

УДК 556.555.4:556.072(211)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА
МАЛЫХ АРКТИЧЕСКИХ ОЗЕР****¹Здоровеннова Г.Э., ³Шадрина А.А., ^{2,3}Федорова И.В.**¹ФГБУН «Институт водных проблем Севера» Карельского научного центра РАН,
Петрозаводск, e-mail: zdorovennova@gmail.com;²ФГБУ «Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт»,
Санкт-Петербург;³Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле,
Санкт-Петербург, e-mail: ifedorova@otto.nw.ru, i.fedorova@spbu.ru

Приведены результаты моделирования термического режима трех мелководных арктических озер, расположенных на острове Самойловский в дельте р. Лены, с использованием одномерной параметризованной математической модели Flake. Показано, что модельные даты начала ледовых явлений на озерах опережают наблюдаемые на несколько суток, окончания – запаздывают на 5–10 суток. Годовой ход температуры воды в озерах воспроизводится моделью достаточно хорошо, однако ряд характерных черт термического режима озер в период ледостава (весенняя подледная конвекция, понижение придонной температуры во вторую половину зимы) не воспроизводится. Отмечено влияние прозрачности воды и глубины озер на их термический режим. Показано, что в период открытой воды на фоне теплой маловетреной погоды в озерах при понижении прозрачности могут создаваться условия для развития кислородного дефицита в придонных слоях.

Ключевые слова: арктические озера, термический режим, атмосферное воздействие, перемешивание, модель Flake

THE MODELLING OF THE THERMAL REGIME OF SMALL ARCTIC LAKES**¹Zdorovennova G.E., ³Shadrina A.A., ^{2,3}Fedorova I.V.**¹Northern Water Problems Institute, Petrozavodsk, e-mail: zdorovennova@gmail.com;²Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg;³Saint Petersburg State University, St. Petersburg, e-mail: ifedorova@otto.nw.ru, i.fedorova@spbu.ru

Results of the modeling of the thermal regime of three shallow arctic lakes located on the Samoilovsky Island in the delta of the Lena are given; a one-dimensional mathematical model Flake is used. It is shown that the start date of the ice-period in accordance with the model come a few days earlier and end date occur 5–10 days later than it is observed. The annual course of water temperature is reproduced quite well. However, the model does not reproduce a number of characteristics of the thermal regime of lakes in the freeze-up period (spring under-ice convection, decrease of the bottom water temperature in the second half of winter). Impact of transparency of water and depth on thermal regime during 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 lakes, thermal regime, atmospheric forcing, mixing, Flake model

Термический и ледовый режимы арктических озер определяются их географическим положением и характеризуются главным образом непродолжительным периодом открытой воды (2–3,5 месяца) и большой толщиной льда (1,5–2 м) [4, 6]. Изменения регионального климата последних десятилетий оказывают заметное влияние на продолжительность ледостава на арктических озерах, изменяя в первую очередь даты окончания ледостава. Сокращение продолжительности ледостава и, как следствие, более длительный период испарения приводят к уменьшению глубины озер, изменяют сроки замерзания, толщину льда и вносят таким образом существенные изменения в функционирование озерных экосистем [6, 9].

В 2009–2012 гг. силами сотрудников российско-германской Лаборатории полярных и морских исследований им. Отто Юльевича Шмидта (ААНИИ) и германских коллег из Института Альфреда Вегенера, Центра полярных и морских исследований им. Гельмгольца (AWI) в рамках экспедиции «Лена» проводились комплексные гидрофизические, палеолимнологические и химико-биологические исследования мелководных водоемов, расположенных на прибрежных территориях арктической зоны, направленные на оценку уязвимости их экосистем при возрастающем антропогенном воздействии на фоне изменяющихся климатических условий [4, 5, 7, 10]. В рамках экспедиции были обследованы многочисленные мелководные озера, марши, лайды, устья

впадающих в Северный Ледовитый океан рек, затапливаемых в период приливов и нагонов, болота и заболоченные территории. В дельте реки Лены насчитывается около 1,5 тысяч островов и 60 тысяч озер. В южной части дельты Лены исследования были сосредоточены в районе острова Самойловский (72°37 с.ш., 126°49 в.д.), на котором находится 11 озер. **Цель исследования** – изучение и численное моделирование термического и ледового режимов малых арктических озер острова Самойловский на фоне изменений в региональном климате.

Материалы и методы исследования

Моделирование термического режима и условий перемешивания озер проводилось с использованием одномерной параметризованной математической модели Flake [11]. Эта модель, разработанная сотрудниками Института озераведения РАН, Института водных проблем Севера (ИВПС КарНЦ РАН), Института водной экологии и внутреннего рыбоводства Германии (IGB) и Службы погоды Германии (DWD) [3], позволяет анализировать основные особенности термодинамики озера и ледовых явлений. Круглогодичные непрерывные измерения температуры воды проводились в период с июля 2009 по август 2012 на озерах Моло, Рыба и Банное-2. Основные гидрологические характеристики озер приведены в работе [4]. Анализ рядов температуры воды (датчики располагались на 3–4 горизонтах: на границе вода – дно и выше через 2 м в водной толще) позволил установить основные особенности термического и ледового режимов озер, определить даты замерзания и освобождения ото льда, начала весенней подледной конвекции и осеннего охлаждения [2].

Для оценки реакции озер на изменения в атмосферном воздействии использовались данные метеостанции «Столб Остров» (72,40° с.ш., 126,30° в.д., Республика Саха, Булунский улус) (сайты «Расписание погоды», pr5.ru и «Погода и климат»).

Результаты исследования и их обсуждение

Озеро Моло. При модельных расчетах были приняты следующие допущения: средняя глубина озера 2,2 м, прозрачность 1,5 м, толщина теплоактивного слоя донных отложений 3,5 м, температура на его нижней границе 2°С. Даты замерзания озера Моло по модельным расчетам наступали раньше – на неделю осенью 2009 и 2011 гг. и на двое суток позже в 2010 г., даты взлома льда – на 8–10 суток позже в июне 2010 и 2011 гг. и на 4–5 суток позже в июне 2012 г. Расчетная придонная температура была заметно завышена в зиму 2009–2010 гг. и достаточно близка к реальности в две следующие зимы (рис. 1). Модель хорошо воспроизвела характерный ход придонной температуры в течение зимы: резкий рост после замерзания озера и постепенное понижение начиная с третьего месяца ледостава. Посколь-

ку термокарстовое озеро Моло достаточно мелководное, весенняя подледная конвекция охватывает всю его водную толщу до дна, и конвективный подледный прогрев хорошо заметен в конце зимнего сезона даже в придонных слоях озера (линии 1 и 2 на рис. 1). Модель не воспроизвела этого явления: придонная температура продолжала понижаться, а поверхностная – была равна нулю до взлома льда. Максимальная расчетная толщина льда достигла в первую и третью зимы 1,95 м, во вторую – 1,85 м, что достаточно близко к реальности. В период открытой воды расхождение измеренных и рассчитанных температур (как для поверхностных, так и придонных слоев водной толщи) было минимальным.

Озеро Рыба. При модельных расчетах были приняты следующие допущения: средняя глубина озера 3,1 м, прозрачность 2 м, толщина теплоактивного слоя донных отложений 4 м, температура на его нижней границе 2°С. Даты замерзания озера Рыба и освобождения озера ото льда по модельным расчетам, как и для озера Моло, отличались от данных наблюдений: ледостав наступал на 3–7 суток раньше, заканчивался на 5–10 суток позже. Расчетная придонная «зимняя» температура для озера Рыба плохо воспроизводила реальность: была наиболее близка к данным измерений только в первую зиму (рис. 2) и заметно занижена во вторую и третью. По данным наблюдений придонная температура на озере Рыба резко увеличивалась в течение первого месяца ледостава, затем следовало ее выраженное уменьшение. Однако по модельным данным придонная температура заметно увеличивалась после замерзания озера, затем оставалась практически неизменной до конца зимы. Максимальная расчетная толщина льда достигала 1,9–2 м. В период открытой воды модель достаточно реалистично описывала как поверхностную, так и придонную температуру.

Озеро Банное-2. При модельных расчетах были приняты следующие допущения: средняя глубина озера 4,3 м, прозрачность 2,5 м, толщина теплоактивного слоя донных отложений 4 м, температура на его нижней границе 2°С. Расчетные даты замерзания озера Банное-2 в первую и третью осень опережали на 5–8 суток, во вторую осень – запаздывали на двое суток относительно наблюдаем. Даты освобождения озера ото льда по модельным расчетам в первые два года наблюдений запаздывали на 8–10 суток, в третий год – практически со-

впали с наблюдаемыми (рис. 3). Модельная придонная температура в зимний период воспроизводилась достаточно реалистично для первой и третьей зим, однако так же, как и на других озерах, модель не воспроизводила явления весенней подледной конвекции. Особенностью озера Банное-2 является то, что в конце ледостава возможен

существенный приток речных вод, вследствие этого наблюдается характерное резкое падение температуры как поверхностных, так и придонных горизонтов (рис. 3, линии 1 и 2, май 2011 и 2012 гг.). Естественно, такую характерную черту термического режима озера модель также не смогла воспроизвести.

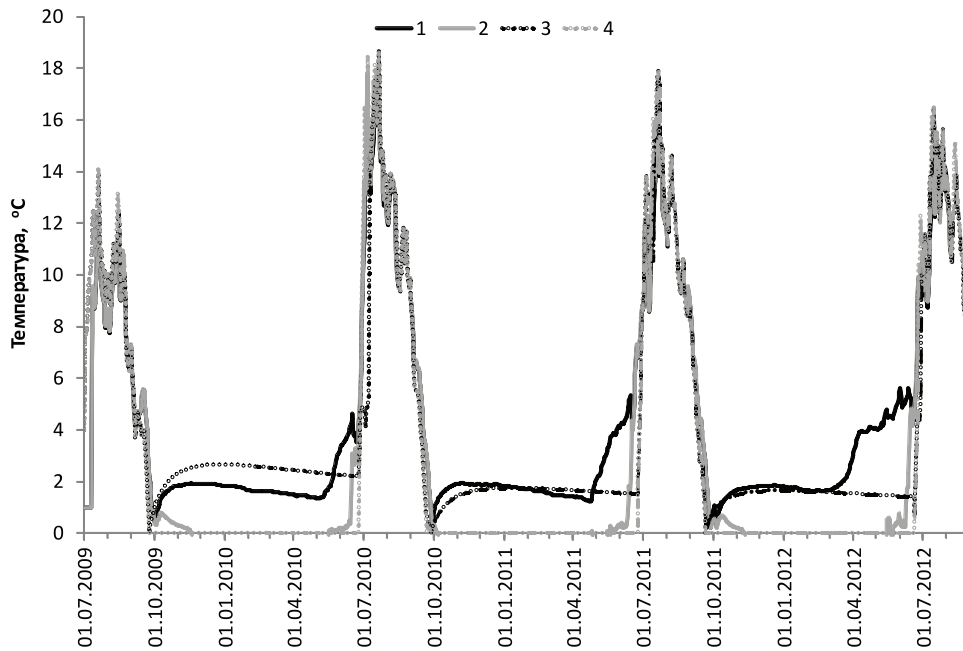


Рис. 1. Температура водной толщи озера Моло в период с июня 2009 по август 2012 г. Здесь и на рис. 2–4: 1 – измеренная придонная температура; 2 – измеренная поверхностная температура; 3 – модельная придонная температура; 4 – модельная поверхностная температура

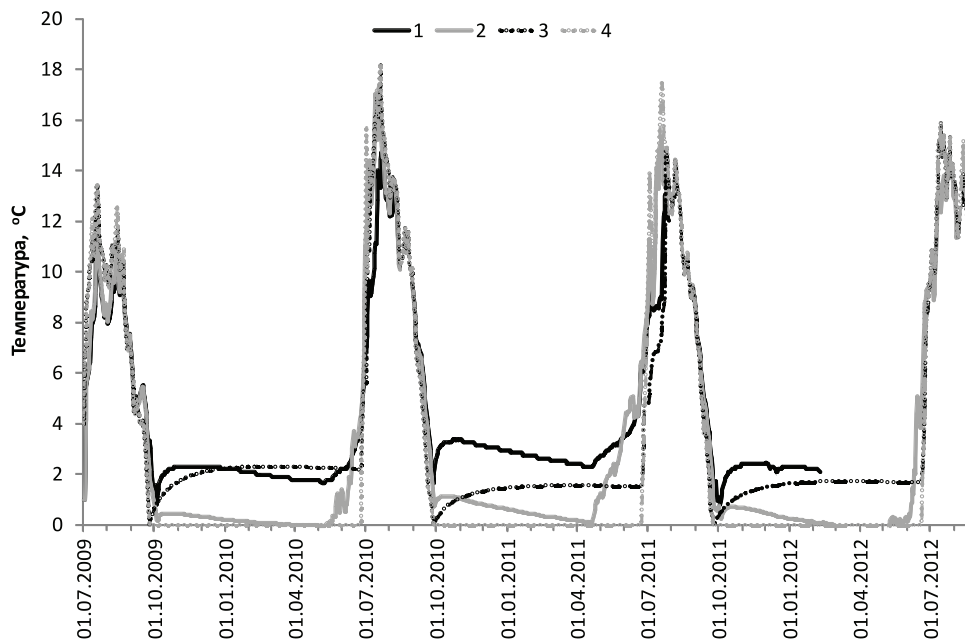


Рис. 2. Температура водной толщи озера Рыба в период с июня 2009 по август 2012 г.

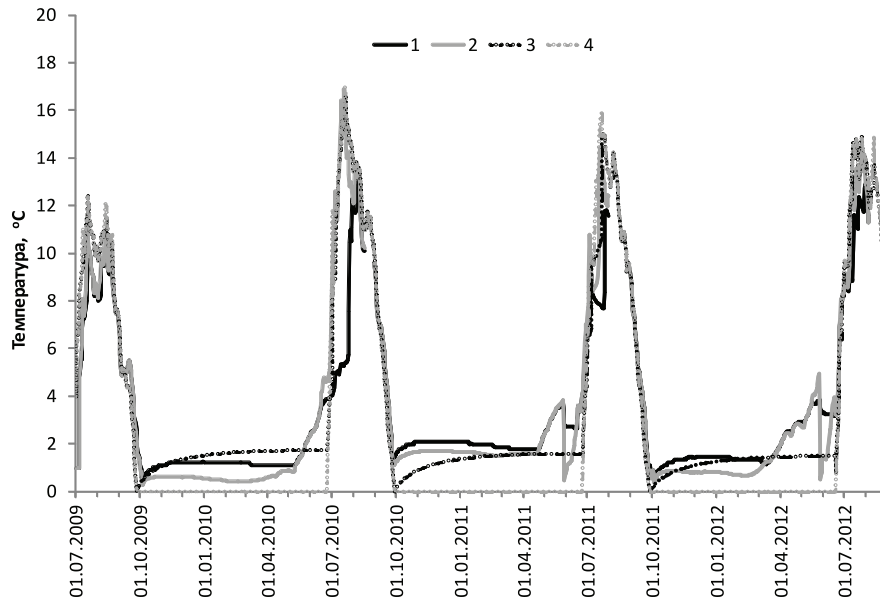
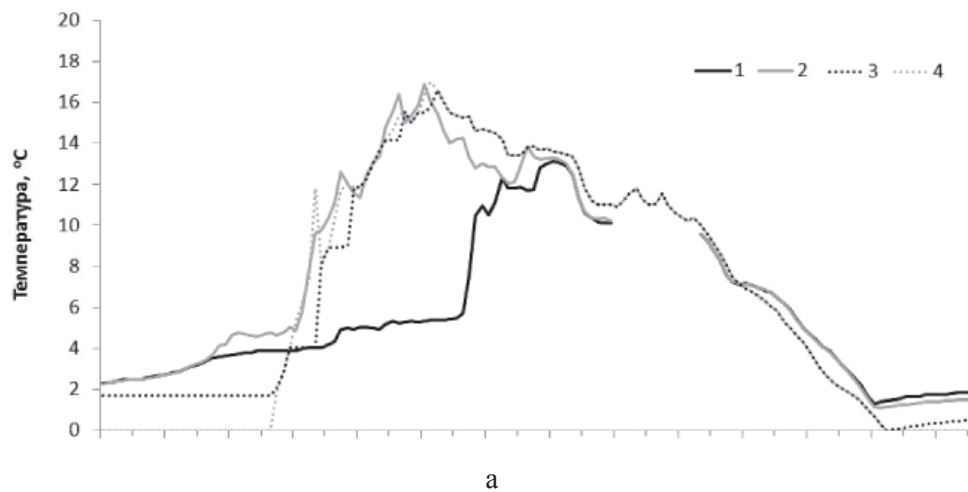
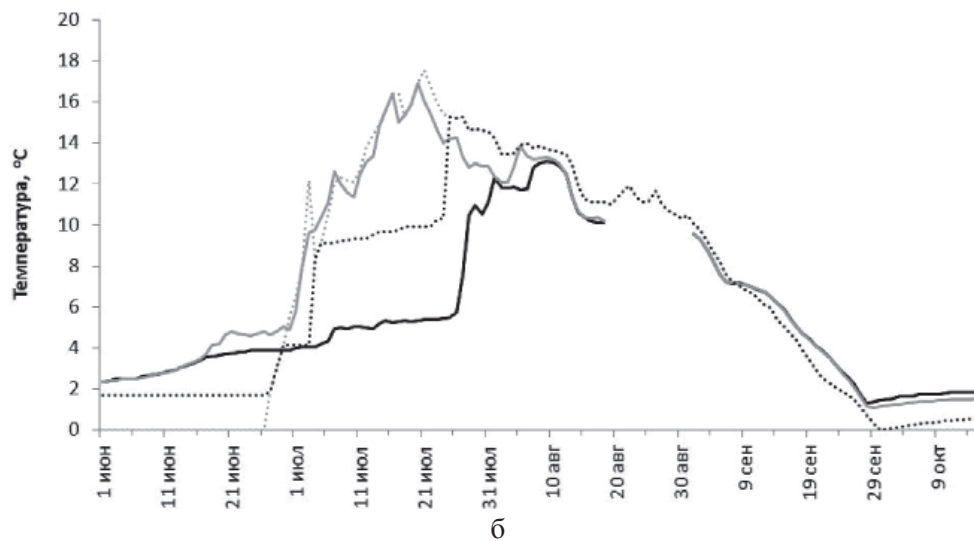


Рис. 3. Температура водной толщи озера Банное-2 в период с июня 2009 по август 2012 г.



а



б

Рис. 4. Температура водной толщи озера Банное-2 в период с 1 июня по 15 октября 2010 г.:
а – прозрачность 2,5 м; б – прозрачность 1,7 м

В период открытой воды на фоне жаркой безветренной погоды в озере Банное-2 возможно развитие термического расслоения водной толщи, что и наблюдалось летом 2010 и 2011 гг. Например, в период с 1 по 25 июля 2010 г. придонная температура изменялась в пределах 4–5 °С, в то время как поверхностная поднялась до 16–18 °С, разница температур придонного и поверхностного слоев достигала 13 °С (рис. 4, а). При заданных значениях прозрачности (2,5 м), такое расслоение моделью не воспроизводилось (рис. 4, а). Модельные расчеты показали, что при уменьшении прозрачности на метр происходят заметные изменения в характере придонной температуры, в частности на протяжении первых двух декад июля модельная придонная температура не поднималась выше 9–10 °С, при этом разница поверхностных и придонных температур не превышала 8 °С (рис. 4, б). Таким образом, при уменьшении прозрачности происходит термическое расслоение водной толщи озера, что в условиях ограниченного ветрового перемешивания и отсутствия аэрации водной толщи может приводить к ухудшению кислородных условий в придонных слоях. Подобные результаты были получены при моделировании термического режима boreальных озер с разной прозрачностью [1].

Результаты моделирования термического режима других озер острова Самойловский с помощью модели Flake показали, что средняя измеренная температура воды озер хорошо совпадает с расчетными данными [5, 8]. Моделью хорошо воспроизводится летняя стратификация для озер со средней глубиной более 5 м. Однако что касается периода ледостава, то модельные расчеты не воспроизводят характерный ход придонной температуры озер – резкое повышение после замерзания и постепенное уменьшение, начиная с 3–4 месяцев ледостава в течение зимы. Кроме того, моделью не воспроизводится весенняя подледная конвекция – по расчетным данным поверхностная температура сохраняется равной нулю до взлома озера.

Заключение

Было проведено математическое моделирование термического режима трех арктических озер с разной прозрачностью и глубиной и сравнение расчетных данных с данными круглогодичных измерений тем-

пературы в этих озерах. Модельные даты начала и окончания ледостава заметно отличаются от натуральных. Было показано, что модель хорошо воспроизводит термические условия озер в период открытой воды. В период ледостава общий ход придонной температуры воспроизводится достаточно неплохо, однако такие характерные черты термического режима, как выраженное понижение придонной температуры со 2–3 месяца ледостава и весенняя подледная конвекция, не воспроизводятся.

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 «Изменение 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. и др. Реакция термической структуры малых boreальных озер на различные сценарии атмосферного воздействия // Успехи современного естествознания. – 2015. – № 10. – С. 100–103.
2. Здоровеннова Г.Э., Федорова И.В. Термический режим малых арктических озер // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 12(8). – С. 1452–1456.
3. Кондратьев С.А., Голосов С.Д., Зверев И.С. и др. Моделирование абиотических процессов в системе водосбородомом. – СПб.: ИО РАН, 2010. – 102 с.
4. 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.
5. Шадрин А.А., Федорова И.В., Голосов С.Д. и др. Термический режим озер Арктики. Тр. VIII Межд. науч.-практ. конф. «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». – Т. I. – М.: РУДН, 2014. – С. 581–589.
6. Arp C.D., Jones B.M., Grosse G. Recent lake ice-out phenology within and among lake districts of Alaska, USA // Limnol. Oceanogr. Methods. – 2013. – № 58(6). – P. 2013–2028.
7. Boike J., Kattenstroth B., Abramova K. et al. Baseline characteristics of climate, permafrost, and land cover from a new permafrost observatory in the Lena River Delta, Siberia (1998–2011) // Biogeosciences. – 2013. – Vol. 10. – P. 2105–2128. doi:10.5194/bg-10-2105-2013.
8. Boike J., Georgi C., Kirilin G. et al. Thermal processes of thermokarst lakes in the continuous permafrost zone of northern Siberia – observations and modeling (Lena River Delta, Siberia) // Biogeosciences. – 2015. – Vol. 12. – Issue 20. – P. 5941.
9. Duguay C.R., Prowse T.D., Bonsal B.R. et al. Recent trends in Canadian lake ice cover // Hydrol. Processes. – 2006. – № 20. – P.781–801.
10. Fedorova I., Chetverova A., Bolshiyonov D. et al. Lena Delta hydrology and geochemistry. Biogeosciences Discuss. – 10.20179-20237. – 2013 – doi:10.5194/bgd-10-20179-2013.
11. Lake model FLake. – http://nwpi.krc.karelia.ru/flake.