

УДК 556.555.5

ТЕМПЕРАТУРА И РАСТВОРЕННЫЙ КИСЛОРОД В ОЛИГОТРОФНОЙ ЛАМБЕ ЗИМОЙ

¹Здоровеннова Г.Э., ²Тимофеева В.В., ¹Тержевик А.Ю., ¹Голосов С.Д., ¹Зверев И.С.,
¹Здоровеннов Р.Э., ¹Богданов С.Р., ¹Гавриленко Г.Г., ¹Ефремова Т.В., ¹Пальшин Н.И.

¹Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»,
Петрозаводск, e-mail: zdorovennova@gmail.com;

²Институт леса, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск

Длительные высокочастотные измерения температуры воды и содержания растворенного кислорода в малой лесной ламбе, расположенной в южной Карелии, выполненные с октября 2019 по июнь 2020 гг., позволили установить ряд особенностей ее термического и кислородного режимов в период ледостава. Установлено, что на этапе осеннего охлаждения водная толща ламбы хорошо насыщена кислородом. Температура водного столба понижается, однако в придонном слое толщиной 1,5 м сохраняется выраженный градиент температуры. При образовании ледяного покрова средняя температура водного столба близка к 4 °С, температура придонного слоя превышает 7,5 °С. В течение всей зимы наблюдается понижение температуры придонного слоя, при этом средняя температура водного столба практически не меняется за счет перераспределения тепла в вышележащие слои. В поверхностном слое водной толщи содержание кислорода остается высоким на протяжении всего периода ледостава (8–10 мг/л при насыщении 70–100%). В придонных слоях происходит уменьшение содержания кислорода до 1–2 мг/л при насыщении менее 20% начиная со второго месяца ледостава. Предположительно, уменьшение содержания растворенного кислорода происходит в олиготрофной ламбе за счет разложения гидрофильных мхов, заросли которых покрывают более 96% площади озера. В течение ледостава отмечаются колебания температуры и кислорода, которые могут быть связаны с гидродинамическими процессами, такими как сейши и внутренние волны, а также с феноменом неустойчивости Рэлея–Тэйлора, возникающим в придонных слоях озер при разложении органического вещества.

Ключевые слова: малое озеро, период ледостава, температура воды, растворенный кислород, макрофиты

THE TEMPERATURE AND DISSOLVED OXYGEN IN THE OLIGOTROPHIC LAMBA IN WINTER

¹Zdorovennova G.E., ²Timofeeva V.V., ¹Terzhevnik A.Yu., ¹Golosov S.D., ¹Zverev I.S.,
¹Zdorovennov R.E., ¹Bogdanov S.R., ¹Gavrilenko G.G., ¹Efremova T.V., ¹Palshin N.I.

¹Northern Water Problems Institute Karelian Research Centre RAS,
Petrozavodsk, e-mail: zdorovennova@gmail.com;

²Forest Research Institute Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk

Long-term high-frequency measurements of water temperature and the content of dissolved oxygen in a small forest lambda located in southern Karelia from October 2019 to June 2020, made it possible to establish a number of features of its thermal and oxygen regimes during the ice period. It is found that at the stage of autumn cooling, the water column of the lambda is well saturated with oxygen. The temperature of the water column decreases; however, a pronounced temperature gradient remains in the bottom 1.5 m layer. With the formation of a continuous ice cover, the average temperature of the water column is close to 4 °C, the temperature of the bottom layer exceeds 7.5 °C. Throughout the winter, a decrease in the temperature of the bottom layer observed, while the average temperature of the water column practically does not change due to the redistribution of heat to the upper layers. In the surface layer of the water column, the oxygen content remains high throughout the entire ice period (8–10 mg/l at 70–100%). In the bottom layers, the oxygen content decreases to 1–2 mg/l (less than 20%), starting from the second month of ice period. Presumably, a decrease in the content of dissolved oxygen occurs in the oligotrophic lambda due to the decomposition of hydrophilic mosses, which cover more than 96% of the lake bottom. During winter, fluctuations in temperature and oxygen content are noted, which can be associated with hydrodynamic processes (seiche and internal waves), as well as with the phenomenon of Rayleigh-Taylor instability that occurs in the bottom layers of lakes due to the decomposition of organic matter.

Keywords: a small lake, ice-period, water temperature, dissolved oxygen, macrophytes

Широко распространенные в субарктической зоне малые озера и ламбы играют важную роль в процессах тепломассообмена с атмосферой, в частности вносят большой вклад в производство парниковых газов [1, 2], что объясняет возросший в их отношении в последние годы научный интерес [3, 4]. Особенности развития экосистем малых озер и ламб определяются рядом факторов, среди которых важнейшими являются по-

ступление органического вещества с водосбора, пониженный уровень облученности водного столба за счет затенения поверхности окружающим лесом, ослабленная гидродинамика [5–7]. В условиях слабого ветрового воздействия на поверхность малых по площади озер и ламб возрастает роль конвективного перемешивания их водного столба, играющего решающую роль в переносе растворенных и взвешенных ве-

цеств [4, 6]. Термогидродинамика небольших озер и ламб, определяющая обменные процессы в водном столбе, изучена для периода ледостава крайне слабо [8, 9].

Цель исследования: изучить термический и кислородный режимы небольшой олиготрофной ламбы в период ледостава.

Материалы и методы исследования

Объект исследования. Измерения температуры и содержания растворенного кислорода (РК) проводились в период ледостава 2019–2020 гг. на небольшой лесной ламбе, расположенной на водосборе озера Вендюрского (юг Карелии, 62°14'с.ш., 33°14'в.д). Ниже приведена краткая характеристика Голубой ламбы по материалам [5].

Озерная котловина ледниково-просадочная, берега низкие, заболоченные. Длина ламбы достигает 450 м, средняя ширина – 90 м, максимальная – 110 м. Площадь зеркала – 0,039 км². Рельеф дна ровный, максимальная глубина – 8,0 м, средняя глубина – 4,2 м. Объем водной массы 0,166 млн м³. Поверхностный приток и сток отсутствуют, внешний водообмен осуществляется за счет грунтовых вод. Площадь водосбора достигает 0,25 км², удельный водосбор – 5,4. Коэффициент условного водообмена 0,56 (1,77 года). Литоральная зона Голубой ламбы занимает все ложе озерной котловины; площадь илистых грунтов составляет более 91%, песков – 6%. Вода слабо минерализована – 3,14 мг/л, имеет кислую реакцию среды (рН – 4,91). По косвенным показателям органического вещества (цветность – 2,5, перманганатная окисляемость – 2,17 мгО/л, ХПК – 5 мгО/л, БПК₅ – 0,48 мгО₂/л) водоем относят к олиготрофному классу, по содержанию биогенных элементов (Р_{общ} – 6 мкг/л, N_{общ} – 0,48 мгN/л) – к кислотрофному.

В Голубой ламбе зарегистрированы 16 видов сосудистых растений и 2 вида мхов. Из них: 6 видов – гидрофиты (*Isoetes lacustris*, *Lobelia dortmanna*, *Nuphar lutea*, *Sparganium angustifolium*; мхи: *Sphagnum auriculatum*, *Warnstorfia fluitans*), 2 – гигрогелофиты (*Calla palustris*, *Menyanthes trifoliata*), 9 – гигрофиты (*Andromeda polifolia*, *Carex canescens*, *C. Limosa*, *Chamaedaphne calyculata*, *Drosera rotundifolia*, *Eriophorum angustifolium*, *Rhododendron tomentosum*, *Scheuchzeria palustris*, *Vaccinium uliginosum*) и 1 вид – гигромезофит (*Molinia caerulea*). Степень зарастания литорали озера очень высокая – сообщества макрофитов занимают 94,2% всей акватории. Доминирующая

роль в растительном покрове Голубой ламбы принадлежит гидрофильным мхам: сфагнуму ушковидному *Sphagnum auriculatum* (более 96% площади зарослей) и варнсторфии плавающей *Warnstorfia fluitans*.

Численность фитопланктона в весенне-летние месяцы изменяется в широких пределах – от 8 до 155 тыс. кл/л, биомасса – от 0,011 до 0,219 г/м³. Максимальная скорость фотосинтеза превышает 90 мгС/м³·сут., скорость деструкции органического вещества достигает 39,5 мгС/м³·сут. Численность зоопланктона в летние месяцы изменяется в пределах 1,6–22 тыс. экз./м³, биомасса – 0,031–0,235 г/м³. Средняя численность макрозообентоса в летний период – 1417 экз./м² при средней биомассе 3,84 г/м². По предварительным данным, здесь обитает только окунь. Рыбопродуктивность невысокая и составляет примерно 1–2 кг/га.

По термическому режиму Голубую ламбу относят к метатермическому типу. Среднепогодные даты начала ледостава – 8 ноября, окончания – 7 мая. Сведения по температуре воды Голубой ламбы основываются на единичных зондированиях водной толщи [8]. Кислородный режим этого водоема не изучен.

Измерения гидрофизических параметров водной толщи Голубой ламбы в зимний сезон 2019–2020 гг. В центральной глубоководной части акватории Голубой ламбы была установлена коса, оснащенная температурными и кислородными датчиками RBR Ltd. (точность датчиков по температуре 0,002 °С, по кислороду ±1%, диапазон 0–150%). Температурные датчики были закреплены на глубинах 1,5–6,5 м с интервалом в 1 м, кислородные датчики располагались на глубинах 1,5 и 5,5 м. Интервал измерений составлял 1 минуту. Кислородный датчик на глубине 1,5 м проработал до 8 января 2020 г. Зондирование водной толщи в районе установки косы было выполнено 27 марта 2020 г. Для измерения температуры, электропроводности воды, содержания и концентрации растворенного кислорода (РК) использовался мультипараметрический зонд RBR-Concerto.

Результаты исследования и их обсуждение

Изменение температуры и концентраций РК в водной толще Голубой ламбы в зимний сезон 2019–2020 гг. представлено на рис. 1. По данным косы установлено, что ледостав начался на Голубой ламбе 31 октября 2019 г.,

а закончился 9 мая 2020 г. В предледоставный период происходило понижение температуры воды на всех горизонтах измерений, при этом в слое 1,5–5,5 м температура была однородна, резко повышаясь в нижележащем метровом слое, градиент температуры в котором достигал $4^{\circ}\text{C}/\text{м}$.

При установлении сплошного ледяного покрова температура воды на глубине 1,5 м составляла $2,96^{\circ}\text{C}$, на глубине

5,5 м – $3,38^{\circ}\text{C}$, на глубине 6,5 м – $7,96^{\circ}\text{C}$, средняя температура в слое 1,5–6,5 м достигала $4,02^{\circ}\text{C}$ (рис. 2). После образования сплошного льда температура на глубинах 1,5–5,5 м начала повышаться и достигла 4°C 4 ноября на глубине 5,5 м, 12 ноября на глубине 3,5 м, 8 января 2020 г. на глубине 1,5 м (рис. 1). Средняя температура слоя 1,5–5,5 м превысила 4°C 7 декабря и к концу ледостава увеличилась до $4,4^{\circ}\text{C}$.

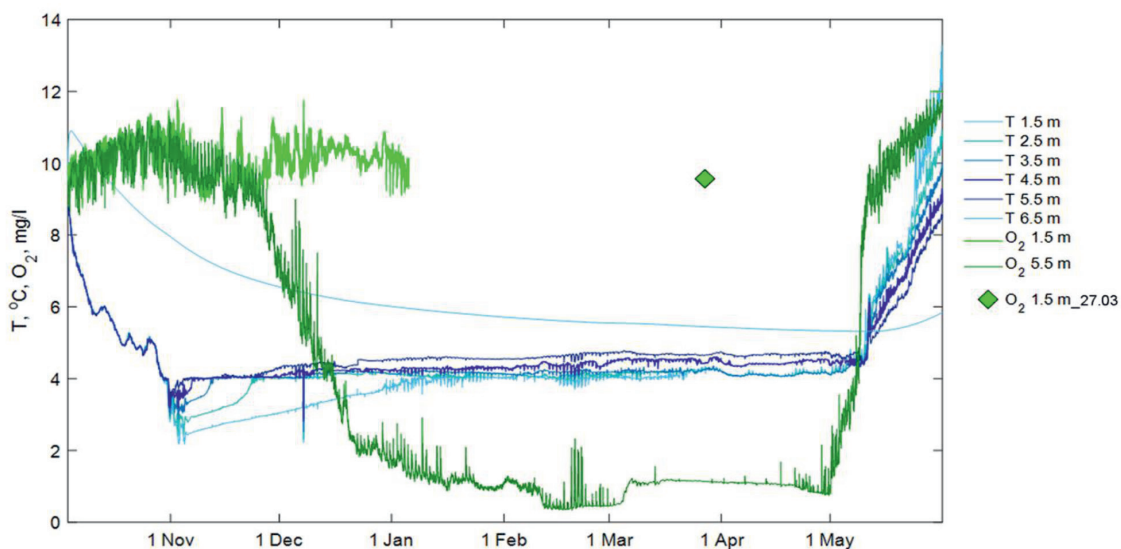


Рис. 1. Изменение температуры воды и концентраций РК в водной толще Голубой ламбы в период с 3 октября 2019 г. по 31 мая 2020 г. Символом отмечена концентрация РК на глубине 1,5 м 27 марта 2020 г. (по данным зондирования)

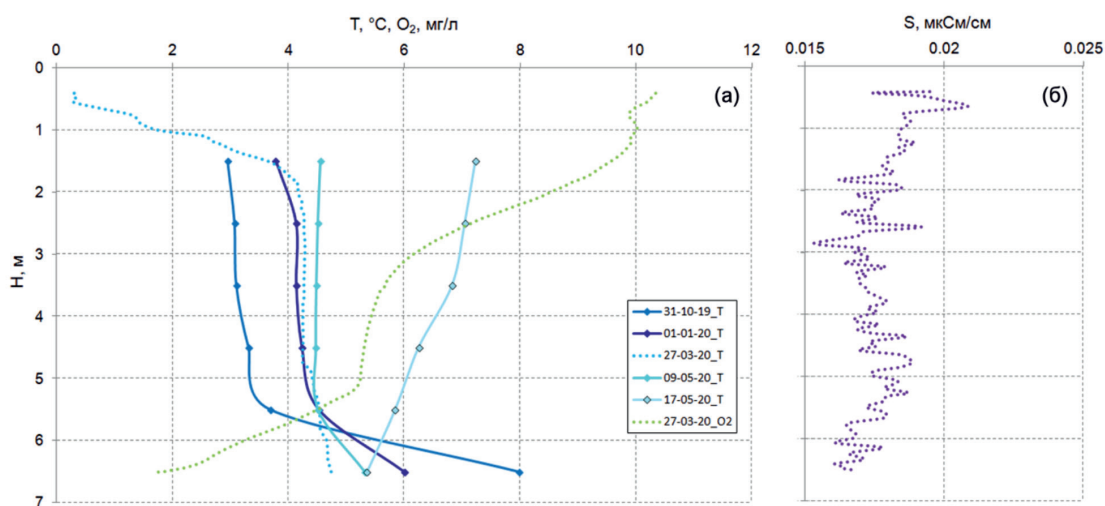


Рис. 2. Вертикальные профили температуры воды и концентрации растворенного кислорода (а) и электропроводности воды (б) в зимний сезон 2019–2020 гг. в Голубой ламбе. Данные вертикального зондирования 27 марта 2020 г. показаны пунктирными линиями. Символами обозначены глубины датчиков измерений на косе

Таким образом, водная толща ламбы в слое 1,5–5,5 м находилась в неустойчивом состоянии в течение большей части зимы, градиент температуры в этом слое не превышал 0,1–0,2 °С/м. При этом температура на глубине 6,5 м была заметно выше, чем в слое 1,5–5,5 м, и понижалась в течение всей зимы, т.е. происходило перераспределение тепла из придонного слоя вверх по водному столбу. Градиент температуры в нижнем метровом слое водной толщи в течение зимы постепенно уменьшался от 4 °С/м в первые дни ледостава до 0,6 °С/м в последние дни существования льда. Вертикальное распределение электропроводности по данным зондирования 27 марта 2020 г. (рис. 2, б) характеризовалось повышенными значениями (0,018–0,020 мкСм/см) в поверхностном 2-метровом слое, что может быть связано с выходом солей при образовании льда [8]. Ниже значения электропроводности изменялись в пределах 0,015–0,018 мкСм/см. Следовательно, изменения этого параметра по вертикали не оказывали существенного влияния на устойчивость водного столба.

Влияние весенней подледной конвекции на термический режим Голубой ламбы было выражено слабо. Суточная изменчивость температуры воды в поверхностном слое появилась начиная с 20 марта. Повышение температуры воды на 0,02–0,20 °С происходило в дневные часы с 7–9 ч утра до 14–16 ч, затем температура постепенно понижалась и к 20–21 ч достигала начального значения. Поскольку температура всей водной толщи, за исключением тонкого подледного слоя, была выше 4 °С, то повышение температуры поверхностного слоя привело к усилению стратификации в верхней части водного столба. После освобождения поверхности ламбы ото льда (9–10 мая 2020 г.) полного перемешивания водной толщи не произошло. Как видно на рис. 2, а температура воды на горизонте 1,5 м в период с 9 по 17 мая 2020 г. вследствие радиационного прогрева повысилась с 4,55 °С до 7,23 °С, в этот же период температура на горизонте 6,5 м не изменилась. Постепенное повышение температуры придонного слоя ламбы началось с третьей декады мая, и к 23 июня 2020 г. она достигла 7,55 °С, при этом температура на глубине 1,5 м достигала 21 °С.

В предледоставный период концентрация РК на глубинах 1,5 и 5,5 м была практически одинаковой и постепенно повыша-

лась в пределах 9,5–11,5 мг/л (насыщение 80–100%). В течение трех первых недель ледостава концентрация РК на горизонтах измерений существенно не изменялась, при этом, однако, отмечались колебания РК с амплитудой, превышающей 1 мг/л. На глубине 5,5 м преобладал суточный период колебаний, а на глубине 1,5 м были более выражены колебания с периодом в несколько десятков часов. В течение второго месяца ледостава концентрация РК на глубине 5,5 м понизилась до 2 мг/л (насыщение менее 20%). В дальнейшем на глубине 5,5 м концентрация РК оставалась на низком уровне (не более 1 мг/л при насыщении менее 10%) до конца зимы.

Концентрация РК на глубине 1,5 м составляла 9–11 мг/л при насыщении 70–95% в течение первых двух месяцев ледостава. По данным зондирования 27 марта установлено, что в поверхностном 2-метровом слое озера концентрация РК составляла 8–10 мг/л (насыщение 90–100%), в слое 2–3 м снижалась до 6 мг/л (60%), в слое 3–5 м – до 5 мг/л (50%), в придонном слое 5–6,7 м – до 1,7 мг/л (20%). Предположительно, уменьшение содержания РК в придонном слое Голубой ламбы зимой происходит за счет разложения гидрофильных мхов, заросли которых покрывают более 96% площади литорали. Рост концентраций РК на глубине 5,5 м начался 1 мая, и к моменту взлома льда (9 мая) концентрация РК составляла 5–6 мг/л при насыщении 40–60%. В период до 23 июня 2020 г. содержание РК на глубине 5,5 м изменялось в пределах 8–12 мг/л при насыщении 80–110%, т.е. на этапе раннего лета кислородные условия в ней были благоприятными.

Практически с первых дней ледостава до конца зимы на всех горизонтах измерений регистрировались колебания температуры и РК с периодами от нескольких минут до нескольких десятков часов, которые могут быть обусловлены такими гидродинамическими процессами и явлениями, как короткие внутренние волны и сейши [9]. В течение всей зимы были хорошо выражены колебания температуры и РК с близким к суткам периодом (рис. 3).

При таких колебаниях в дневное время происходило резкое увеличение концентраций РК (по данным датчика на 5,5 м) на 0,2–1,8 мг/л с последующими скачкообразными колебаниями в течение нескольких часов и уменьшением до значения, предшествующего началу колебаний, в вечерние часы.

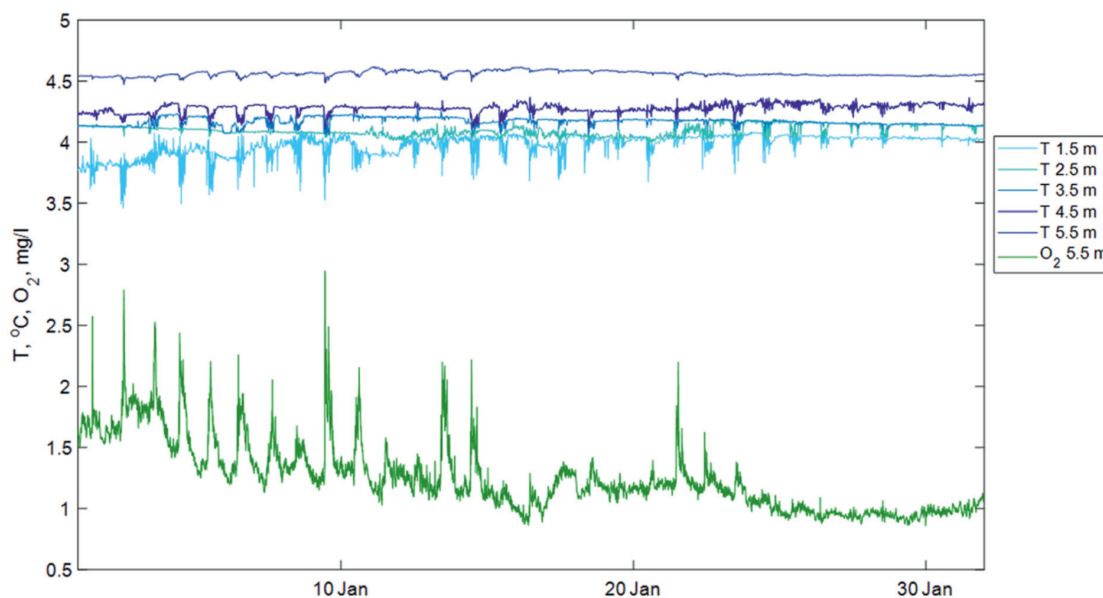


Рис. 3. Колебания температуры и растворенного кислорода с близким к суточному периодом на разных горизонтах водной толщи Голубой лагун в период с 1 по 31 января 2020 г. по данным косы

Синхронно отмечались колебания температуры (на глубинах 1,5–5,5 м) – ее резкое понижение на 0,01–0,20 °С, колебания в течение нескольких часов и возврат к начальному значению в вечерние часы. Подобные резкие скачкообразные колебания температуры и РК с близким к суткам периодом неоднократно фиксировались в озере Вендюрском в период ледостава [9]. Одним из объяснений этого явления может быть феномен неустойчивости Рэлея–Тэйлора, возникающий в придонных слоях озер вследствие активного разложения органического вещества [10]. Реализация неустойчивости Рэлея–Тэйлора в придонных слоях озер может способствовать усилению придонной аноксии, ускоряя скорость потребления РК за счет поступления кислорода из вышележащих слоев в анаэробную зону и усиливая теплоток из донных отложений.

Заклучение

Высокочастотные длительные измерения гидрофизических параметров водной толщи олиготрофной лагун в зимний период позволили установить ряд особенностей ее термического и кислородного режимов. Температура водной толщи лагун в течение всего периода ледостава близка к температуре максимальной плотности, в придонном слое температура в первые дни ледостава превышает 7,5 °С, к концу

ледостава снижается до 6,8 °С. Отмечаемые на всех горизонтах водной толщи резкие колебания температуры и растворенного кислорода могут быть проявлением различных гидрофизических процессов и явлений, таких как короткие внутренние волны, сейши, адвективный перенос, неустойчивость Рэлея–Тэйлора. Показано, что поверхностный слой лагун в течение всего периода ледостава хорошо насыщен кислородом (8–10 мг/л при насыщении 70–100%), в то время как в придонном слое отмечается быстрое уменьшение содержания кислорода, предположительно обусловленное бактериальным разложением гидрофильных мхов, занимающих более 96% литорали. Выраженная аноксия существует в течение нескольких месяцев, что косвенно свидетельствует о возможности накопления парниковых газов в придонных слоях и обуславливает необходимость проведения дальнейших исследований газового режима водоема.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук». Экспедиционные исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-05-60291 «Адаптация арктических лимносистем к быстрому изменению климата».

Список литературы / References

1. Holgerson M., Raymond P. Large contribution to inland water CO₂ and CH₄ emissions from very small ponds. *Nature Geosciences*. 2016. no. 9. P. 222–226.
2. Matveev A., Laurion I., Deshpande B.N., Bhiry N., Vincent W.F. High methane emissions from thermokarst lakes in subarctic peatlands. *Limnology and Oceanography*. 2016. vol. 61. no. S1. P. S150–S164.
3. Fedorova I., Chetverova A., Bolshiyarov D., Makarov A., Dobrotina E., Kashina V., Sidorina I., Boike J., Heim B., Morgenstern A., Overduin P.P., Eulenburg A., Wegner C. Lena Delta hydrology and geochemistry: long-term hydrological data and recent field observations. *Biogeosciences*. 2015. vol. 12. no. 2. P. 345–363.
4. MacIntyre S., Crowe A. T., Cortés A., Arneborg L. Turbulence in a small arctic pond. *Limnology and Oceanography*. 2018. vol. 63. no. 6. P. 2337–2358.
5. Отчет о НИР «Закономерности измерения озерных экосистем в различных ландшафтах Восточной Фенноскандии». № гос. регистрации 01201155831. Петрозаводск, 2013. 358 с.
- Research report «Regularities of measuring lake ecosystems in various landscapes of Eastern Fennoscandia». State registration No. 01201155831. Petrozavodsk, 2013. 358 p. (in Russian).
6. Martinsen K.T., Kragh T., Sand-Jensen K. Carbon dioxide efflux and ecosystem metabolism of small forest lakes. *Aquatic Sciences*. 2020. Vol. 82. P. 9.
7. Holgerson M.A. Drivers of carbon dioxide and methane supersaturation in small, temporary ponds. *Biogeochemistry*. 2015. Vol. 124. P. 305–318.
8. Пальшин Н.И. Термические и гидродинамические процессы в озерах в период ледостава. Петрозаводск: Карнц РАН ИВПС, 1999. 85 с.
- Palshin N.I. Thermal and hydrodynamic processes in lakes during the ice-period. Petrozavodsk: Karnts RAN IVPS, 1999. 85 p. (in Russian).
9. Palshin N.I., Bogdanov S.R., Zdorovenova G.E., Zdorovenov R.E., Efremova T.V., Belashev B.Z., Terzhevik A. Yu. Short Internal Waves in a Small Ice-Covered Lake. *Water Resources*. 2018. Vol. 45. no. 5. P. 695–705.
10. Голосов С.Д., Терзhevik А.Ю., Зверев И.С., Здорovenнов Р.Э., Здорovenнова Г.Э., Богданов С.Р., Волков С.Ю., Гавриленко Г.Г., Ефремова Т.В., Пальшин Н.И. Неустойчивость Рэлея-Тэйлора как механизм тепло-массообмена в озере, покрытом льдом // *Успехи современного естествознания*. 2020. № 11. С. 45–51.
- Golosov S.D., Terzhevik A.Yu., Zverev I.S., Zdorovenov R.E., Zdorovennova G.E., Bogdanov S.R., Volkov S.Yu., Gavrilenko G.G., Efremova T.V., Palshin N.I. Rayleigh-Taylor instability as a mechanism of heat and mass exchange in a ice-covered lake // *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*. 2020. No. 11. P. 45–51 (in Russian).