УДК 556.555.4(211)

ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ МАЛЫХ АРКТИЧЕСКИХ ОЗЕР

[1]Здоровеннова Г.Э., [2,3]Федорова И.В.

[1]ФГБУН Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, e-mail: zdorovennova@gmail.com;
[2]ФГБУ Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург;
[3]Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Санкт-Петербург, e-mail: ifedorova@otto.nw.ru, i.fedorova@spbu.ru

Приведены результаты анализа термического режима трех мелководных арктических озер, расположенных на острове Самойловский в дельте р. Лены. Отмечено влияние прозрачности воды и глубины на термический режим озер, как в период ледостава, так и при открытой воде. Показано, что на фоне теплой маловетреной погоды в озерах могут создаваться условия для развития кислородного дефицита в придонных слоях.

Ключевые слова: арктические озера, термический режим, атмосферное воздействие

THE THERMAL REGIME OF SMALL ARCTIC LAKES

[1]Zdorovennova G.E., [2,3]Fedorova I.V.

[1]Northern Water Problems Institute, Petrozavodsk, e-mail: zdorovennova@gmail.com;
[2]Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg;
[3]Saint Petersburg State University, St. Petersburg, e-mail: ifedorova@otto.nw.ru, i.fedorova@spbu.ru

Results of the analysis of the thermal regime of three shallow arctic lakes located on the island of Samoilovsky in the delta of the Lena are given. Impact of transparency of water and depth on thermal regime during ice and open water are noted. It is shown that on the background of warm weather conditions for the development of oxygen deficiency in the bottom layers can be created.

Keywords: arctic lake, thermal regime, atmospheric forcing

Изучение полярных регионов является в настоящий момент одним из приоритетных научных направлений. Устьевые области впадающих в Северный Ледовитый океан (СЛО) рек, прибрежные водоемы, озера, болота, затопляемые территории являются наиболее уязвимыми природными объектами Арктики, подверженными влиянию как климатических (изменения в ледовом и уровенном режиме СЛО), так и антропогенных (интенсивная нефте- и газодобыча) факторов. Не случайно в арктической прибрежной зоне расположено множество охраняемых территорий. Прогноз состояния экосистем арктических прибрежных территорий в условиях меняющихся природных условий и непрерывно растущей антропогенной нагрузки является актуальной задачей современной лимнологии. Температурный режим, условия перемешивания и динамика ледового покрова, зависящие от вариаций в региональном климате – наиболее значимые физические процессы, определяющие функционирование экосистем водоемов. Цель исследования – изучение и численное моделирование термического и ледового режимов малых арктических озер на фоне изменений в региональном климате.

Материалы и методы исследования

Измерения температуры воды проводились в период с июля 2009 по август 2012 на небольших озерах, расположенных на острове Самойловский в южной части дельты р. Лены (72°37 с.ш., 126°49 в.д.). Дельта Лены – одна из самых больших речных дельт в мире общей площадью 45 тыс. км². Примерно в 150 км от моря Лаптевых р. Лена разветвляется по многочисленным протокам, образуя тысячи островов и озер.

Особенности климата и ландшафтов острова Самойловский рассмотрены в работах [2, 3], гидрология дельты – в работе [6]. На острове расположено 11 озер [2]. Нами был проанализирован термический режим трех из них: Molo, Fish и Банное-2 (табл. 1). В каждом из озер была размещена коса, оснащенная температурными датчиками (логеры температуры Hobo). Нижний датчик располагался вблизи границы вода-дно, выше датчики размещались с дискретностью два метра. В связи с тем, что толщина льда на исследованных озерах достигала большой толщины (более двух метров), верхние датчики периодически вмерзали в лед. Измерения температуры воды проводились с дискретностью один час в круглогодичном режиме. Замена батарей питания и считывание данных проводилось в период с 16 августа по 1 сентября 2010 г. и с 29 июня по 26 августа 2011 г. [5]. Таким образом, были получены данные по трем зимним периодам и четырем летним. По данным термокос были определены даты начала и окончания ледостава на озерах, даты начала и продолжительность подледной конвекции, продолжительность этапов летнего нагревания и осеннего охлаждения, даты достижения го-

дового максимума теплосодержания, годовая амплитуда изменчивости придонной и поверхностной температур.

Для оценки реакции озер на изменения в атмосферном воздействии использовались данные метеостанции Тикси (WMO_ID=21824, сайты «Расписание Погоды», rp5.ru и «Погода и климат» http://www.pogodaiklimat.ru/climate/21824.htm).

Результаты исследования и их обсуждение

Климат района исследований морской полярный, суровый, что определяется главным образом географическим положением – за полярным кругом; полярный день продолжается с мая по июль, полярная ночь – с начала декабря до конца января. Средняя продолжительность безморозного периода около 40–50 дней – с начала июня до середины сентября. Наиболее холодные месяцы – декабрь, январь и февраль со средней температурой – 28–30 °С; абсолютный минимум – 50.5 °С (ст. Тикси) был зарегистрирован в феврале 2002 г. Наиболее теплые месяцы – июль и август со средней температурой немногим более 7.5 °С. Абсолютный максимум температур – +34.3 °С – был зафиксирован в июле 1991 г. (ст. Тикси). Более 330 дней в году пасмурные или облачные, ясных дней около 30. В осенне–зимние и весенние месяцы преобладают юго–западные ветры (средняя скорость 5–6 м $с^{-1}$), в летние месяцы – северо–восточные (средняя скорость 4.5 м $с^{-1}$).

За период с января 2005 по ноябрь 2015 были рассчитаны среднемноголетние значения температуры приземного слоя воздуха на метеостанции Тикси для каждого месяца года и средние значения для всего года. Затем были проанализированы метеоусловия в 2009–2012 гг. Было показано, что с января по середину мая 2011 г. температура воздуха была заметно выше среднемноголетних значений, за этот же период 2010 г. – немного ниже.

Январь и февраль 2012 г. были теплее, а март и апрель – заметно холоднее соответствующих месяцев среднемноголетнего года. В летние месяцы 2010–2012 гг. температура воздуха была выше среднемноголетних значений (2005–2015 гг.), и ниже – в 2009. Октябрь–декабрь 2009 г. были холоднее, 2010 г. – теплее, а 2011 г. – близки к среднемноголетним значениям. Таким образом, за исследованный период наиболее теплым был 2011 г. (среднегодовая температура – 10.1 °С), наиболее холодным – 2009 г. со среднегодовой температурой – 12.3 °С, что близко к среднемноголетнему значению – 12.6 °С (http://www.pogodaiklimat.ru/climate/21824.htm). Среднегодовая температура в 2010 и 2012 гг. составила –11 °С и –11.6 °С, соответственно.

Ледовый и термический режимы озер. В годы выполненных на озерах инструментальных измерений водоемы замерзали в период с 26 сентября по 5 октября (табл. 2), при этом даты начала ледостава изменялись от озера к озеру незначительно, в то время как температура водной толщи варьировала заметно. Небольшое мелководное озеро Molo существенно выхолаживалось на этапе осеннего охлаждения и замерзало при более низкой температуре водной толщи (+ 0.1 + 0.3 °С). В более глубоких озерах Fish и Банное-2 температура в момент появления сплошного ледового покрова была заметно выше – + 0.3 + 0.6 °С осенью 2009 и 2011 гг. и + 1.2 + 1.6 °С осенью 2010 гг. (большее значение наблюдалось в придонных слоях озер). Высокая температура «ухода под лед» осенью 2010 г. была обусловлена более ранним началом ледостава. Осенью 2011 г. временный ледовый покров образовался на озерах Fish (26–29 сентября) и Molo (27 сентября–3 октября), затем он был взломан на фоне усиления ветра и постоянный ледовый покров появился на всех трех озерах 4–5 октября. Освобождение озер ото льда происходило во второй декаде июня, таким образом, ледостав на озерах в годы исследований продолжался около 260 суток.

Таблица 1

Характеристики озер и информация по периодам и горизонтам измерений

Озеро	Координаты	Период измерений	$H_{ср}$, м	Прозрачность, м	Горизонты измерений (расстояние от дна), м
Molo	72.37934 с.ш., 126.49255 в.д.	10.07.2009-18.08.2012	2,19	1.5	0, 2, 4
Fish	72.37319 с.ш., 126.48613 в.д.	4.07.2009-7.08.2012	3.1	2	0, 2, 4, 6
Банное-2	72.3702 с.ш., 126.4932 в.д.	6.07.2009-18.08.2012	4,30	2.5	0, 2, 4, 6

Таблица 2

Максимальная годовая температура придонных (T_{maxBot}, °C) и поверхностных (T_{maxSur}, °C) слоев трех озер, даты начала осеннего охлаждения (t_{cool}), ледостава (t_{ice-on}), весенней подледной конвекции (t_{conv}), окончания ледостава ($t_{ice-off}$), а также продолжительность ледостава (t_{ice}, сут.)

Озеро	T_{maxBot}	T_{maxSur}	t_{cool}	t_{ice-on}	t_{conv}	$t_{ice-off}$	t_{ice}
Molo	12.8	13.5	19.07.2009	1.10.2009	9.05.2010	15–17.06.2010	258–260
	17.4	18.3	19.07.2010	29.09.2010	23.04.2011	16–18.06.2011	261–263
	16.2	16.2	21.07.2011	27.09–3.10.2011 5.10.2011	24.02.2012	15–16.06.2012	254–255
	15.3	15.5	26.07.2012				
Fish	11.3	12.3	19.07.2009	1.10.2009	10.05.2010	17–23.06.2010	260–266
	15.2	17.7	19.07.2010	28.09.2010	21.04.2011	14–19.06.2011	259–264
	13.3	15.7	20.07.2011	26–29.09.2011 4.10.2011	19.02.2012	11–16.06.2012	250–256
	14.7	15.1	26.07.2012				
Банное–2	10.9	12.5	19.07.2009	5–6.10.2009	10.05.2010	3.06.2010 17–19.06.2010	255–257
	13.4	17.3	22.07.2010	28.09.2010	22.04.2011	18.06.2011	263
	12.1	15.9	26.07.2011	5.10.2011	23.02.2012	19.06.2012	257
	13.5	15.4	30.07.2012				

После появления сплошного льда наблюдался рост температуры, обусловленный теплообменом с донными отложениями, наиболее выраженный в придонных слоях водной толщи озер. В глубоком озере Банное-2 рост температуры в придонных слоях продолжался 1.5–2 месяца; в поверхностных – 3–5 недель. Максимум температуры придонных слоев в течение трех последовательных зим достигал + 1.2, + 2.1 и + 1.4 °C. Понижение температуры в придонных слоях начиналось с конца четвертого месяца ледостава, в поверхностных – в течение 2–3-го месяцев ледостава. В меньших по глубине озерах Fish и Molo рост температуры придонных слоев продолжался около месяца, поверхностных – 2–3 недели. Максимум температуры придонных слоев в течение трех последовательных зим достигал в озере Fish + 2.3, + 3.4 и + 2.4 °C, в озере Molo + 1.9, + 1.94 и + 1.83 °C. Понижение температуры придонных слоев в этих озерах начиналось со второго–третьего месяцев ледостава. В озере Molo верхний датчик вмерзал в лед каждую зиму (в середине ноября 2009 и 2011 гг. и в первой декаде октября в 2010 г.) и находился во льду до середины мая. В озере Fish верхний датчик вмерз в лед в первую зиму на непродолжительный период с конца апреля до 10–х чисел мая, в третью зиму – находился во льду с конца февраля до второй декады мая. Поскольку глубина в месте постановки термокосы в озере Fish в конце апреля 2010 г. достигала 6.15 м, а в середине февраля 2012 г. – 5.95 м, то можно оценить толщину льда на эти моменты времени – около 2.15 м и 1.95 м, соответственно.

Весенняя подледная конвекция. Выраженный рост температуры на верхнем измерительном горизонте, обусловленный радиационным прогревом воды, начинался одновременно на трех озерах с 9-10 мая 2010 г. и с 21–23 апреля 2011 г., соответственно. В менее прозрачных озерах Fish и Molo конвекция не достигала дна, зато температура конвективного слоя к моменту взлома льда повышалась до 4.2 и 5.4 °C, соответственно. Интересно, что в наиболее прозрачном озере Банное-2 с 11 мая 2010 г. и с 22 апреля 2011 г. до конца ледостава температура всех датчиков была практически одинаковой, то есть конвекция достигала дна за считанные дни и водная толща нагревалась далее в состоянии гомотермии. Температура водной толщи озера к моменту вскрытия льда не превышала 3.5 °C в 2010 г. и 3.9 °C в 2011 г. Особые температурные условия данного озера объясняются затоком в весенний период речных вод, т.к. озеро Банное-2 еще имеет унаследованные черты старичного водоема [2].

Весной 2012 г. заметное повышение температуры воды в подледном слое началось на всех озерах уже в середине февраля. К концу ледостава температура водной толщи озер повысилась значительно – датчик, расположенный на горизонте 2 м

над дном в озере Fish, показывал значения + 5.7 °С, в озере Molo на том же горизонте + 5.8 °С. Водная масса озера Банное-2 до середины мая находилась в состоянии гомотермии, как и в предыдущие годы, и достигла температуры 3.7 °С, затем температура на верхнем горизонте продолжила повышаться и достигла 5.3 °С, в то время как на нижележащих горизонтах рост температуры остановился. Таким образом, подледная конвекция, продолжалась около 40 суток в 2010 г., более 50 – в 2011 г. и более трех месяцев в 2012 г.

Период открытой воды. После взлома льда (вторая декада июня) температура водной толщи озер продолжала повышаться под действием радиационного нагрева, однако устойчивой стратификации в них не развивалось в связи с тем, что в районе исследований в летние месяцы нередки похолодания с резким падением температуры до близких к нулю значений и с усилениями ветра.

В летние месяцы холодного 2009 г. и 2012 г., близкого к среднему по температуре воздуха за период с 2005 по 2015 гг., водная толща озера Molo практически постоянно находилась в состоянии гомотермии, за исключением коротких периодов продолжительностью не более двух суток, когда разница придонных и поверхностных температур достигала одного-двух градусов. Теплым летом 2011 и 2012 гг. периоды стратификации могли продолжаться по 3–5 суток, при этом разница поверхностных и придонных температур достигала 5 °С. Частые перемешивания водной толщи способствовали передаче тепла в нижележащие слои воды и верхние слои донных отложений, которые активно накапливали тепло. В мелководном озере Molo были зафиксированы самые высокие температуры как поверхностных (18.3 °С), так и придонных (17.4 °С) слоев (табл. 2).

В более глубоком озере Fish периоды стратификации продолжались дольше, и разница температур поверхностных и придонных слоев достигала больших величин. Например, теплым летом 2010 г. водная толща озера была стратифицирована с 29 июня по 23 июля, то есть, почти в течение месяца. Летом 2011 г. стратификация наблюдалась с 26 июня по 7 июля и с 9 по 26 июля. Разница температур придонных и поверхностных слоев периодически достигала 5–6 °С.

Водная толща самого глубокого из исследованных озер Банное-2 холодным летом 2009 г. была хорошо перемешана, периоды термической стратификации не превышали 2–3 суток, разница температур поверхностных и придонных слоев редко достигала 3–4 °С. Теплым летом 2010 г. стратификация сохранялась практически с момента очищения акватории ото льда и до первой декады августа, то есть, более 1.5 месяца. В результате этого к концу июля температура придонных слоев озера увеличилась всего до 5.5 °С, при этом температура поверхностных повысилась до 17.3 °С, то есть разница температур превышала 10ºС. И только после разрушения сезонного термоклина и полного перемешивания водной толщи озера в последних числах июля произошло выравнивание температур по вертикали и скачкообразное повышение температуры придонного слоя до 12–13 °С. Подобная картина наблюдалась и теплым летом 2011 г. Летом 2012 г., с близкими к среднемноголетним погодными условиями, водная толща озера была хорошо перемешана с момента освобождения ото льда до начала второй декады июля. Затем наблюдалось три периода устойчивой стратификации продолжительностью по 6–7 суток, которые чередовались полным перемешиванием водной толщи на фоне резких похолоданий. При этом температура придонных слоев скачкообразно повышалась и достигла 13.5 °С к концу июля.

Годовой максимум теплосодержания водной толщи озер достигался во второй-третьей декадах июля (табл. 2), то есть этап летнего нагревания продолжался немногим более месяца. После достижения годового максимума теплосодержания начинался этап осеннего охлаждения озер, который продолжался около двух месяцев. Озера охлаждались в состоянии близком к гомотермии.

Таким образом, в период открытой воды на фоне теплой маловетреной погоды в озерах возникала прямая термическая стратификация водной толщи, ослаблялась аэрация придонных слоев, и, следовательно, создавались условия для развития дефицита кислорода.

Расчетные данные показывают, что отклик озерных экосистем на изменения климата будет определяться особенностями батиметрии, прозрачностью воды и трофическим статусом водоемов [1, 4]. При потеплении будет усиливаться термическая стратификация водной толщи небольших бореальных и арктических озер, что может явиться причиной серьезных изменений в их кислородном режиме, вплоть до развития аноксии в придонных слоях.

Заключение

Был проведен анализ данных круглогодичных измерений температуры в трех

арктических озерах с разной глубиной и прозрачностью воды. Было показано, что в период ледостава основными слагаемыми теплового бюджета озер являются теплообмен с донными отложениями и весенняя подледная конвекция. В более прозрачных озерах конвекция может охватывать всю водную толщу, выравнивая содержание растворенных и взвешенных веществ по вертикали, и, оказывая, таким образом, существенное влияние на функционирование озерной экосистемы.

В период открытой воды погодные условия и глубина имеют определяющее влияние на режим перемешивания в озерах. Наиболее серьезные изменения могут произойти в глубоких озерах в теплые годы, когда формируется устойчивая температурная стратификация, препятствующая перемешиванию.

В дальнейшем планируется провести серию численных экспериментов для оценки влияния возможных изменений регионального климата на термический режим разнотипных арктических озер. Будет использована одномерная параметризованная математическая модель FLake (http://nwpi.krc.karelia.ru/flake; http://lakemodel.net), позволяющая воспроизводить сезонную динамику термической структуры и условий перемешивания в озерах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-05-00787_а) и в рамках выполнения Соглашения № 14-37-00038 от 15.09.2014 на выполнение исследований по теме «Изменения окружающей среды в Арктике и их влияние на население и хозяйство» в рамках конкурса РНФ «Проведение фундаментальных научных исследований новыми научными лабораториями».

Список литературы

1. Здоровеннова Г.Э., Голосов С.Д., Зверев И.С., Здоровеннов Р.Э., Тержевик А.Ю. Реакция термической структуры малых бореальных озер на различные сценарии атмосферного воздействия // Успехи современного естествознания. – 2015. – № 10. – С. 100–103.

2. Четверова А.А., Федорова И.В., Потапова Т.М., J. Boike. Гидрологические и геохимические особенности современного состояния озер о. Самойловский в дельте р. Лена. // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2013. – № 1 (95). –С. 97–110.

3. Boike J., Kattenstroth B., Abramova K., Bornemann N., Chetverova A., Fedorova I., Fröb K., Grigoriev M., Grüber M., Kutzbach L., Langer M., Minke M., Muster S., Piel K., Pfeiffer E.-M., Stoof G., Westermann S., Wischnewski K., Wille C., and Hubberten H.-W. Baseline characteristics of climate, permafrost, and land cover from a new permafrost observatory in the Lena River Delta, Siberia (1998–2011). // Biogeosciences. – 2013. – V.10. – P. 2105–2128. doi:10.5194/bg-10-2105-2013.

4. Blenckner T., Omstedt A., Rummukainen M. Swedish case study of contemporary and possible future consequences of climate change on lake function // Aquatic Sciences – Research Across Boundaries. – 2002. – V. 64. – P. 171–184.

5. Шадрина А.А., Федорова И.В., Голосов С.Д., Евдокимов А.А., Boike J. Термический режим озер Арктики. Труды VIII Международной научно-практической конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». – Том I. – Москва, РУДН, 24–27 ноября 2014 г. – С. 581–589.

6. Fedorova I., Chetverova A., Bolshiyanov D., Makarov A., Boike J., Heim B., Morgenstern A., Overduin P., Wegner C., Kashina V., Eulenburg A., Dobrotina E., Sidorina I. Lena Delta hydrology and geochemistry. Biogeosciences Discuss. – 10, 20179-20237, – 2013 – http://www.biogeosciences-discuss.net/10/20179/2013/bgd-10-20179-2013.html DOI:10.5194/bgd-10-20179-2013.