

УДК 556.555.4:551.51

РЕАКЦИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МАЛЫХ БОРЕАЛЬНЫХ ОЗЕР НА РАЗЛИЧНЫЕ СЦЕНАРИИ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

¹Здоровеннова Г.Э., ^{1,2}Голосов С.Д., ²Зверев И.С., ¹Здоровеннов Р.Э., ¹Тержевик А.Ю.

¹ФГБУН «Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН», Петрозаводск, e-mail: zdorovennova@gmail.com;

²ФГБУН «Институт озероведения РАН», Санкт-Петербург, e-mail: sergey_golosov@mail.ru

Серия численных экспериментов, проведенных с использованием простой одномерной модели FLake, позволила оценить влияние возможных изменений атмосферной нагрузки на термический режим озер умеренной зоны в течение года. В качестве модельных объектов рассматривались озера со средней глубиной 5, 10 и 15 м, с двумя вариантами прозрачности воды (1 и 3 м по диску Секки) для четырех климатических сценариев. Показано, что наиболее серьезным изменениям подвержены мелкие озера: при понижении прозрачности воды термоклин в них формируется в самом начале лета и существует до начала осени. В такой ситуации повышается потенциальный риск развития дефицита кислорода в придонных слоях озер.

Ключевые слова: термический режим, бореальное озеро, атмосферное воздействие

RESPONSE OF THE THERMAL REGIME OF SMALL BOREAL LAKES ON DIFFERENT SCENARIOS OF ATMOSPHERIC FORCING

¹Zdorovennova G.E., ^{1,2}Golosov S.D., ²Zverev I.S., ¹Zdorovennov R.E., ¹Terzhevik A.Y.

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

²Institute of Limnology, St.-Petersburg, e-mail: sergey_golosov@mail.ru

A series of numerical experiments conducted with a simple lake model FLake, allowed us to assess the possible impact of varying atmospheric forcing on the thermal regime of shallow boreal lakes in the course of year. The lakes with an average depth of 5, 10 and 15 m, with two versions of water transparency (1 and 3 m of Secchi disc depth) for the four climate scenarios are considered. It is shown that the most significant changes in the thermal regime of small boreal lakes occur with decreasing transparency. In this case, the lake thermocline may exist for the whole summer. Potential risk of oxygen deficiency in the bottom layers of the lake rises in that situation.

Keywords: thermal regime, boreal lake, atmospheric forcing

Одной из актуальных задач современной лимнологии является прогноз состояния озерных экосистем в условиях меняющихся природных условий и непрерывно растущей антропогенной нагрузки. Особая роль при этом принадлежит разработке методов прогноза и оценки пространственно-временной изменчивости полей параметров, определяющих качество воды в водных объектах. Среди многочисленных процессов, определяющих поведение озерных экосистем, первостепенную значимость имеют режим растворенного кислорода и внутренняя биогенная нагрузка. Оба находятся под сильным влиянием физических процессов, в первую очередь, температурного режима, условий перемешивания и динамики ледового покрова [1, 5]. Поскольку последние определяются атмосферным воздействием, то они зависят от вариаций в региональном климате. Несмотря на большое количество выявленных взаимодействий между физическими и химико-биологическими процессами в озерах, до сих пор существует недостаточное понимание того, каким образом озерные экосистемы реагируют на изменения температуры воды и условий

перемешивания, которые, в свою очередь, вызываются изменениями в атмосферном воздействии. Цель исследования – численное моделирование отклика термического режима небольших бореальных озер на возможные изменения в региональном климате.

Материалы и методы исследования

Для проведения численных экспериментов использовалась одномерная параметризованная математическая модель FLake (<http://nwpi.krc.karelia.ru/flake>; <http://lakemodel.net>) [9]. Расчеты выполнялись с суточным шагом по времени с выходом на периодическое решение. Для оценки реакции малого бореального озера на возможные изменения в атмосферном воздействии были рассмотрены следующие модельные сценарии:

- 1) «среднегодовое» год со средним ветром;
- 2) «среднегодовое» год с «сильным» ветром;
- 3) «теплый» год со средним ветром;
- 4) «теплый» год с «сильным» ветром.

В качестве модельных объектов рассматривались озера со средней глубиной 5, 10 и 15 м, с двумя вариантами прозрачности воды (1 и 3 м по диску Секки). Всего, таким образом, было проанализировано 24 варианта.

В качестве предполагаемого района исследований был выбран юг Карелии, на территории ко-

торой широко распространены мелководные озера водно-ледникового происхождения [4]. Для анализа изменчивости климатических условий района исследований использовались данные метеостанций Федеральной службы РФ по гидрометеорологии и мониторингу природной среды «Суоярви» и «Петрозаводск».

Анализ среднемесячных значений метеорологических параметров за период с января 1945 по декабрь 2001 (Суоярви) и декабрь 2006 гг. (Петрозаводск) позволил получить их среднегодовое значения для каждого месяца и средние значения для всего года. По среднесуточным значениям температуры воздуха в приземном слое ГМС «Петрозаводск» за период с января 1962 по декабрь 1978 гг. были рассчитаны средние значения и стандартные отклонения для каждого месяца года. Затем каждый месяц года за период с января 1962 по декабрь 1978 гг. был охарактеризован как теплый или холодный относительно среднегодового значения. Наиболее близким к среднегодовому году оказался 1964 г., когда среднегодовая температура была выше среднегодового значения на 0,1 °С, а годовая сумма отклонений от среднегодового значения составила + 0,6 °С. Близкими к среднегодовому году были также 1973 и 1977 гг., (среднее за год отклонение – 0,2 и – 0,3 °С, годовая сумма отклонений от среднегодового значения – 1,9 и – 3,4 °С). Девять месяцев 1974 и 1975 гг. были теплее соответствующих месяцев среднегодового года, среднегодовая температура была выше среднегодового значения на 1,5 °С, годовая сумма отклонений каждого месяца от соответствующего месяца среднегодового года составила + 18,5 и + 17,5 °С, соответственно. Выделенные годы использовались для моделирования различных сценариев атмосферного воздействия.

Среднемесячные значения рассматриваемых параметров (температура и влажность воздуха, скорость ветра и средняя облачность) были «развернуты» в наборы их среднесуточных значений, по статистической модели, предложенной в работе [6].

Результаты исследования и их обсуждение

Для упрощения анализа, расчетные данные были нормированы на соответствующие значения, полученные для «среднегодового» года со «средним» ветром.

Средняя глубина 5 м. В случае прозрачности воды 1 м основные изменения – снижение до 50% – средней температуры воды для всех случаев атмосферных воздействий отмечались в подледный период (рисунок, А). Придонная температура существенно уменьшилась – на 40–60% – в случае «теплого» года с сильным ветром на протяжении всего года (рисунок, Б). При прозрачности 3 м, изменения средней температуры воды носили практически такой же характер (рисунок, В), а придонная температура менялась в основном в подледный период (уменьшение до 30–40%) (рисунок, Г).

Средняя глубина 10 м. В случае прозрачности воды 1 м, основное влияние

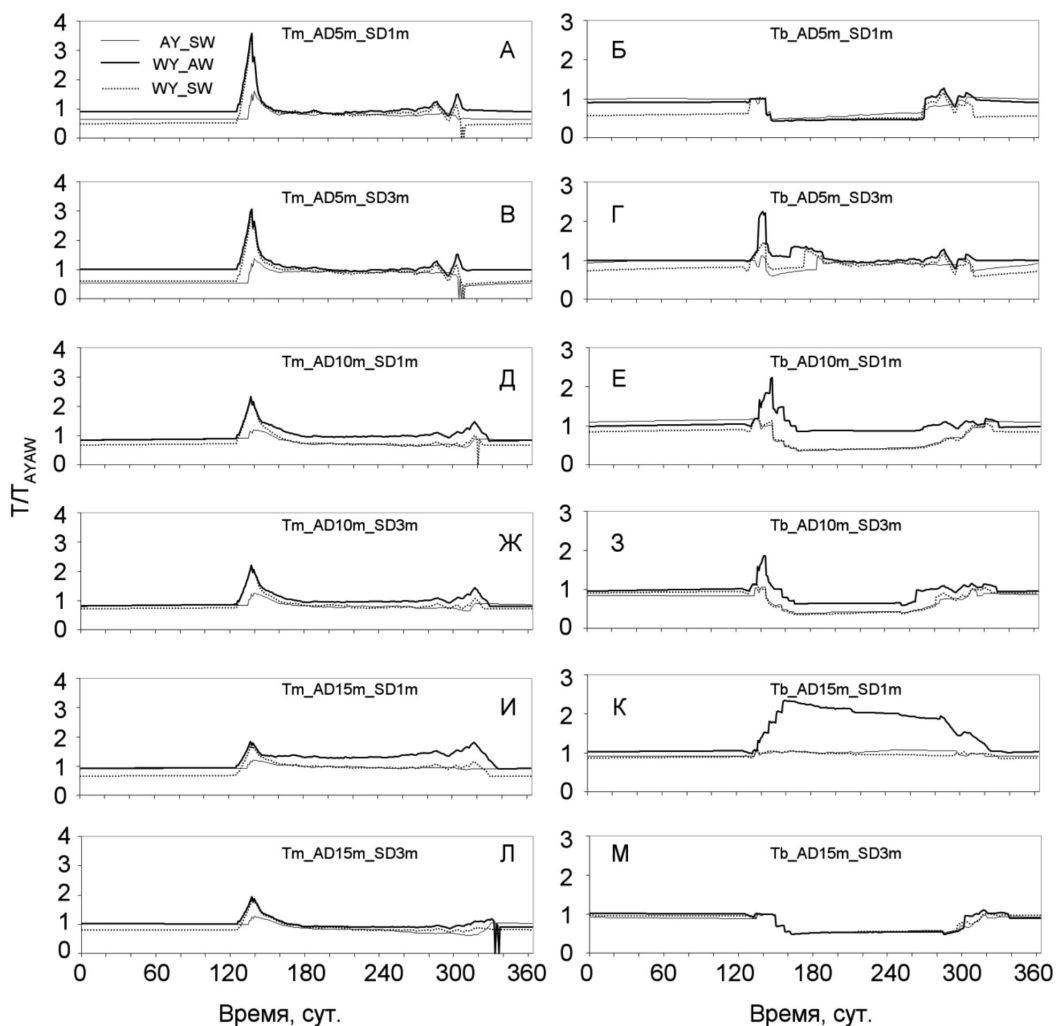
на среднюю (рисунок Д – уменьшение до 30%) и придонную температуру воды (рисунок, Е – уменьшение до 50%) оказал сильный ветер. При прозрачности 3 м средняя температура воды уменьшилась на 20–25% в подледный период в случае «теплого» года с сильным ветром и увеличилась на 20% в период открытой воды (рисунок, Ж).

Средняя глубина 15 м. При прозрачности воды 1 м в случае сильного ветра средняя температура воды понижается в подледный период на 30% и повышается до 50% в период открытой воды в условиях «теплого» года (рисунок, И). Придонная температура в «теплый» год в период открытой воды повышается в два и более раза (рисунок, К). При прозрачности 3 м средняя температура воды понижается на 20% в случае «теплого» года с сильным ветром (рисунок, Л). Придонная температура наибольшие изменения – снижение до 50% – претерпевает во всех случаях атмосферной нагрузки в период открытой воды (рисунок, М).

Для анализа влияния прозрачности воды на динамику термической структуры озер, результаты расчетов для прозрачности 1 м были нормированы на соответствующие значения для прозрачности 3 м.

Средняя глубина 5 м. Для подобных озер изменения при уменьшении прозрачности носят драматический характер. Практически сразу после начала летнего прогрева в них формируется значительный перепад плотности между поверхностными и придонными слоями воды («термоклин»), который постоянно существует до начала осеннего охлаждения. Изменчивость температуры перемешанного слоя повышается, придонная температура в середине лета уменьшается практически вдвое, средняя по столбу становится ниже (в пределах 20%).

Средняя глубина 10 м. Для этого класса озер изменения при уменьшении прозрачности не столь существенны. Озеро остается стратифицированным, но период существования стратификации сокращается приблизительно на месяц. Изменчивость температуры перемешанного слоя повышается, средняя по столбу температура воды остается почти без изменений, придонная температура, начиная приблизительно со 150-х суток, резко возрастает (более чем в два с половиной раза) и остается высокой до сентября, когда озеро перемешивается от поверхности до дна (т.н. период осенней гомотермии).



Изменчивость средней и придонной температуры воды по отношению к таковым для «среднегодовалого» со «средним» ветром года в озере со средней глубиной 5, 10 и 15 м и прозрачностью по диску Секки 1 и 3 м. Приняты следующие обозначения: AD5m, AD10m, AD15m – средняя глубина озера 5, 10 и 15 м соответственно; SD1m и SD3m – прозрачность 1 и 3 м соответственно; AY – «среднегодовалый» год, WY – «теплый» год, AW – «средний» ветер, SW – «сильный» ветер, Tm – средняя температура, Tb – придонная температура

Средняя глубина 15 м. В этом случае озера также остаются стратифицированными с более высокой изменчивостью временной динамики температуры перемешанного слоя. Стратификация формируется раньше и существует почти до конца сентября – на 10 дней дольше. Основные изменения средней и придонной температуры воды отмечаются с момента начала летнего прогрева. Придонная температура уже в середине июня уменьшается практически вдвое, сохраняя низкие значения до октября. Средняя температура уменьшается не столь сильно (наибольшие различия – до 15% – отмечаются в октябре).

Эксперименты на численных моделях [7, 8] показали, что при изменении климата реакция озерных экосистем будет во многом зависеть от геометрии озерной котловины и трофического уровня водоема. Так, например, при потеплении длительность биологического лета возрастет, что приведет к дополнительному росту первичной продукции, увеличению новообразованного органического вещества и, следовательно, увеличению продолжительности существования дефицита растворенного кислорода в придонной области в период открытой воды. Экстремальная жара, наблюдавшаяся летом 2010 г. в Европе, созда-

ла условия для уникального «природного» эксперимента, позволившего проследить за реакцией озер на изменения климата. Резкая термическая стратификация водной толщи небольших бореальных озер явилась причиной серьезных изменений в их кислородном режиме, вплоть до развития аноксии в придонных слоях [2, 3].

Выводы

Серия численных экспериментов, проведенных для модельного озера с разной глубиной и прозрачностью воды, позволила оценить влияние возможных изменений атмосферных воздействий на его термический режим. Наиболее серьезные изменения могут произойти в мелких озерах со средней глубиной порядка пяти метров в случае понижения прозрачности воды. При прозрачности три метра (по диску Секки), эти озера стратифицированы только в начале лета, и уже с июля могут быть полностью перемешанными вплоть до появления льда. Если прозрачность понизится до одного метра, термоклин формируется в самом начале лета и существует до сентября. Поскольку весенняя вспышка развития фитопланктона озер умеренной зоны определяется преимущественно диатомовыми водорослями [10], новообразованное органическое вещество будет захоронено в придонных слоях, где подвергнется бактериальному разложению, что приведет к существенному понижению содержания растворенного кислорода вплоть до формирования анаэробных зон. При наличии термоклина, полного перемешивания и соответственно ре-аэрации придонных слоев воды не будет до появления гомотермии, т.е. в течение как минимум ста суток.

Для того чтобы оценить воздействие возможных изменений регионального климата на разнотипные озера умеренного по-

яса, необходимы дальнейшие исследования баз натурных данных и математических моделей, позволяющих воспроизводить сезонную динамику как термической структуры и условий перемешивания, так и растворенного кислорода и продукционных характеристик.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты 13-05-00338_a, 14-05-91761_АФ_a, 14-05-00787_a).

Список литературы

1. Бреховских В.Ф. Гидрофизические факторы формирования кислородного режима водоемов. – М.: Наука, 1988. – 166 с.
2. Бюллетень экологического состояния озер Нарочь, Мясстро, Баторино (2010 год). – Минск: БГУ, 2011. – 99 с.
3. Ефремова Т.В., Пальшин Н.И., Здоровеннова Г.Э., Терзhevik 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.
4. Озера Карелии. – Справочник под ред. Филатова Н.Н., Кухарева В.И. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2013. – 302 с.
5. Пальшин Н.И. Термические и гидродинамические процессы в озерах в период ледостава. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1999. – 86 с.
6. Терзhevik А.Ю. Простейшая имитационная модель погодных условий над Ладожским озером // *Ладожское озеро – критерии состояния экосистемы*. – СПб.: Наука, 1992. – С. 41–47.
7. 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.
8. Golosov S., Terzhevik A., Zverev I., Kirillin G., Engelhardt C. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes. // *Tellus A*. – 2012. – 64. – 17264. – DOI: 10.3402/tellusa.v64i0.17264.
9. Mironov D., Heise E., Kourzeneva E., Ritter B., Schneider N., Terzhevik A. Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO. // *Boreal Environment Research*. – 2010. – 15. – P. 218–230.
10. Vehmaa A., Salonen K. Development of phytoplankton in Lake Pääjärvi (Finland) during under-ice convective mixing period // *Aquatic Ecology*. – 2009. – 43. – P. 693–705. – DOI 10.1007/s10452-009-9273-4.