

- [26] *Pevzner M. M.* Golocenovyj vulkanizm Sredinnogo xrebtа Kamchatki. M.: Geos, 2015. 252 с.
- [27] *Pijp B. I.* Deyatel'nost' vulkanov Klyuchevskoj gruppy (s dekabryа 1940 g. po maj 1941 g.) // Byul. vulkanol. st. na Kamchatke. M.; L., 1946. N 12. S.74—78.
- [28] *Pijp B. I.* Izverzhenie kratera Bylinkinoj // Byull. vulkanol. st. M., 1954. N 20. S. 48—51.
- [29] *Pijp B. I.* Klyuchevskaya sopka i ee izverzheniya v 1944—1945 gg. i v proshlom // Tr. Labor. vulkanol. M., 1956. Vyp. 11. 309 s.
- [30] *Spravochnik po klimatu SSSR.* Vypusk 27. Kamchatskaya oblast'. Chast' 2. L.: Gidrometizdat, 1966. 184 s.
- [31] *Xodakov V. E., Zharikova M. V.* Lesnye pozhary: metody i issledovaniya. Xerson: Grin' D. S., 2011. 470 s.
- [32] *Belousov A., Belousova M., Edwards B. et al.* Overview of the precursors and dynamics of the 2012—13 basaltic fissure eruption of Tolbachik Volcano, Kamchatka, Russia // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2015. N 307. P. 107—119.
- [33] *Grishin S. Yu., Krestov P. V., Verkholat V. P.* Influence of 1996 eruptions in the Karymskiy volcano group, Kamchatka, on vegetation // Nat. Hist. Res. 2000. N 7. P. 39—48.
- [34] *Taylor S., Durand M., Grattan J.* Illness and elevated Human Mortality in Europe Coincident with the Laki Fissure eruption / Volcanic Degassing: Geological Society, Special Publication 213. Geological Society of London. 2003. P. 410—414.

Изв. РГО. 2017. Т. 149, вып. 6

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДНОЙ ТОЛЩИ БОРЕАЛЬНЫХ ОЗЕР НА ФОНЕ ИЗМЕНЕНИЙ РЕГИОНАЛЬНОГО КЛИМАТА

© **Г. Э. ЗДОРОВЕННОВА,*¹ Г. Г. ГАВРИЛЕНКО,* Р. Э. ЗДОРОВЕННОВ,*
И. МАММАРЕЛЛА,** Ю. ОЯЛА,** Ю. ХЕЙСКАНЕН,** А. Ю. ХЕЙСКАНЕН,**
А. Ю. ТЕРЖЕВИК***

* Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН,
Петрозаводск, Россия

** Department of Physics, University of Helsinki, Finland

*** Department of Environmental Sciences, University of Helsinki, Finland

**** ICOS ERIC, FI-00560 Helsinki, Finland

E-mail: ¹ zdorovennova@gmail.com

В статье приводятся результаты исследований влияния изменений регионального климата на динамику термического режима двух небольших бореальных озер с разным типом перемешивания в период открытой воды по данным многолетних наблюдений. Основное внимание уделено периоду весеннего перемешивания (включающего весеннюю подледную конвекцию и период гомотермии после взлома льда) и выявлению его роли в развитии термического режима озер на последующих этапах годового цикла. Показано, что в годы с аномально высокими зимними и весенними температурами воздуха весенняя подледная конвекция начиналась на исследованных озерах раньше и продолжалась дольше, чем в годы с близкими к климатической норме температурами этих месяцев, что могло спровоцировать формирование прямой стратификации к концу ледостава и исчезновение периода гомотермии после взлома льда. Продолжительность весенней гомотермии наиболее критична для димиктических озер, поскольку влияет на летнюю температуру гипolimниона и может, следовательно, определять как термический, так и газовый режимы на последующих этапах годового цикла. Полученные результаты позволяют заключить, что на фоне аномально теплых зим-

них и весенних месяцев полимиктические озера могут приобретать черты димиктических, выходя из-под льда устойчиво стратифицированными и теряя период весенней гомотермии. Сокращение периода ледостава на димиктических озерах за счет более раннего взлома льда может приводить как к уменьшению, так и к увеличению продолжительности летней стратификации в зависимости от погодных условий поздней весны и раннего лета.

Ключевые слова: бореальные озера, температура воды, весеннее перемешивание, подледная конвекция, весенняя гомотермия, режим перемешивания.

В последние годы озера все чаще рассматриваются как индикатор изменяющегося климата, поскольку физические, химические и биологические компоненты их экосистем чутко реагируют на внешние воздействия [11]. Наиболее быстро отвечает на изменение атмосферного форсинга температура водной толщи. Повышение поверхностной температуры озер в летний период отмечается на протяжении последних десятилетий для всех климатических зон, однако наиболее выражено оно на сезонно замерзающих озерах Северной Европы [2, 25]. Также в озерах умеренной зоны Северного полушария отмечается сокращение периода ледостава в течение последних полутора столетий [23].

Данные наблюдений на бореальных озерах показывают, что на фоне климатической изменчивости последних десятилетий происходят изменения продолжительности основных периодов годового термического цикла, в частности, наряду с сокращением ледостава увеличивается продолжительность летней стратификации [1, 21]. Экологическая значимость подобных исследований определяется тем, что даже небольшие изменения в сроках наступления и продолжительности периодов термического цикла озер могут оказывать огромное влияние на функционирование планктонного сообщества, вызывая, в частности, значительные сдвиги в сроках весеннего и осеннего пиков цветения фитопланктона [16]. Мы исследовали влияние изменений регионального климата на динамику термического режима двух небольших бореальных озер с разным типом перемешивания в период открытой воды по данным многолетних наблюдений. Основное внимание было уделено выявлению роли периода весеннего нагревания и перемешивания в развитии термического режима озер на последующих периодах годового цикла. Весеннее нагревание и перемешивание в бореальных озерах начинаются зачастую в конце ледостава (весенняя подледная конвекция) [24, 26] и продолжаются после взлома льда (весенняя гомотермия) до установления летней стратификации. Во время весенней гомотермии активно повышается температура придонных слоев водной толщи и верхнего слоя донных отложений, поэтому продолжительность ее может оказывать влияние на развитие термического режима озера в период открытой воды, а также определять интенсивность теплообмена с дном в период ледостава [4, 17, 18]. Весеннее перемешивание играет важнейшую роль в функционировании экосистем водоемов, поскольку в этот период происходит выравнивание температуры и концентраций растворенных и взвешенных веществ (газов, биогенов, клеток водорослей) по водному столбу, активно развивается фитопланктон, разрушаются придонные анаэробные зоны; после взлома льда происходит выброс парниковых газов [5, 22].

Объекты исследования и методы измерений. Объекты исследования — озера Вендюрское, юг Карелии, Россия (62°10'—62°20' с. ш., 33°10'—33°20' в. д.) и Куйваярви, Финляндия (61°50' с. ш., 24°17' в. д.), расположенные в 500 км друг от друга (рис. 1). Оз. Вендюрское — небольшой (длиной 7 км, 1.5 км в ширину, площадь поверхности 10.4 км²) и мелководный (средняя глубина 5.3 м, максимальная — 13.4 м) водоем водно-ледникового проис-

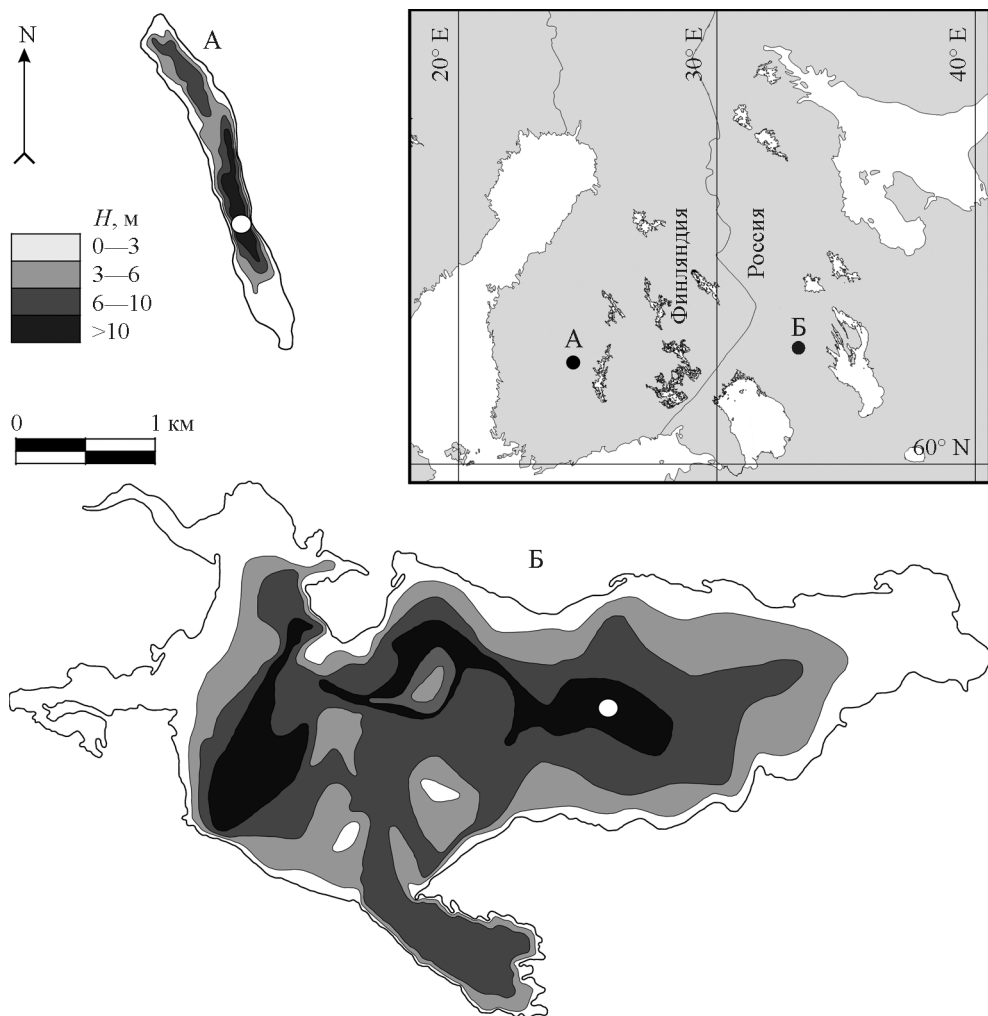


Рис. 1. Географическое положение, распределение глубин и положение измерительных станций (белый кружок) на озерах Куйваярви (А) и Вендюрском (Б).

хождения. Глубина диска Секки составляет 3 ± 0.5 м [8]. Оз. Вендюрское — типичный представитель класса мелководных водоемов Карелии водно-ледникового происхождения, широко распространенных на территории Северо-Запада России и Финляндии [9]. Куйваярви — небольшое лесное озеро (2.6 км длиной, 0.4 км шириной, площадь поверхности 0.6 км²). Максимальная глубина озера достигает 13.2 м, средняя — 6.4 м, глубина диска Секки 1.2—1.5 м [14]. В связи с особенностями строения котловины, а также заметно отличающейся прозрачностью воды озера имеют разный тип перемешивания. По классификации Льюиса [20] оз. Вендюрское — полимиктическое, поскольку в период открытой воды его водная масса неоднократно перемешивается [3], а оз. Куйваярви — димиктическое, так как полное перемешивание его водной толщи происходит дважды в год: весной после освобождения ото льда и на этапе осеннего охлаждения [15].

Измерения температуры воды проводились с помощью термокос, размещенных в центральных глубоководных частях озер (рис. 1). На оз. Вендюрском использовались температурные датчики TR-1060 RBR Ltd. (точность ± 0.002 °C, разрешение < 0.00005 °C), размещенные через 0.5—1 м. Измерения проводились в период с июля 2007 г. до декабря 2013 г. и с ноября 2014 г. до ноября 2016 г. с минутным интервалом, за исключением 3—5 дней весной и осенью, когда коса извлекалась для снятия данных и перезарядки батарей. На оз. Куйвьярви измерения проводились в 2010 г. в период с июля до конца года, в 2011—2012 гг. с первых чисел мая до конца года, в 2013—2016 гг. круглогодично с использованием косы, оснащенной термодатчиками Pt—100 (точность 0.2 °C), размещенными с интервалом 0.5—2 м; шаг по времени — 5 сек. Метеорологические данные по станции «Петрозаводск» (температура воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра, порывы ветра между сроками наблюдений, дискретность данных 3 ч), удаленной от оз. Вендюрского на 70 км, получены на сайте <http://rp5.ru>. Данные по метеостанции SMEAR II (температура воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра, дискретность данных 30 мин), расположенной в 600 м от оз. Куйвьярви, получены на сайте <http://avaa.tdata.fi/web/smart/smeaer/search>. Среднемесячные климатические значения приземной температуры воздуха за базовый период 1961—1990 гг. получены для станции «Петрозаводск» на сайте Северо-Евразийского климатического центра (<http://seakc.meteoinfo.ru/actuals>).

По данным термокос были определены даты начала и окончания ледостава, начала весенней подледной конвекции, продолжительность периодов весенней и осенней гомотермии, летней стратификации. Даты начала ледостава определялись по моменту повышения температуры придонных слоев, окончания ледостава — по моменту резкого падения придонных температур; кроме того, наличие выраженных пульсаций температуры воды в поверхностных слоях свидетельствовало о том, что озеро открыто, а исчезновение пульсаций сигнализировало об установлении сплошного льда и резком снижении турбулентности. За начало подледной конвекции принимался момент появления суточной изменчивости температуры в подледном слое озера и формирования конвективно-перемешанного слоя (КПС). Под гомотермией понималось состояние, при котором разность температур по водному столбу в глубоководной части озера не превышала одного градуса. Стратификация соответственно считалась установившейся при разности температур между поверхностными и придонными слоями водоема более одного градуса. Приведенные на рис. 2 графики температуры на разных глубинах водной толщи озер Куйвьярви (А) и Вендюрского (Б) в период с 1 апреля по 31 декабря 2015 г. наглядно демонстрируют выраженные отличия термического режима двух озер, обусловленные разным типом перемешивания в них: непрерывная длительная летняя стратификация, низкие значения и малая изменчивость температуры гипolimниона в димиктическом оз. Куйвьярви и менее продолжительная, прерывающаяся стратификация, продолжительные периоды весенней и осенней гомотермии, высокая температура гипolimниона в полимиктическом оз. Вендюрском.

Результаты. Сопоставление рядов метеорологических данных по станциям «Петрозаводск» и SMEAR II показало, что периоды похолоданий и потеплений, прохождения теплых и холодных фронтов были сходными для двух районов исследований. Коэффициенты корреляции рядов температуры возду-

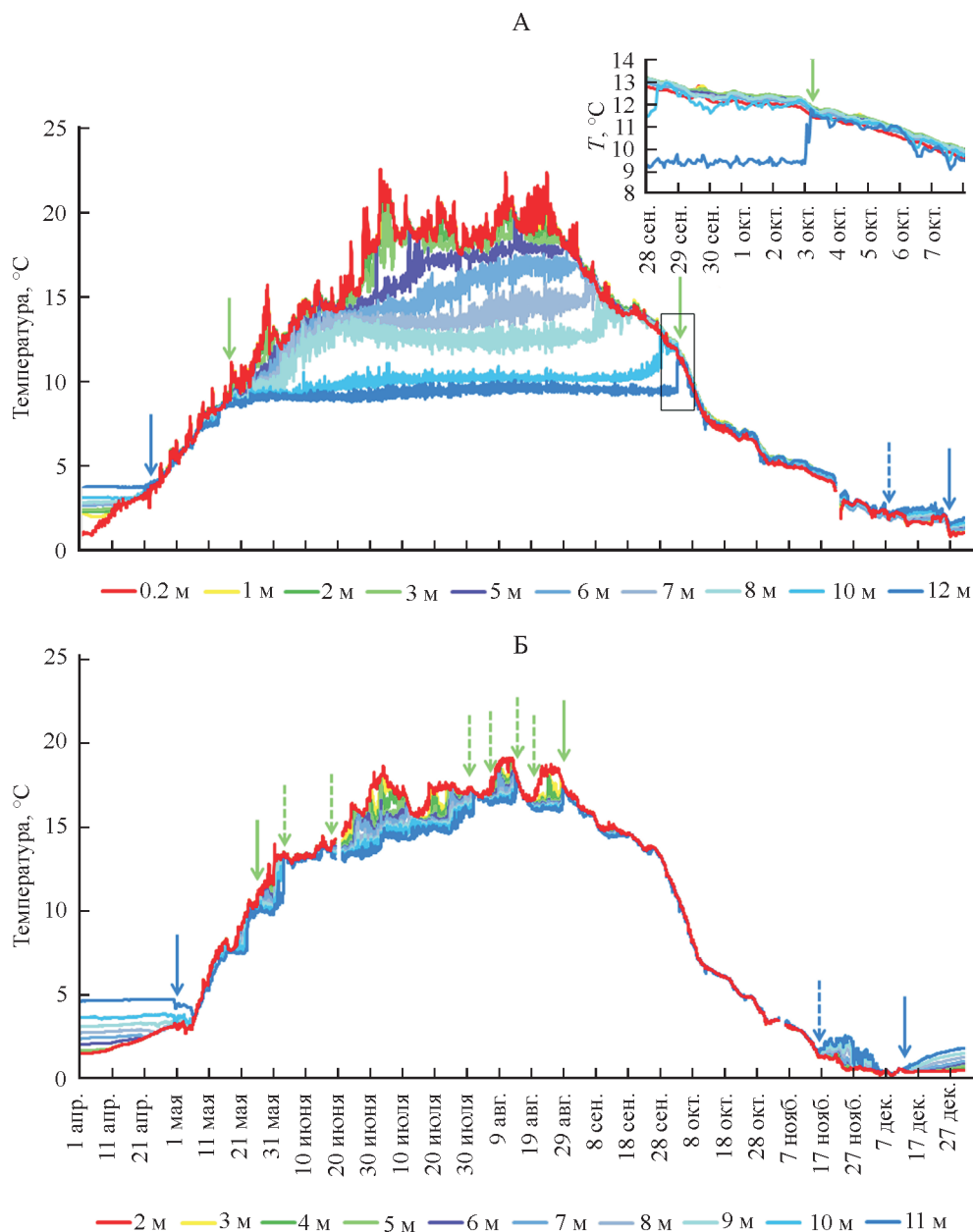


Рис. 2. Температура водной толщи озер Куйварви (А) и Вендюрского (Б) в период с 1 апреля по 31 декабря 2015 г.

Синие стрелки — начало и окончание ледостава, пунктирная синяя стрелка — установление временного льда. Зеленые стрелки — начало и окончание летней стратификации, пунктирные зеленые стрелки — периоды полного перемешивания озера. На врезке показано скачкообразное увеличение температуры придонного слоя в момент полного перемешивания озера.

Таблица 1

Отклонения среднемесячной и среднегодовой приземной температуры воздуха (°C) по ГМС «Петрозаводск» в 2008—2016 гг. от климатической нормы за период 1961—1990 гг.

Годы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
2008	6.8	5.9	1.5	1.3	-1.2	-1.1	-0.1	-0.8	-0.7	3.2	3.2	5.0	1.9
2009	3.1	2.3	0.3	-0.1	2.2	-0.6	0.3	0.6	3.1	-1.4	2.2	-1.7	0.9
2010	-3.8	-2.3	-0.9	2.4	2.9	-0.3	6.2	3.0	1.4	0.3	-1.2	-6.4	0.1
2011	1.2	-4.5	0.6	2.7	0.8	2.0	4.0	0.9	1.9	2.1	2.6	7.3	1.8
2012	3.1	-3.2	0.1	0.2	1.6	0.1	1.3	0.3	1.9	0.5	2.7	-3.8	0.4
2013	2.4	4.8	-5.8	1.2	2.7	3.6	0.8	2.4	0.4	1.5	4.3	5.5	2.0
2014	1.2	7.5	4.1	2.0	1.7	-0.9	2.3	2.8	2.5	-1.3	1.2	3.3	2.2
2015	4.3	7.1	5.1	0.7	2.0	0.7	-1.8	1.5	3.0	0.2	2.6	5.9	2.6
2016	-3.5	7.5	3.2	2.0	4.3	0.7	2.4	1.3	1.2	-0.5	-1.8	3.2	1.7

ха и атмосферного давления для двух станций (дискретность данных 3 ч) за период с 1 января 2010 г. по 31 декабря 2016 г. составили 0.93 и 0.88 соответственно. Высокие коэффициенты корреляции рядов температуры и давления по двум станциям позволили нам использовать климатические данные по станции «Петрозаводск» в анализе изменчивости регионального климата района оз. Куйваярви (за неимением климатических данных по станции SMEAR II). Сопоставление среднегодовых температур воздуха со среднемноголетними показало, что все годы с 2008 по 2016 были теплее климатической нормы для обоих районов исследования. В табл. 1 приведены отклонения среднемесячной и среднегодовой температур воздуха в 2008—2016 гг. от климатической нормы для станции «Петрозаводск». Также оказалось, что годы исследований существенно отличались по погодным условиям. Например, зима 2009/10 г. была наиболее холодной, а последующее лето 2010 г. наиболее жарким за исследованный период. Летние месяцы 2008 г. были заметно холоднее климатической нормы, а 2011 и 2013 гг. — теплее. При этом наиболее часто теплее нормы оказывались апрель, май, август и сентябрь, а холоднее — июнь и октябрь.

На фоне изменчивости регионального климата в 2008—2016 гг. сроки начала и продолжительность основных этапов годового термического цикла на исследованных озерах существенно отличались (табл. 2 и 3). Начало весенней подледной конвекции на озерах в 2008—2013 гг. приходилось на середину апреля, а в 2014—2016 гг., когда среднемесячные температуры февраля и марта были заметно выше климатической нормы, что могло способствовать меньшей толщине и более раннему стаиванию снежного покрова, — на середину марта. Взлом льда происходил с 30 апреля по 10 мая на оз. Вендюрском и с 13 апреля по 7 мая на оз. Куйваярви. Таким образом, продолжительность подледной конвекции на озерах в исследованные годы менялась от двух недель до полутора месяцев.

После взлома льда водная толща озер в зависимости от погодных условий оставалась в состоянии гомотермии от недели до месяца. На оз. Куйваярви наиболее длительная гомотермия наблюдалась в 2015 г. (табл. 2), когда после раннего взлома льда в середине апреля установилась холодная ветреная погода (среднесуточная температура воздуха в период с 22 апреля по 17 мая не

Таблица 2

Сроки наступления и продолжительность в сутках основных периодов годового термического цикла оз. Куйваярви, а также диапазон температуры гипolimниона летом (ТГ) и максимальная температура гипolimниона (ТГ_{макс}) на дату начала осенней гомотермии

Годы	Начало подледной конвекции	Подледная конвекция, сут	Взлом льда	Весенняя гомотермия, сут	Начало летней стратификации
2010	—	—	—	—	—
2011	—	—	—	—	5.05
2012	—	—	—	—	20.05
2013	20.04	11	1.05	7	7.05
2014	10.03	34	13.04	16*	15.05
2015	15.03	38	22.04	25	17.05
2016	15.03	37	21.04	9	1.05

Таблица 2 (продолжение)

Годы	ТГ, °С	ТГ _{макс} , °С	Начало осенней гомотермии	Осенняя гомотермия, сут	Начало ледостава
2010	5.9—6.2	7.6	6.10	45	20.11
2011	5.1—5.8	7.6	9.10	52	30.11
2012	7.2—7.4	9.7	7.10	50	26.11
2013	5.7—6.9	8.4	13.10	38	20.11
2014	8.5—9.0	10.5	30.09	45	14—24.11, 30.11—11.12, 18.12
2015	8.7—9.8	11.4	3.10	75	14—22.12, 27.12
2016	5.1—7.3	9.1	5.10	31	6—21.11, 28.11

Примечание. * — продолжительность весенней гомотермии в 2014 г. за вычетом периодов слабой стратификации; прочерк в графах — нет данных.

превышала 12 °С, отрицательные температуры в ночные часы отмечались до 15 мая, а скорости ветра достигали 8.5 м/с со среднесуточным значением от 2.5 до 5.5 м/с), что препятствовало формированию стратификации. Весной 2014 г. после раннего взлома льда на фоне неустойчивой погоды второй половины апреля и первой половины мая было зафиксировано три эпизода (21—22 апреля, 25 апреля—7 мая, 11—12 мая) формирования слабой стратификации с последующим ее разрушением и полным перемешиванием водной толщи озера. Формировалась стратификация при теплой солнечной погоде с малыми ветрами (не более 2—3 м/с), разрушалась — на фоне резких понижений температуры воздуха (до отрицательных значений в ночные часы) и усиления ветра до 5—6 м/с. После каждого эпизода разрушения стратификации и полного перемешивания водной толщи озера придонная температура скачкообразно повышалась. В связи с продолжительным периодом весенней гомотермии в 2014 и 2015 гг. летние придонные температуры были заметно выше, чем в другие годы исследований (табл. 2). Кроме того, период летней стратификации в эти годы (138 сут) был на три недели короче максимального

за исследованный период (159 сут в 2013 г.). В 2016 г., когда после раннего взлома льда установилась теплая маловетренная погода (среднесуточная температура воздуха непрерывно повышалась в период с 26 апреля по 8 мая с 1.5 до 15 °С, среднесуточная скорость ветра не превышала 2—3 м/с), период гомотермии был существенно короче, а период летней стратификации (158 сут) был близок к максимальному за исследованные годы.

Наиболее длительная гомотермия на оз. Вендюрском наблюдалась в мае 2011 и 2015 гг. (табл. 3) на фоне холодной неустойчивой погоды: средняя температура воздуха в период со взлома льда до установления стратификации в эти годы не превышала 9.5 °С, отмечались заморозки, скорость ветра достигала 6—7 м/с со средним значением 3 м/с и с порывами до 11—14 м/с. В 2016 г. весенняя гомотермия на оз. Вендюрском вообще не наблюдалась, поскольку водная масса озера вышла из-под льда уже устойчиво стратифицированной. Такая ситуация сложилась в результате существенного подледного прогрева водной массы на фоне длительной конвекции, развивавшейся с середины марта. Температура водного столба достигла 4 °С к 29 апреля, а 3 мая, за сутки до взлома льда, температура подледного 2-метрового слоя водной толщи повысилась до 6 °С. Таким образом, озеро вышло из-под льда уже устойчиво стратифицированным, и на фоне теплой маловетренной погоды (средняя температура мая 12.7 °С, средняя скорость ветра 2.4 м/с с редкими усилениями до 6—7 м/с) стратификация сохранялась на протяжении месяца до начала июня, когда в результате продолжительного похолодания (среднесуточная температура воздуха в период со 2 по 13 июня понизилась с 15.8 до 6.9 °С, в ночные часы 11 июня была зарегистрирована отрицательная температура воздуха -0.2 °С) и усиления ветра (среднесуточные значения 3—4 м/с, порывы до 10—14 м/с) термоклин начал заглубляться и озеро было перемешано до дна 12—14 июня. На рис. 3 приведено изменение температуры водного столба в центральной глубоководной части оз. Вендюрского в течение первой декады мая в 2013 г. (А), когда наблюдалась типичная для озера гомотермия после взлома льда и в 2016 г. (Б), когда озеро вышло из-под льда стратифицированным.

Летняя стратификация существует на оз. Куйварви 140—160 сут, на оз. Вендюрском заметно меньше — 70—100 сут. В течение лета в зависимости от погодных условий оз. Вендюрское может быть полностью перемешано до 5 раз (табл. 3), в то время как на оз. Куйварви прерывание стратификации наблюдалось только в течение мая 2014 г. на фоне неустойчивой ветреной погоды. Анализ данных метеостанций SMEAR II и «Петрозаводск» показал, что в мае—июле в исследуемом регионе нередко продолжительные похолодания (от 2—3 до 7—10 сут) с резким падением температуры воздуха (в мае — часто до отрицательных значений), с усилениями ветра, обусловленные прохождением циклонов. Именно на фоне этих продолжительных периодов холодной ветреной погоды наблюдались все эпизоды перемешивания оз. Вендюрского на этапе летнего нагревания (май—июль) и прерывание установившейся стратификации на оз. Куйварви весной 2014 г.

Анализ данных термокос показал, что повышение температуры придонных слоев на этапе открытой воды на оз. Куйварви происходит во время весенней гомотермии и при полном перемешивании озера в момент начала осенней гомотермии (когда в течение нескольких часов наблюдается максимальная температура гипolimниона, $T_{\text{гип}}^{\text{макс}}$ в табл. 2; см. также врезку на рис. 2, А), а на оз. Вендюрском также и летом при промежуточных переме-

Таблица 3

Сроки наступления и продолжительность в сутках основных периодов годового термического цикла оз. Вендорского, даты промежуточного перемешивания озера, а также диапазон температуры гипolimниона летом (ТГ) и максимальная температура гипolimниона (ТГ_{макс}) на дату начала осенней гомотермии

Годы	Начало подледной конвекции	Подледная конвекция, сут	Взлом льда	Весенняя гомотермия, сут	Начало летней стратификации	Промежуточное перемешивание озера	ТГ, °С	ТГ _{макс} , °С	Начало осенней гомотермии	Осенняя гомотермия, сут	Начало ледостава
2007*	—	—	—	—	—	—	15—17.5	19.3	26.08	81	15.11
2008	21.04	19	10.05	15	25.05	6—12.06	10—13	17.1	5.08	127	10.12
2009	23.04	15	8.05	9	17.05	25—29.05, 5—9.06, 17—21.06, 8—10.07, 21—22.07	12—16.5	18.6	16.08	88	12—30.11, 5.12
2010	5.04	26	1.05	9	9.05	30.05—8.06	12.5—15.5	17.2	27.08	85	20.11
2011	14.04	18	2.05	29	31.05	21—22.06	12—16	18.7	10.08	133	11.12
2012	20.04	15	5.05	15	20.05	2—6.06, 22.06—1.07, 20—27.07	12.5—17.5	19.7	8.08	114	1.12
2013	17.04	16	3.05	12	15.05	23—26.05	11—15.5	18.0	15.08	107	1.12
2014*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21.11
2015	15.03	47	30.04	26	26.05	2—18.06, 1—6.08, 14—19.08	13.5—16.5	18.1	28.08	80	16.11—4.12, 12.12
2016	28.03	37	4.05	0	4.05	12—15.06, 19—21.06	11—15	18.7	11.08	87	6.11

Примечание. * Прочерк в графах — нет данных.

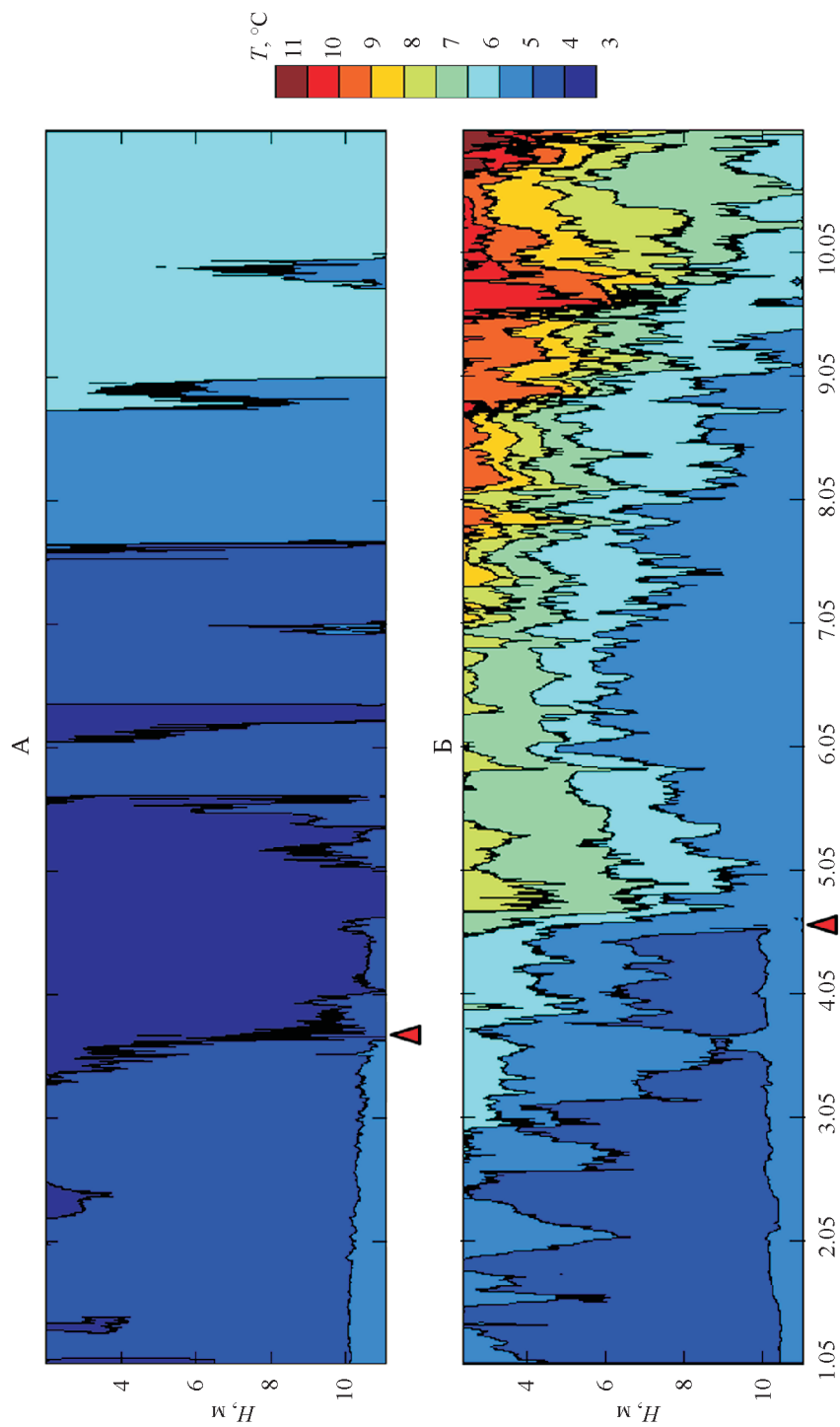


Рис. 3. Температура водной толщи в центральной части оз. Вендюрского в период с 1 по 10 мая в 2013 (А) и 2016 (Б) гг.
Красные треугольники — момент взлома льда.

шиваниях водной массы и перераспределении тепла, накопленного в поверхностных слоях. Поэтому в летний период температура гипolimниона в полимиктическом оз. Вендюрском в исследованные годы была заметно выше, чем в димиктическом оз. Куйварви ($TГ$ и $TГ_{\text{макс}}$ в табл. 2 и 3). Интересно, что в оз. Вендюрском наиболее низкие придонные температуры наблюдались в самое холодное (2008 г.) и самое жаркое (2010 г.) относительно климатической нормы лето, а также в год, когда озеро было лишено весенней гомотермии после взлома льда (2016 г.). В эти годы наблюдалось лишь одно промежуточное перемешивание водной толщи ранним летом, а в последующие летние месяцы ветровая активность была снижена и водная масса озера не перемешивалась. В годы с многократным перемешиванием водной толщи на фоне повышенной ветровой активности (2009, 2012, 2015) придонные температуры летом были заметно выше.

Максимум теплосодержания достигается на обоих озерах в период с конца июля до второй декады августа; с этого момента начинается этап осеннего охлаждения. Полное перемешивание водной толщи происходит в разные годы в период с 5 по 28 августа на оз. Вендюрском и с 30 сентября по 13 октября на оз. Куйварви. Продолжительность осенней гомотермии на озерах также заметно отличается: около трех месяцев на оз. Вендюрском и только полтора месяца на оз. Куйварви (исключение — осень 2015 г. — более двух месяцев за счет позднего ледостава).

Обсуждение и заключение. Небольшие замерзающие озера умеренной зоны, как правило, полимиктические (испытывающие многократное перемешивание водной толщи на этапе летнего нагревания) или димиктические (постоянно стратифицированные в период между весенним и осенним перемешиванием) [10, 20]. Однако расчеты на одномерной модели Flake (<http://www.flake.igb-berlin.de/>) показывают, что при продолжающемся повышении температуры воздуха к концу текущего столетия период ледостава на озерах умеренной зоны может резко сократиться, вплоть до полного исчезновения, при этом изменится и режим перемешивания в озерах: полимиктические перейдут в разряд димиктических, а димиктические — в разряд мономиктических [19]. Также в соответствии с расчетами на этой модели может сократиться или полностью исчезнуть период весенней гомотермии, при этом увеличится продолжительность летней стратификации [18]. Такие изменения термического цикла озер будут оказывать негативное влияние на химико-биологические аспекты функционирования их экосистем, повышая риск возникновения придонной аноксии и накопления парниковых газов [13].

Данные наблюдений на бореальных озерах показывают, что в последние годы на фоне изменяющегося климата весеннее перемешивание может начинаться раньше и продолжаться дольше [12]. Наше исследование также показало, что в годы с аномально высокими температурами февраля—марта весенняя подледная конвекция начиналась на исследованных озерах заметно раньше и продолжалась дольше, чем в годы с близкими к климатической норме температурами этих месяцев. Увеличение продолжительности подледной конвекции, т. е. периода подледного нагревания водоемов, может приводить к формированию прямой стратификации уже под ледяным покровом. Такая ситуация складывается, когда температура КПС достигает 4 °С (температура максимальной плотности пресной воды) и в дальнейшем под действием радиационного прогрева происходит повышение температуры в его верхней части, т. е. в озере, покрытом льдом, формируется прямая стратификация.

Существуют доказательства того, что небольшие лесные озера зачастую выходят из-под льда уже устойчиво стратифицированными [12]. Подобное явление мы наблюдали в 2016 г. на оз. Вендюрском, когда вследствие длительной подледной конвекции его водная масса прогрелась заметно сильнее, чем в другие годы исследований, и озеро вышло из-под льда уже устойчиво стратифицированным, потеряв важнейший период перемешивания после взлома льда.

Результаты численного моделирования показывают, что раннее формирование устойчивой летней стратификации препятствует аккумуляции тепла донными отложениями озер [6]. Данные наших наблюдений на димиктическом оз. Куйваярви позволяют на качественном уровне проследить зависимость между продолжительностью весенней гомотермии и температурой гипolimниона: чем длительнее был этот этап, тем выше были летние придонные температуры, что согласуется с результатами модельных расчетов [18, 19]. К сожалению, ряды наблюдений на этом озере недостаточны для выявления количественных зависимостей. В полимиктическом оз. Вендюрском продолжительность весенней гомотермии не оказывает решающего влияния на температуру гипolimниона, поскольку озеро также перемешивается и летом, а частота перемешиваний определяется погодными условиями летних месяцев. Важным следствием повышения температуры гипolimниона летом являются усиление накопления тепла донными отложениями и увеличение теплопотока на границе вода—дно в период ледостава. Кроме того, известно, что повышение температуры гипolimниона активизирует бактериальное сообщество, что может приводить к усиленному потреблению кислорода в придонных слоях, формированию аноксии и накоплению парниковых газов [27]. Поэтому увеличение продолжительности весенней гомотермии наиболее критично именно для димиктических озер, поскольку может определять развитие их термического (продолжительность летней стратификации, теплообмен с дном в период ледостава) и газового (усиление летнего придонного дефицита кислорода и накопления парниковых газов) режимов.

Полученные нами результаты позволяют заключить, что на фоне изменяющегося регионального климата могут происходить существенные изменения в сроках наступления и продолжительности основных периодов термического цикла озер южных районов Карелии и Финляндии. На фоне аномально теплых зимних и весенних месяцев увеличивается продолжительность весеннего подледного прогрева. При длительной конвекции возрастает вероятность формирования прямой стратификации уже подо льдом; при этом озера будут выходить из-под льда устойчиво стратифицированными, теряя важнейший период весеннего перемешивания после взлома льда (оз. Вендюрское, весна 2016 г.). На фоне теплых зим может наблюдаться сокращение периода ледостава за счет более раннего взлома льда. Ранний взлом льда и погодные условия первых дней и недель открытой воды наиболее критично сказываются на термическом и газовом режиме димиктических озер. С одной стороны, при раннем взломе льда на димиктических озерах может заметно увеличиваться период весенней гомотермии на фоне продолжительных похолоданий и усилений ветра, характерных для региона поздней весной и ранним летом [7], и, следовательно, сокращаться период летней стратификации (оз. Куйваярви, 2014 и 2015 гг.), что противоречит результатам модельных расчетов, прогнозирующих увеличение периода летней стратификации при сокращении периода ледостава [18, 19]. Увеличение продолжительности весенней

гомотермии может способствовать более активному теплообмену с донными отложениями и повышению температуры гипolimниона, что в свою очередь может приводить к активизации донного бактериального сообщества, более быстрому формированию придонной гипоксии [27]. Но, как показало наше исследование, при увеличении продолжительности весенней гомотермии на димиктических озерах сокращается период летней стратификации, что должно положительно сказываться на кислородном режиме водоемов, уменьшая время существования придонной аноксии. С другой стороны, ранний взлом льда на димиктических озерах может привести и к увеличению продолжительности летней стратификации за счет ее более раннего установления на фоне теплой маловетреной погоды после взлома льда (оз. Куйварви, весна 2016 г.), что согласуется с результатами модельных расчетов [18, 19].

Полученные нами результаты показывают, что влияние изменений регионального климата на термический режим озер, а также режим перемешивания в них неоднозначно и требует дальнейших исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта РФФИ 14-05-91761_АФ и проектов Европейской комиссии GHG-LAKE № 612642 и Академии Финляндии CarLAC № 281196.

Список литературы

- [1] Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Здорovenнова Г. Э., Тержевик А. Ю. Влияние экстремально жаркого лета 2010 г. на температуру воды и распределение кислорода в озерах Карелии // Метеорология и гидрология. 2015. № 9. С. 67—76.
- [2] Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Белашев Б. З. Температура воды разнотипных озер Карелии в условиях изменения климата (по данным инструментальных измерений 1953—2011 гг.) // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 2. С. 228—238.
- [3] Гавриленко Г. Г., Здорovenнова Г. Э., Здорovenнов Р. Э. и др. Термический и кислородный режимы мелководного озера на этапе летнего нагревания // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. № 10(1). С. 414—421.
- [4] Гавриленко Г. Г., Здорovenнова Г. Э., Здорovenнов Р. Э. и др. Теплосток на границе вода—донные отложения в небольшом озере // Тр. КарНЦ РАН. 2015. № 9. Сер. Лимнология. С. 3—9.
- [5] Здорovenнова Г. Э., Здорovenнов Р. Э., Пальшин Н. И. и др. Термический режим мелководного озера после разрушения льда // Тр. VIII Междунар. науч.-практ. конф. «Динамика и термизация рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». М.: РУДН, 2014. С. 390—401.
- [6] Здорovenнова Г. Э., Голосов С. Д., Зверев И. С. и др. Реакция термической структуры малых бореальных озер на различные сценарии атмосферного воздействия // Успехи современного естествознания. 2015. № 10. С. 100—103.
- [7] Назарова Л. Е. Климат Республики Карелия (Россия): температура воздуха, изменчивость и изменения // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10, № 1. С. 746—749.
- [8] Озера Карелии / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 463 с.
- [9] Тержевик А. Ю., Пальшин Н. И., Голосов С. Д. и др. Гидрофизические аспекты формирования кислородного режима мелководного озера, покрытого льдом // Водные ресурсы. 2010. 37(5). С. 568—579.
- [10] Хатчинсон Д. Лимнология. М.: Прогресс, 1969. 592 с.

- [11] *Adrian R., O'Reilly C., Zagarese H. et al.* Lakes as sentinels of climate change // *Limnol. Oceanogr.* 2009. V. 54, N 6(2). P. 2283—2297.
- [12] *Arvola L., George G., Livingstone D. et al.* The impact of the changing climate on the thermal characteristics of lakes // *The Impact of Climate Change on European Lakes. Aquatic Ecology Series 4.* 2010. P. 85—101.
- [13] *Diaz R. J.* Overview of hypoxia around the World // *J. Env. Qual.* 2001. V. 30. P. 275—281.
- [14] *Heiskanen J., Mammarella I., Haapanala S. et al.* Effects of cooling and internal wave motions on gas transfer coefficients in a boreal lake // *Tellus B.* 2014. V. 66. P. 22827. <http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v66.22827>.
- [15] *Heiskanen J., Mammarella I., Ojala A. et al.* Effects of water clarity on lake stratification and lake-atmosphere heat exchange // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2015. V. 120. P. 7412—7428. DOI:10.1002/2014JD022938.
- [16] *Gerten D., Adrian R.* Climate driven changes in spring plankton dynamics and the sensitivity of shallow polymictic lakes to the North Atlantic Oscillation // *Limnol. Oceanogr.* 2000. V. 45, N 5. P. 1058—1066.
- [17] *Golosov S., Maher O. A., Schipunova E. et al.* Physical background of the development of oxygen depletion in ice-covered lakes // *Oecologia.* 2007. V. 151, N 2. P. 331—340.
- [18] *Golosov S., Terzhevik A., Zverev I. et al.* Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes // *Tellus A.* 2012. V. 64. 17264. DOI: 10.3402/tellusa.v64i0.17264.
- [19] *Kirillin G.* Modelling the impact of global warming on water temperature and seasonal mixing regimes in small temperate lakes // *Bor. Environ. Res.* 2010. V. 15. P. 279—293.
- [20] *Lewis W. M.* A revised classification of lakes based on mixing // *Can. J. Fish. Aqua. Sci.* 1983. V. 40 P. 1779—1787. DOI:10.1139/f83-207.
- [21] *Livingstone D.* Impact of secular climate change on the thermal structure of a large temperate central European lake // *Climatic Change.* 2003. V. 57. P. 205—225.
- [22] *Lopez Bellido J., Tulonen T., Kankaala P., Ojala A.* CO₂ and CH₄ fluxes during spring and autumn mixing periods in a boreal lake (Paajarvi, southern Finland) // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. G04007. DOI: 10.1029/2009JG000923.
- [23] *Magnuson J., Robertson D., Benson B. et al.* Historical trends in lake and river ice cover in the Northern Hemisphere // *Science.* 2000. V. 289, N 5485. P. 1743—1746.
- [24] *Mironov D., Terzhevik A., Kirillin G. et al.* Radiatively driven convection in ice-covered lakes: Observations, scaling, and a mixed layer model // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. P. 7—16.
- [25] *O'Reilly C. M., Sharma S., Gray D. et al.* Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // *Geophys. Res. Letters.* 2015. V. 42, N 24. P. 10 773—10 781.
- [26] *Salonen K., Pulkkanen M., Salmi P., Griffiths R.* Interannual variability of circulation under spring ice in a boreal lake // *Limnol. Oceanogr.* 2014. V. 59, N 6. P. 2121—2132.
- [27] *Schulz S., Matsuyama H., Conrad R.* Temperature dependence of methane production from different precursors in a profundal sediment (Lake Constance) // *FEMS Microbiology Ecology.* 1997. V. 22. P. 207—213.

Поступило в редакцию
13 июня 2017 г.

Evolution of the temperature of the water column of boreal lakes against the background of changes in the regional climate

© G. E. Zdorovenнова,*¹ G. G. Gavrilenko,* R. E. Zdorovennov,* I. Mammarella,**
A. Ojala,**,*** J. Heiskanen,**,**** A. Yu. Terzhevik*

* Northern water problems Institute Karelian Research Center of RAS, Russia, Petrozavodsk

** Department of Physics, University of Helsinki, Finland

*** Department of Environmental Sciences, University of Helsinki, Finland

**** ICOS ERIC, FI-00560 Helsinki, Finland

E-mail: ¹ zdorovennova@gmail.com

The results of studies of the effect of changes in the regional climate on the dynamics of the thermal regime of two small boreal lakes with different types of mixing during the open water period according to the data of long-term observations are given in the article. The main attention is paid to the stage of spring mixing (including spring under-ice convection and the stage of homothermy after breaking of ice), and revealing its role in the development of the thermal regime of lakes at subsequent stages of the annual cycle. It is shown that the spring under-ice convection began on lakes earlier and lasted longer in years with abnormally high winter and spring air temperatures than in years with temperatures of these months close to the climatic norm. This could provoke the formation of direct stratification by the end of the ice period and the disappearance of the stage of homothermy after ice-break. The duration of the spring homothermia phase is the most critical for dimictic lakes, since it affects the summer temperature of the hypolimnion and can therefore determine both the thermal and gas regimes at subsequent stages of the annual cycle. The obtained results allow us to conclude that, against the background of anomalously warm winter and spring months, polymictic lakes can acquire features of dimictic ones, leaving stably stratified after the melting of ice, and losing the stage of spring homothermy. Reduction of the ice-period on dimictic lakes due to earlier ice-off may lead to both a decrease and an increase in the duration of summer stratification, depending on the weather conditions of late spring and early summer.

Key words: boreal lakes, water temperature, spring mixing, under-ice convection, spring homothermia, mixing regime.

References

- [1] Efremova T. V., Pal'shin N. I., Zdorovennova G. E., Terzhevik A. Yu. Vliyanie e'kstremal'no zharkogo leta 2010 g. na temperaturu vody i raspredelenie kisloroda v ozerax Karelii // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2015. N 9. S. 67—76.
- [2] Efremova T. V., Pal'shin N. I., Belashev B. Z. Temperatura vody raznotipnyx ozer Karelii v usloviyax izmeneniya klimata (po dannym instrumental'nyx izmereniy 1953—2011 gg.) // *Vodnye resursy*. 2016. T. 43, N 2. S. 228—238.
- [3] Gavrilenko G. G., Zdorovennova G. E., Zdorovennov R. E. i dr. Termicheskij i kislorodnyj rezhimy melkovodnogo ozera na e'tape letnego nagrevaniya // *Geopolitika i e'kogeodinamika regionov*. 2014. N 10(1). S. 414—421.
- [4] Gavrilenko G. G., Zdorovennova G. E., Zdorovennov R. E. i dr. Teplopotok na granice voda-donnye otlozheniya v nebol'shom ozere // *Tr. KarNC RAN*. 2015. N 9. Ser. Limnologiya. C. 3—9.
- [5] Zdorovennova G. E., Zdorovennov R. E., Pal'shin N. I. i dr. Termicheskij rezhim melkovodnogo ozera posle razrusheniya l'da // *Tr. VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Dinamika i termika rek, vodoxranilishh i pribrezhnoj zony morej»*. M.: RUDN, 2014. S. 390—401.
- [6] Zdorovennova G. E., Golosov S. D., Zverev I. S. i dr. Reakciya termicheskoy struktury malyx boreal'nyx ozer na razlichnye scenariy atmosfernogo vozdejstviya // *Uspexi sovremennogo estestvoznaniya*. 2015. N 10. S. 100—103.
- [7] Nazarova L. E. Klimat Respubliki Kareliya (Rossiya): temperatura vozduxa, izmenchivost' i izmeneniya // *Geopolitika i e'kogeodinamika regionov*. 2014. T. 10, N 1. S. 746—749.
- [8] Oзера Karelii / Pod red. N. N. Filatova, V. I. Kuxareva. Petrozavodsk: KarNC RAN, 2013. 463 s.

- [9] Terzhevik A. Yu., Pal'shin N. I., Golosov S. D. i dr. Hidrofizicheskie aspekty formirovaniya kislorodnogo rezhima melkovodnogo ozera, pokrytogo l'dom // *Vodnye resursy*. 2010. 37(5). S. 568—579.
- [10] Xatchinson D. *Limnologiya*. M.: Progress, 1969. 592 s.
- [11] Adrian R., O'Reilly C., Zagarese H. et al. Lakes as sentinels of climate change // *Limnol. Oceanogr.* 2009. V. 54, N 6(2). P. 2283—2297.
- [12] Arvola L., George G., Livingstone D. et al. The impact of the changing climate on the thermal characteristics of lakes // *The Impact of Climate Change on European Lakes. Aquatic Ecology Series 4*. 2010. P. 85—101.
- [13] Diaz R. J. Overview of hypoxia around the World // *J. Env. Qual.* 2001. V. 30. P. 275—281.
- [14] Heiskanen J., Mammarella I., Haapanala S. et al. Effects of cooling and internal wave motions on gas transfer coefficients in a boreal lake // *Tellus B*. 2014. V. 66. P. 22827. <http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v66.22827>.
- [15] Heiskanen J., Mammarella I., Ojala A. et al. Effects of water clarity on lake stratification and lake-atmosphere heat exchange // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2015. V. 120. P. 7412—7428. DOI:10.1002/2014JD022938.
- [16] Gerten D., Adrian R. Climate driven changes in spring plankton dynamics and the sensitivity of shallow polymictic lakes to the North Atlantic Oscillation // *Limnol. Oceanogr.* 2000. V. 45, N 5. P. 1058—1066.
- [17] Golosov S., Maher O. A., Schipunova E. et al. Physical background of the development of oxygen depletion in ice-covered lakes // *Oecologia*. 2007. V. 151, N 2. P. 331—340.
- [18] Golosov S., Terzhevik A., Zverev I. et al. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes // *Tellus A*. 2012. V. 64. 17264. DOI: 10.3402/tellusa.v64i0.17264.
- [19] Kirillin G. Modelling the impact of global warming on water temperature and seasonal mixing regimes in small temperate lakes // *Bor. Environ. Res.* 2010. V. 15. P. 279—293.
- [20] Lewis W. M. A revised classification of lakes based on mixing // *Can. J. Fish. Aqua. Sci.* 1983. V. 40 P. 1779—1787. DOI:10.1139/f83-207.
- [21] Livingstone D. Impact of secular climate change on the thermal structure of a large temperate central European lake. // *Climatic Change*. 2003. V. 57. P. 205—225.
- [22] Lopez Bellido J., Tulonen T., Kankaala P., Ojala A. CO₂ and CH₄ fluxes during spring and autumn mixing periods in a boreal lake (Paajarvi, southern Finland) // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. G04007. DOI: 10.1029/2009JG000923.
- [23] Magnuson J., Robertson D., Benson B. et al. Historical trends in lake and river ice cover in the Northern Hemisphere // *Science*. 2000. V. 289, N 5485. P. 1743—1746.
- [24] Mironov D., Terzhevik A., Kirillin G. et al. Radiatively driven convection in ice-covered lakes: Observations, scaling, and a mixed layer model // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. P. 7—16.
- [25] O'Reilly C. M., Sharma S., Gray D. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // *Geophys. Res. Letters*. 2015. V. 42, N 24. P. 10 773—10 781.
- [26] Salonen K., Pulkkanen M., Salmi P., Griffiths R. Interannual variability of circulation under spring ice in a boreal lake // *Limnol. Oceanogr.* 2014. V. 59, N 6. P. 2121—2132.
- [27] Schulz S., Matsuyama H., Conrad R. Temperature dependence of methane production from different precursors in a profundal sediment (Lake Constance) // *FEMS Microbiology Ecology*. 1997. V. 22. P. 207—213.