины теплопотока на границе вода-дно с использованием градиентного метода [6]. Также была оценена величина частоты плавучести вблизи границы вода–дно [13]. Коса и придонная платформа находились в озере в период с 1 ноября 2018 по 5 октября 2019 г. Дискретность измерений составляла одну минуту.

Для анализа погодных условий района исследований использовались данные по одной из наиболее близко расположенных к озеру Вендюрскому метеостанций — МС «Петрозаводск», полученные из архива открытого доступа на сайте «Расписание погоды» по адресу gr5.ru [14]. Значения среднемесячной температуры воздуха по станции Петрозаводск за период 1961–1990 гг. были получены на сайте Всероссийского научно-исследовательского института

гидрометеорологической информации — Мирового центра данных (ФГБУ ВНИИГМИ-МЦД) [15].

Результаты и обсуждение

Погодные условия района исследований

По данным метеостанции Петрозаводск, атмосферное давление в период с сентября 2018 г. до октября 2019 г. изменялось в пределах 720–770 мм рт. ст., периоды флуктуаций давления составляли 2–15 суток. Температура воздуха характеризовалась выраженным годовым ходом: в период с октября по февраль температура понижалась, достигнув 1 февраля 2019 г. минимума -22.7°C , в период с февраля по июнь 2019 г. температура воздуха постепенно повышалась, достигнув годового максимума $+29.9^{\circ}\text{C}$ 8 июня 2019 г. Устойчивый переход температуры воздуха через 0°C в сторону понижения — 19 ноября 2018 г. Оттепели наблюдались 5 декабря 2018 г. и 9–12 февраля 2019 г. Устойчивый переход температуры воздуха через 0°C в сторону повышения — 16 марта 2019 г. Лето 2019 г. было аномально холодным; среднесуточная температура в июне изменялась в пределах $8.5\text{--}24.6^{\circ}\text{C}$, в июле $7.4\text{--}22.2^{\circ}\text{C}$, в августе $7.4\text{--}18.8^{\circ}\text{C}$. Похолодания с резким падением температуры до $10\text{--}15^{\circ}\text{C}$, усилениями ветра до $10\text{--}17$ м/с, выпадением ливневых осадков наблюдались 11–14 июня, 23 июня–1 июля, 6–17 июля, 28 июля–13 августа, 22–28 августа 2019 г. После 12 сентября температура воздуха резко понизилась до $+3\text{--}+4^{\circ}\text{C}$, на протяжении октября не превышала $+9^{\circ}\text{C}$, в последних числах октября начались заморозки до -5°C .

Среднемесячная температура воздуха с сентября 2018 г. по июнь 2019 г., а также в сентябре 2019 г. превышала климатическую норму 1961–1990 гг. (рис. 1), с наибольшим отклонением ($+5.9^{\circ}\text{C}$) в феврале 2019 г. Июль, август и октябрь 2019 г. были холоднее нормы, причем июль 2019 г. (отклонение -2.6°C) был наиболее холодным за последние 26 лет.

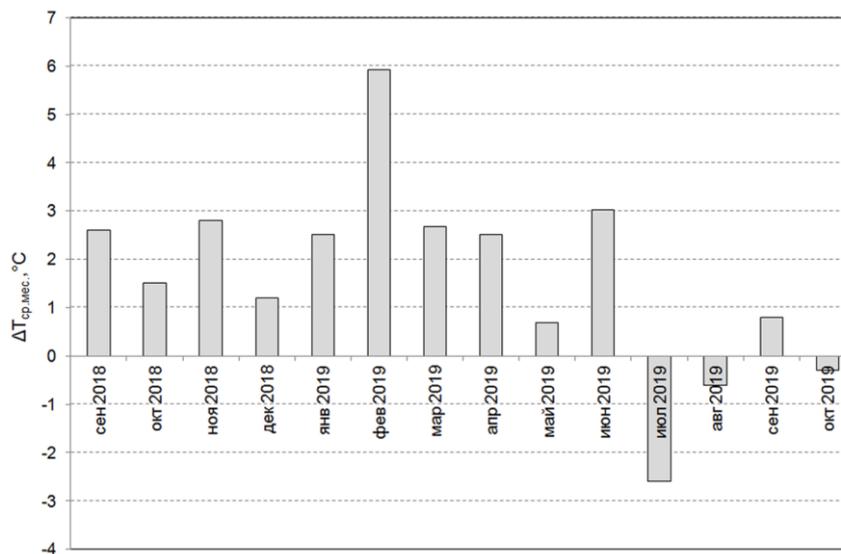


Рис. 1. Отклонение среднемесячных значений температура воздуха от климатической нормы (1961–1990 гг.) по данным метеостанции Петрозаводск за период с сентября 2018 г. по октябрь 2019 г.

Составлено авторами

Температура водной толщи озера Вендюрского в период с ноября 2018 г. по октябрь 2019 г.

Образование прибрежного льда на оз. Вендюрском началось 20 ноября, образование сплошного ледяного покрова произошло 25–27 ноября 2018 г. Взлом льда происходил 1–2 мая, полное перемешивание водной толщи после освобождения озера ото льда произошло 3 мая 2019 г.; продолжительность ледостава составила 158–160 суток, что хорошо согласуется со среднемноголетними датами ледовых явлений и продолжительностью ледостава на озере [16].

При образовании сплошного льда средняя температура по водному столбу в центральной части озера Вендюрского составляла около 0.4°C . В течение зимы температура водной толщи повышалась, наиболее интенсивно в придонных слоях центральной котловины, где достигла 4.8°C к концу периода ледостава.

После освобождения озера ото льда (1–2 мая) началось повышение температуры водной толщи. Периоды установления слабой стратификации сменялись периодами гомотермии при полном перемешивании водной толщи озера на фоне холодной ветреной погоды. На этапе открытой воды в 2019 г. было зафиксировано шесть периодов длительного нахождения озера в полностью перемешанном состоянии: 3–12 мая, 26 мая–3 июня, 8–14 июля, 30 июля–6 августа, 24–28 августа и, начиная с 11 сентября, до замерзания озера.

Слабая стратификация со средним температурным градиентом по водному столбу $0.3\text{--}0.4^{\circ}\text{C}/\text{м}$ и разницей температур между поверхностным и придонным слоями $2\text{--}7^{\circ}\text{C}$ формировалась в озере в периоды 16–23 мая, 6–28 июня, 21–29 июля, 29 августа–4 сентября. По данным предыдущих лет исследований установлено, что стратификация под влиянием погодных условий (при прохождении циклонов с усилениями ветра и понижением температуры воздуха) может ослабевать и полностью разрушаться до 3–5 раз на этапе весенне–летнего нагревания [17].

Годовой максимум температуры поверхности озера $+21.24^{\circ}\text{C}$ был достигнут 27 июля 2019 г., максимум температуры придонного слоя в центральной глубоководной котловине $+18.6^{\circ}\text{C}$ — 23 июня 2019 г. Годовой максимум теплосодержания столба воды в центральной глубоководной части озера был достигнут 23 июня 2019 г., что заметно раньше сроков, установленных по данным измерений в летние месяцы 2007–2016 гг., когда максимум придонной температуры в центральной части озера Вендюрского достигал $+17.2\text{--}19.7^{\circ}\text{C}$ в середине июля– начале августа [17, 18].

С начала сентября 2019 г. началось быстрое понижение температуры водной толщи оз. Вендюрского, с середины сентября озеро охладилось в состоянии гомотермии.

Температура, теплопоток и частота плавучести вблизи границы вода–донные отложения.

Изменчивость температуры, теплопотока и частоты плавучести вблизи границы вода–дно в центральной глубоководной части озера Вендюрского по данным придонной платформы за период с 1 ноября 2018 г. по 10 мая 2019 г. приведены на рис. 2. На рис. 3 и 4 приведены эти показатели в периоды установления и взлома льда на оз. Вендюрском в зимний сезон 2018–2019 гг.

В предледоставный период температура поверхности донных отложений понижалась вслед за понижением температуры водной толщи и к моменту

появления сплошного льда (27 ноября 2018 г.) в центральной глубоководной части озера достигла годового минимума 0.9°C (рис. 2, а, 3, а); при этом на глубине 14 см в донных отложениях температура составляла 2.6°C , градиент температуры в верхнем 14-см слое донных отложений превышал $12^{\circ}\text{C}/\text{м}$.

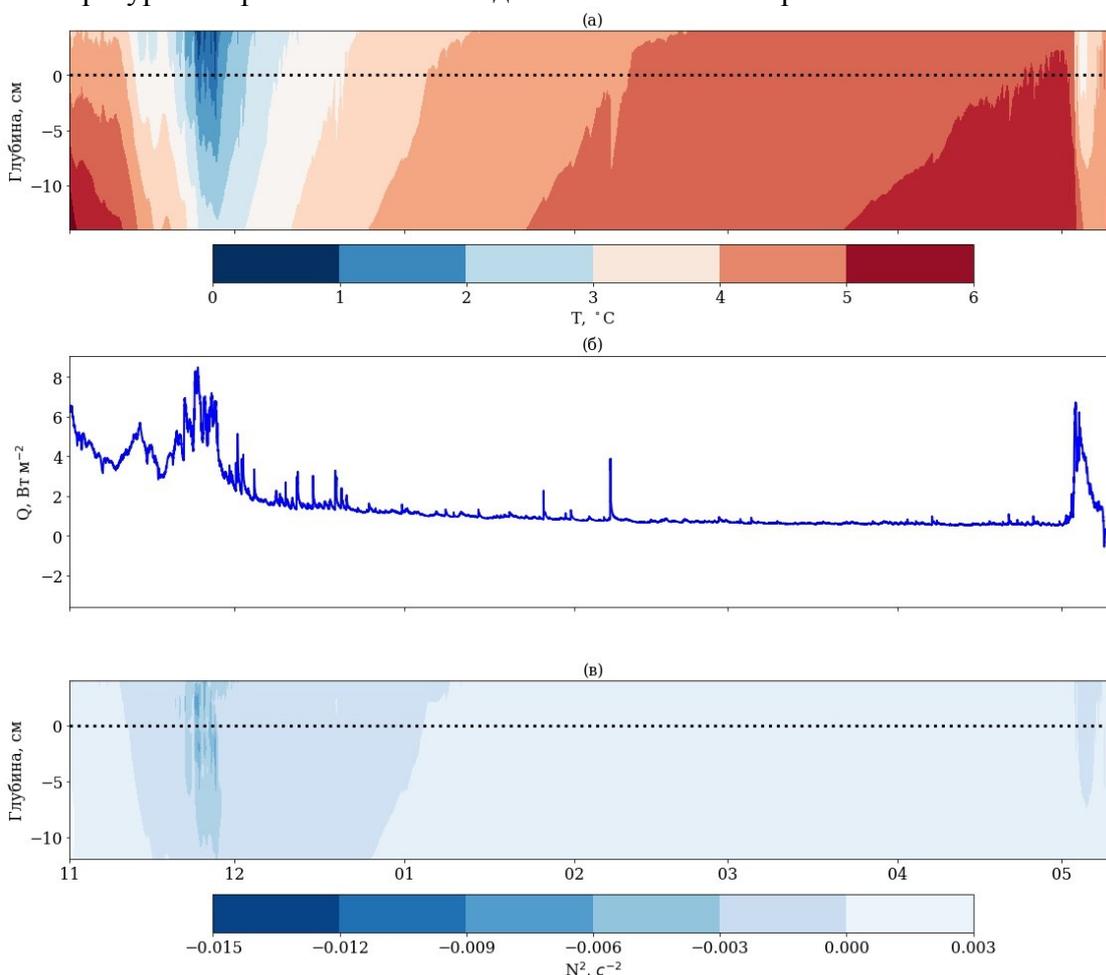


Рис. 2. Температура (а), теплоток (б) и квадрат частоты плавучести (в) верхнего слоя донных отложений и придонного слоя воды в центральной глубоководной части оз. Вендюрского в период с 1 ноября 2018 г. по 10 мая 2019 г.

Здесь и на рис. 2–6 пунктирная линия обозначает границу вода–дно.

Составлено авторами

Сразу после появления сплошного льда температура поверхности донных отложений начала быстро повышаться, достигнув к концу первой недели ледостава 2.5°C (3 декабря 2018 г.), к концу первого месяца ледостава 3.5°C (27 декабря 2018 г.); на глубине 14 см в донных отложениях в эти даты наблюдалась температура 3.1 и 4.0°C , соответственно. Затем скорость повышения температуры замедлилась, и к концу ледостава (1–2 мая 2019 г.) температура поверхности донных отложений в центральной глубоководной части озера составляла 4.9°C , на глубине 14 см в донных отложениях — 5.1°C . Температурный градиент в верхнем 14-см слое донных отложений к концу первой недели ледостава уменьшился до $3^{\circ}\text{C}/\text{м}$, затем в течение зимы продолжал уменьшаться и в конце периода ледостава не превышал $1^{\circ}\text{C}/\text{м}$.

Изменение теплопотока на границе вода–донные отложения в малом озере в течение года

Величина теплопотока, направленного из донных отложений в воду, достигала в предледоставный период 6–7 Вт/м², в момент появления сплошного льда на озере увеличилась до 7–8 Вт/м² (рис. 2, б, 3, б). После появления сплошного льда по мере выравнивания температуры придонного слоя воды и верхнего слоя донных отложений величина теплопотока быстро уменьшалась, с середины января (2-й месяц ледостава) не превышая 1 Вт/м². К концу ледостава величина теплопотока уменьшилась до 0.7 Вт/м².

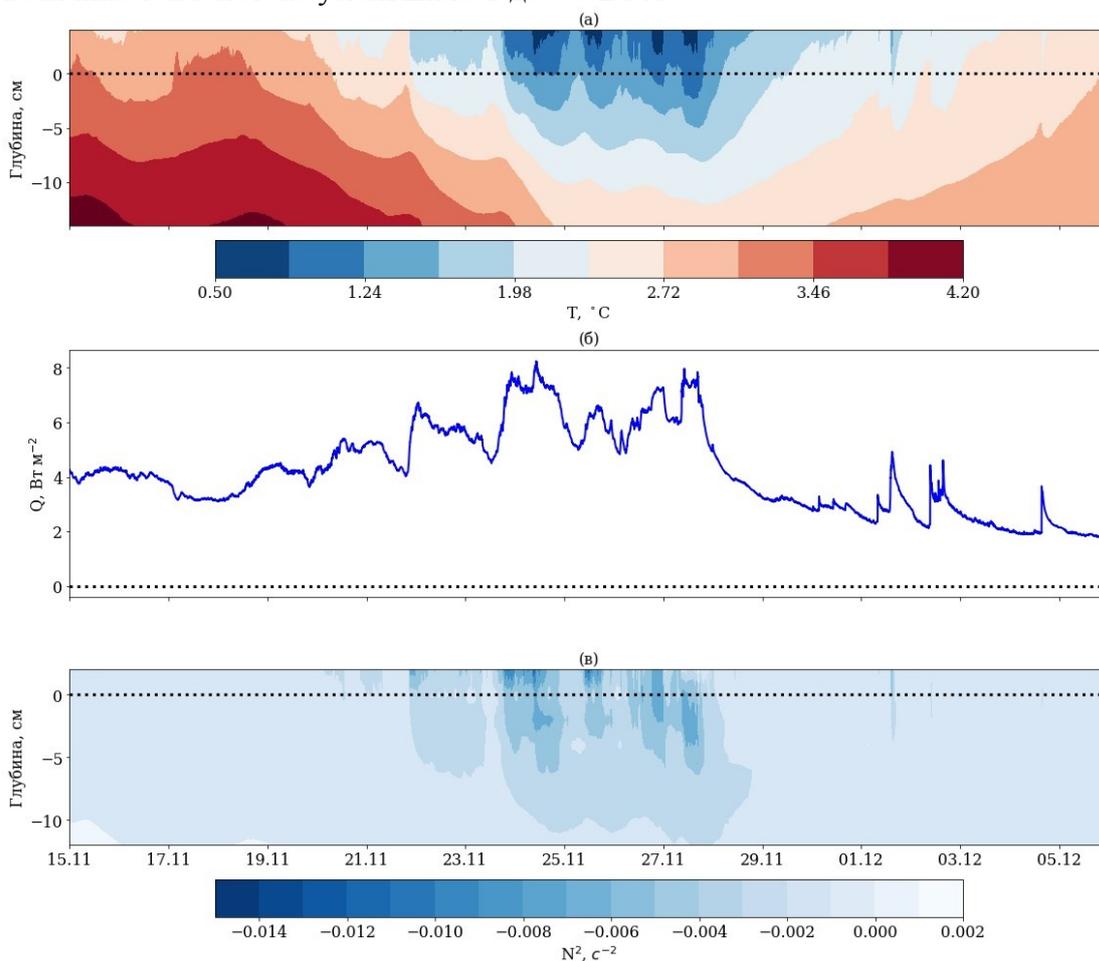


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для периода с 15 ноября по 5 декабря 2018 г. Составлено авторами

Изменчивость квадрата частоты плавучести N^2 для периода с 1 ноября 2018 г. до 10 мая 2019 г. приведена на рис. 2, в. В течение большей части зимы в верхнем слое донных отложений значения N^2 изменялись в пределах от -0.003 до 0.003 с⁻². Отрицательные значения N^2 соответствуют периодам неустойчивости. В период установления льда на озере значения N^2 достигали -0.015 с⁻² (рис. 3, в), в момент взлома льда -0.006 с⁻² (рис. 4, в).

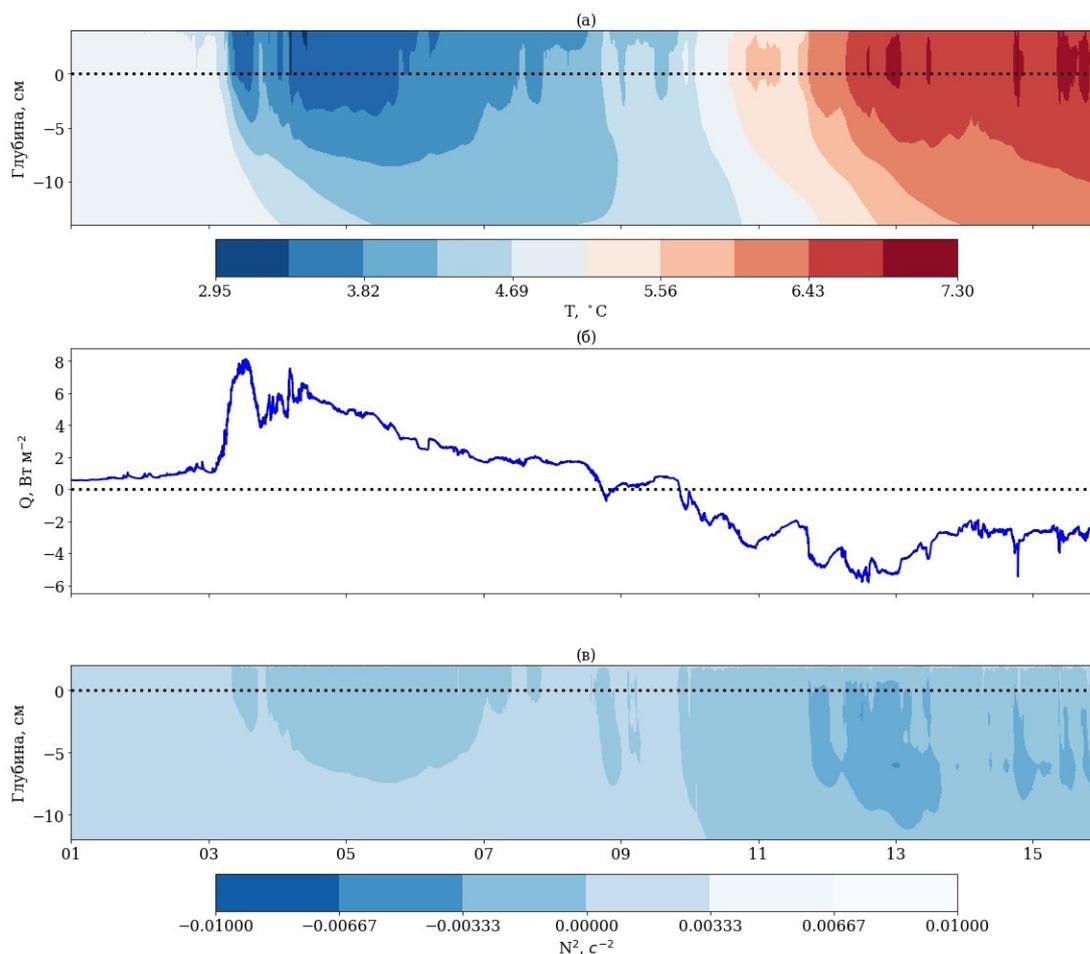


Рис. 4. То же, что на рис. 2, для периода с 1 по 15 мая 2019г.

Составлено авторами

После взлома льда на фоне полного перемешивания водной толщи озера 3–4 мая 2019 г. наблюдалось кратковременное уменьшение температуры поверхности донных отложений до 3.0–3.2° С.

В период взлома льда величина теплопотока, направленного из донных отложений в воду, увеличилась до 6–8 Вт/м², затем в течение недели постепенно уменьшилась до 1–2 Вт/м². Теплопоток поменял знак 9–10 мая 2019 г. (рис. 4, б), то есть через неделю после освобождения озера ото льда и полного перемешивания его водной толщи началось накопление тепла верхним слоем донных отложений.

Начиная с 5 мая, температура поверхности донных отложений в глубоководной части озера постепенно повышалась, при этом периоды плавного повышения чередовались с моментами скачкообразного увеличения температуры, которые происходили при полном перемешивании водной толщи озера. К концу мая температура поверхности донных отложений достигла 11° С, к концу второй декады июня 13° С.

На протяжении июня температура поверхности донных отложений продолжала повышаться, достигнув годового максимума 17.75° С 4 июля. В июле-августе температура поверхности донных отложений изменялась в пределах 13.3–17.14° С, при этом наблюдалось два продолжительных периода понижения

температуры — 8–14 июля, когда температура понизилась до 15° С и 29 июля–7 августа с понижением температуры до 13.3° С. В период с 8 августа до 11 сентября температура поверхности донных отложений постепенно увеличивалась, достигнув 12 сентября 15.8° С (рис. 5, а). Начиная с 12 сентября наблюдалось резкое уменьшение температуры поверхности донных отложений в центральной глубоководной котловине, и к 26 сентября она достигла 9° С, а к концу периода измерений — 3 октября — 7.2° С.

Величина теплотока, направленного из водной толщи в донные отложения, в июне-июле составляла 4–6 Вт/м², периодически увеличиваясь до 8–12 Вт/м² в моменты полного перемешивания водной толщи озера (рис. 5, в).

Продолжительные похолодания, обусловленные вторжением арктических воздушных масс и прохождением Северо-Атлантических циклонов, часто повторяются в Карелии в летние месяцы [19], что способствует полному перемешиванию водной толщи полимиктических озер и заглужению сезонного термоклина димиктических озер [20]. Обычно при таком перемешивании происходит скачкообразное повышение температуры придонного слоя воды [6, 18]. По погодным условиям июль 2019 г. был аномально холодным [19]. На фоне длительного похолодания, которое началось 28 июля и продолжалось до конца первой декады августа, температура водной толщи озера и верхнего слоя донных отложений понижалась (рис. 5, а, б).

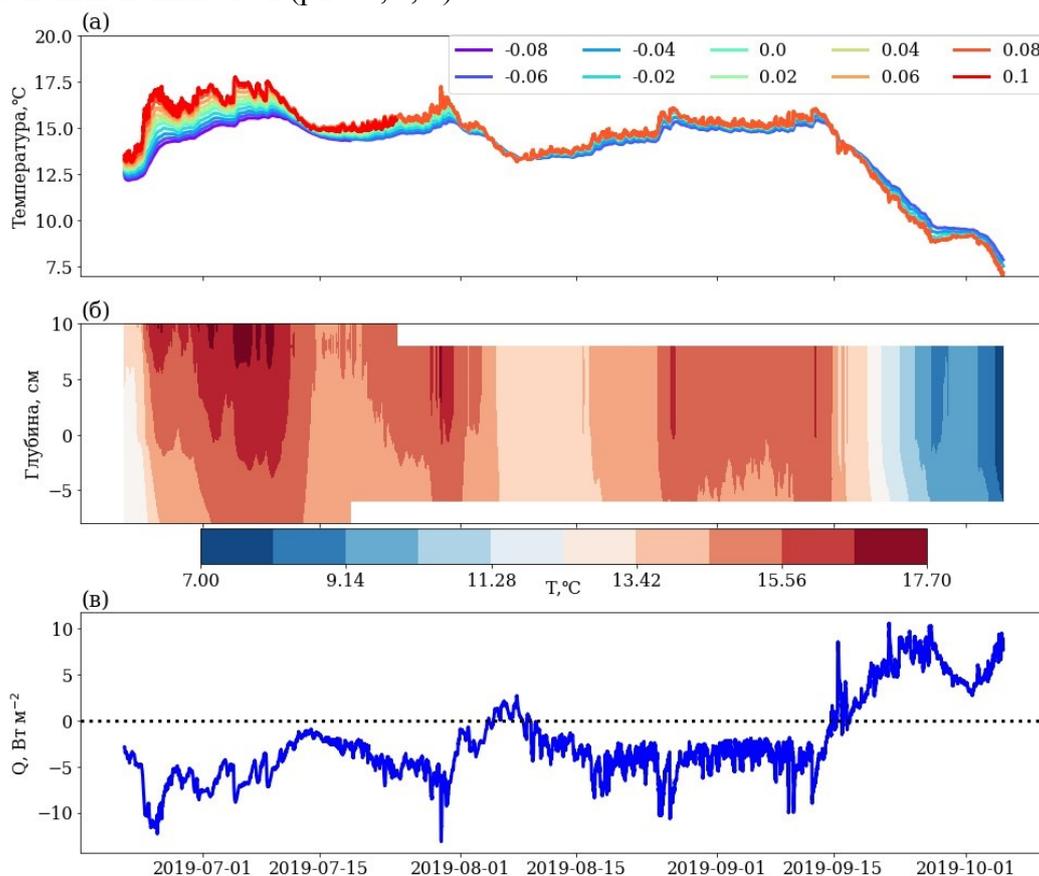


Рис. 5. Температура (а, б) и теплоток (в) верхнего слоя донных отложений и придонного слоя воды в центральной глубоководной части оз. Вендюрского в период с 23 июня по 3 октября 2019 г.

Составлено авторами

В моменты, когда температура воды становилась ниже температуры поверхности донных отложений, происходила смена знака теплопотока на границе вода-дно. При этом теплопоток был направлен из донных отложений в воду, и донные отложения теряли тепло. В моменты, когда температура воды становилась выше температуры поверхности донных отложений, теплопоток опять менял знак, и был направлен в донные отложения, то есть происходило накопление тепла в них. Такое изменение направления теплопотока происходило с близкой к суткам периодичностью в течение 4–10 августа 2019 г. Величина теплопотока, направленного из донных отложений в воду, достигала при этом 0.5–2.5 Вт/м². Таким образом, впервые за годы исследований, начиная с 2007 г., была зафиксирована смена знака теплопотока вблизи границы вода-дно в течение первой декады августа (рис. 5, в, б). В другие годы исследований смена знака теплопотока происходила лишь в середине сентября, а в течение летних месяцев теплопоток был непрерывно направлен из воды в донные отложения, то есть, происходило непрерывное накопление тепла донными отложениями [6].

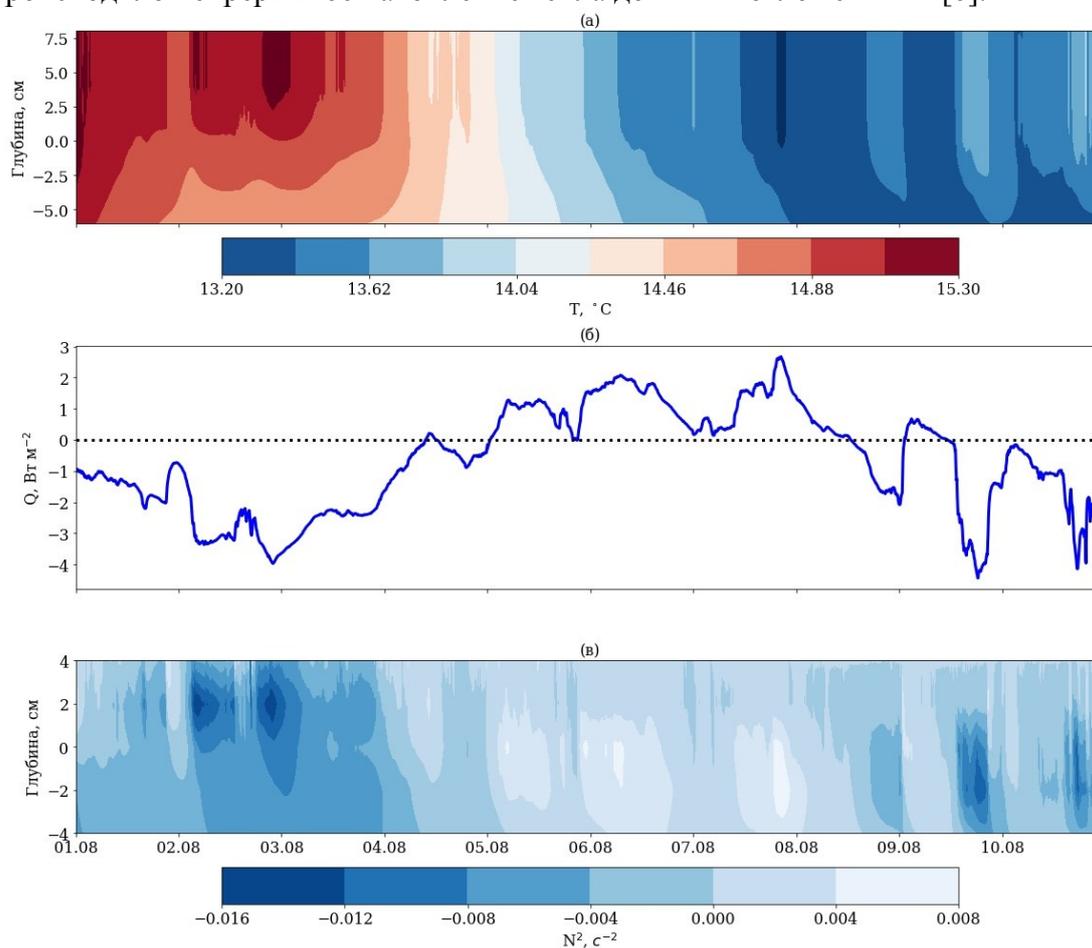


Рис. 6. То же, что на рис. 2, для периода с 1 по 10 августа 2019 г.
 Составлено авторами

Затем в начале второй декады августа 2019 г. на фоне очередного потепления началось устойчивое повышение температуры водной толщи озера, и, когда температура воды стала выше температуры поверхности донных отложений, теплопоток опять поменял знак, то есть, процесс накопления тепла в

них продолжился. Это произошло 10 августа 2019 г. (рис. 6, б). На протяжении второй, третьей декад августа и первой декады сентября 2019 г. теплопоток был направлен в донные отложения, его величина при этом составляла 4–6 Вт/м², увеличиваясь до 10–12 Вт/м² в моменты скачкообразного повышения температуры поверхности донных отложений при очередном полном перемешивании водной толщи озера (рис. 5, в).

Выводы

Анализ данных измерений температуры в центральной глубоководной части небольшого мелководного озера Вендюрского позволил выявить основные особенности изменчивости температуры водной толщи и теплопотока на границе вода-донные отложения в течение года. Показано, что в предледоставный период, в период ледостава и в течение недели после взлома льда, теплопоток был направлен из донных отложений в воду, величина его при этом менялась в широких пределах от 0.5 до 6–8 Вт/м². Со второй декады мая до второй декады сентября теплопоток был направлен из воды в донные отложения, достигая 10–12 Вт/м² в моменты полного перемешивания водной толщи озера, и не превышая 4–6 Вт/м² в периоды установления стратификации. Полученные в данной работе оценки изменчивости теплопотока на границе вода-донные отложения в годовом цикле могут быть использованы в численных моделях для корректного задания потоков тепла [10] и адекватного описания годового хода вертикальной термической структуры мелководных озер.

Впервые за годы ежегодных измерений на озере, начиная с лета 2007 г., была зафиксирована смена знака теплопотока на границе водной толщи озера с донными отложениями в первой декаде августа на фоне продолжительного похолодания. Обычно смена знака теплопотока происходит в середине сентября. Пока не ясно, могут ли меняющиеся погодные условия летних месяцев заметно изменить степень накопления тепла донными отложениями озер, но очевидно, что текущие изменения климата [21] вносят определенный вклад в термический режим водоемов, что обуславливает необходимость проведения дальнейших исследований.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН. Экспедиционные исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ 18-05-60291.

Литература

1. Golosov, S., Ignatieva N. Hydrothermodynamic features of mass exchange across the sediment-water interface in shallow lakes // *Hydrobiologia*. 1999. V. 408–409. P. 153–157. doi:10.1023/A:1017067532346.
2. Bernhardt J, Kirillin G., Hupfer M. Periodic convection within littoral lake sediments on the background of seiche-driven oxygen fluctuations // *Limnol. Oceanogr: Fluids and Environments*. 2014. No. 4. P. 17–33 URL: <https://doi.org/10.1215/21573689-2683238>
3. Bengtsson L., Svensson T. Thermal regime of ice-covered Swedish lakes // *Nordic Hydrol*. 1996. No. 27. P. 39–56.

4. Kirillin G., Engelhardt C., Golosov S. Transient convection in upper lake sediments produced by internal seiching // *Geophysical research letters*. 2009. V. 36. L18601, DOI: 10.1029/2009GL040064, 2009
5. 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
6. Гавриленко Г. Г., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Пальшин Н. И., Митрохов А. В., Тержевик А. Ю. Теплопоток на границе вода-донные отложения в небольшом озере // *Труды КарНЦ РАН. 2015. Серия Лимнология. № 9. С. 3–9.* DOI: 10.17076/lim72.
7. Тихомиров А. И., Егоров А. Н. Термический режим и теплозапасы // *Озеро Кубенское. Ч. 1. Гидрология. Л.: Наука, 1977. С. 257–285.*
8. Кузьменко Л. Г. Термический режим водной массы и донных отложений озера // *Биологическая продуктивность озера Красного. Л.: Наука, 1976. С. 18–36.*
9. Ryzanzhin S. Thermophysical Properties of lake sediments and water-sediments heat interaction. Department of Water Resources Engineering, Institute of Technology, Lund University, Lund, Sweden. 1997. Tech. Rep. 3214.
10. Ибраев Р. А. Математическое моделирование термогидродинамических процессов в Каспийском море. М.: Геос, 2008. 127 с.
11. Golosov S., Kirillin G. A parameterized model of heat storage by lake sediments // *Environmental Modelling & Software*. 2010. V. 25. P. 793-801.
12. Митрохов А. В., Пальшин Н. И. Автономное устройство для измерения профиля температуры в придонных слоях воды и грунта. Патент на полезную модель № 153787. 2015
13. Gill A. E. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. Academic Press. 1982. 662 p.
14. Расписание погоды. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rp5.ru/> Дата обращения 14 октября 2020 г.
15. Мировой центр данных. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation>. Дата обращения 14 октября 2020 г.
16. Zdorovenov R., Palshin N., Zdorovennova G., Efremova T., Terzhevnik A. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake // *Estonian Journal of Earth Sciences*. 2013. 61(1). P. 26–32. URL: <https://doi.org/10.3176/earth.2013.03>
17. Гавриленко Г. Г., Здоровеннова Г. Э., Волков С. Ю., Богданов С. Р., Здоровеннов Р. Э. Устойчивость водной массы и ее влияние на кислородный режим полимиктического озера // *Геополитика и экогеодинамика регионов*. 2018. Т. 4 (14). № 1. С. 57–71.
18. Здоровеннова Г. Э., Гавриленко Г. Г., Здоровеннов Р. Э., Mammarella I., Ojala A., Heiskanen J., Тержевик А. Ю. Эволюция температуры водной толщи бореальных озер на фоне изменений регионального климата // *Известия РГО*. 2017. Т. 149. Вып. 6. С. 59–74.
19. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2019 г. Петрозаводск, 2020. 248 с.
20. Mammarella I., Gavrylenko G., Zdorovennova G., Ojala A., Erkkilä K.-M., Zdorovenov R., Stepanyuk O., Palshin N., Terzhevnik A., Vesala T., Heiskanen J. Effects of similar weather patterns on the thermal stratification, mixing regimes and

hypolimnetic oxygen depletion in two boreal lakes with different water transparency. *Boreal Env. Res.* 2018. No. 23. P. 237–247.

21. IPCC — The Intergovernmental Panel on Climate Change. Reports. 2019. URL: <https://www.ipcc.ch/reports/> (дата обращения 14 октября 2020 г.).

G. E. Zdorovenova,
G. G. Gavrilenko,
N. I. Palshin,
T. V. Efremova,
S. R. Bogdanov,
A. Yu. Terzhevik,
R. E. Zdorovenov

Change of heat flux at the water-bottom sediments boundary in a small lake during the year

Northern water problems Institute of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences,
Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russian Federation
e-mail: zdorovenova@gmail.com

Abstract. *The features of the variability of the heat flux at the boundary of the water column with bottom sediments in the central part of the small polymictic Lake Vendyurskoe (southern Karelia) were analyzed according to the data of year-round temperature measurements from November 2018 to October 2019. It was shown that the heat flux directed from the bottom sediments into the water reached 6–8 W/m² in the pre-ice period and at the moments of ice formation and breaking, and did not exceed 1 W/m² during most of the winter. A week after the ice-off (May 3–4, 2019) the water column was completely mixed, the heat flux changed its sign, and heat accumulation in the upper layer of bottom sediments began. The heat flux directed to bottom sediments was 4–6 W/m², periodically increasing to 8–12 W/m² from mid-May to late July and from the second decade of August to the first decade of September. Against the background of a prolonged cooling during the first ten days of August, the heat flux changed sign with daily frequency, the amplitude of daily fluctuations reached ±2.5 W/m². Autumn cooling of the Lake Vendyurskoe began in early September 2019, the heat flux sign changed on September 14–16, 2019.*

Keywords: shallow lake, water temperature, bottom sediments, heat flux.

References

1. Golosov, S., Ignatieva N. Hydrothermodynamic features of mass exchange across the sediment-water interface in shallow lakes // *Hydrobiologia.* 1999. V. 408–409. P. 153–157. doi:10.1023/A:1017067532346. (In English)
2. Bernhardt J, Kirillin G., Hupfer M. Periodic convection within littoral lake sediments on the background of seiche-driven oxygen fluctuations // *Limnol. Oceanogr: Fluids and Environments.* 2014. V. 4. P. 17–33. URL: <https://doi.org/10.1215/21573689-2683238> (In English)
3. Bengtsson L., Svensson T. Thermal regime of ice-covered Swedish lakes // *Nordic Hydrol.* 1996. No. 27. P. 39–56. (In English)
4. Kirillin G., Engelhardt C., Golosov S. Transient convection in upper lake sediments produced by internal seiching // *Geophysical research letters.* 2009. 36. L18601, doi:10.1029/2009GL040064, 2009 (In English)
5. 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)

6. Gavrilenko G. G., Zdorovennova G. E., Zdorovennov R. E., Pal'shin N. I., Mitrokhov A. V., Terzhevik A. Yu. Teplopotok na granitse voda-donny'e otlozheniya v nebol'shom ozere // Trudy KarNCz RAN. 2015. Seriya Limnologiya. No. 9. S. 3–9. DOI: 10.17076/lim72. (In Russian)
7. Tikhomirov A. I., Egorov A. N. Termicheskij rezhim i teplozapasy // Ozero Kubenskoe. Ch. 1. Gidrologiya. L.: Nauka, 1977. S. 257–285. (In Russian)
8. Kuz'menko L.G. Termicheskij rezhim vodnoj massy i donny'kh otlozhenij ozera // Biologicheskaya produktivnost' ozera Krasnogo. L.: Nauka, 1976. S. 18–36. (In Russian)
9. Ryzanzhin S. Thermophysical Properties of lake sediments and water-sediments heat interaction. Department of Water Resources Engineering, Institute of Technology, Lund University, Lund, Sweden. 1997. Tech. Rep. 3214. (In English)
10. Ibraev R. A. Matematicheskoe modelirovanie termogidrodinamicheskikh processov v Kaspijskom more. M.: Geos, 2008. 127 s. (In Russian)
11. Golosov S., Kirillin G. A parameterized model of heat storage by lake sediments // Environmental Modelling & Software. 2010. V. 25. P. 793–801. (In English)
12. Mitrokhov A. V., Pal'shin N. I Avtonomnoe ustrojstvo dlya izmereniya profilya temperatury v pridonny'kh sloyakh vody i grunta. Patent na poleznuyu model' no. 153787. 2015. (In Russian)
13. Gill A. E. Atmosphere-Ocean Dynamics. Academic Press. 1982. 662 p. (In English)
14. Raspisanie pogody. URL: <https://rp5.ru/> (date of treatment October 14, 2020). (In Russian)
15. Mirovoj centr danny'kh. URL: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation>. (date of treatment October 14, 2020). (In English)
16. Zdorovennov R. Palshin N., Zdorovennova G., Efremova T., Terzhevik A. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake // Estonian Journal of Earth Sciences. 2013. 61(1). P. 26–32. <https://doi.org/10.3176/earth.2013.03> (In English)
17. Gavrilenko G. G., Zdorovennova G. E., Volkov S. Yu., Bogdanov S. R., Zdorovennov S. R. Ustojchivost' vodnoj massy i ee vliyanie na kislorodnyj rezhim polimikticheskogo ozera. // Geopolitika i ekogeodinamika regionov. 2018. T. 4 (14). No. 1, S. 57–71. (In Russian)
18. 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. no 6. S. 59–4. (In Russian)
19. Gosudarstvennyj doklad o sostoyanii okruzhayushhej sredej Respubliki Kareliya v 2019 g. Petrozavodsk, 2020. 248 s. (In Russian)
20. Mammarella I., Gavrylenko G., Zdorovennova G., Ojala A., Erkkilä K.-M., Zdorovennov R., Stepanyuk O., Palshin N., Terzhevik A., Vesala T., Heiskanen J. Effects of similar weather patterns on the thermal stratification, mixing regimes and hypolimnetic oxygen depletion in two boreal lakes with different water transparency. Boreal Env. Res. 2018, 23: P. 237–247. (In English)
21. IPCC — The Intergovernmental Panel on Climate Change. Reports. 2019. URL: <https://www.ipcc.ch/reports/> (date of treatment October 14, 2020).

Поступила в редакцию 05.11.2020 г.