

О.Н.Ерина¹, Е.А. Вилимович¹, Л.Е. Ефимова¹, М.А. Терешина¹, Д.И. Соколов¹, Н.Г. Баянов², В.А. Ефимов¹, oxana.erina@geogr.msu.ru

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

²Государственный природный заповедник «Керженский», Нижегородская обл.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОДНОМЕРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ОЗЕР КЕРЖЕНСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

Одномерная модель Mylake, разработанная норвежским институтом водных исследований NIVA, применена для исследования термического режима малых пойменных озер Керженского природного заповедника. Калибровка и верификация модели показали хорошее качество воспроизведения профилей температуры обоих озер, различающихся по морфометрии, для различных фаз термического цикла, включая фазы установления и схода ледяного покрова. Малый размер озер обуславливает меньшую значимость ветрового перемешивания для моделирования вертикального распределения температур по сравнению с более крупными водоемами.

Ключевые слова: лимнология, термический режим, моделирование, озера

O. Erina¹, E. Vilimovich¹, L. Efimova¹, M. Tereshina¹, D. Sokolov¹, N. Bayanov², V. Efimov¹, oxana.erina@geogr.msu.ru

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow

² Kerzhensky State Nature Reserve, Nizhny Novgorod

APPLICATION OF A ONE-DIMENSIONAL MODEL TO STUDY THE THERMAL REGIME OF LAKES IN THE KERZHENSKY STATE NATURE RESERVE

One-dimensional model Mylake, developed by the Norwegian Institute of Water Research NIVA, is used to study the thermal regime of small floodplain lakes in Kerzhensky State Nature Reserve. Calibration and verification of the model showed good quality of temperature profiles simulation for both lakes in different phases of the thermal cycle, including freezing and melting. The small size of the lakes leads to lower importance of wind mixing for the simulation of the temperature vertical distribution compared to larger lakes.

Keywords: limnology, thermal regime, lake physics, modeling, lakes.

Введение

Изучение термического режима озер в последние десятилетия представляет всю большую актуальность ввиду происходящих в самых разных регионах планеты климатических изменений. Потепление климата, увеличение частоты экстремальных погодных явлений приводит к самым различным последствиям, таким как усиление интенсивности эвтрофирования озер и водохранилищ, угнетение холодолюбивых видов рыб и других водных

организмов, увеличение продолжительности периода стратификации и др. Вместе с тем остается открытым вопрос относительно реакции водных экосистем на климатические изменения в будущем. Ансамбль существующих модельных прогнозов погоды при различных сценариях величин эмиссии парниковых газов позволяет использовать инструментарий гидроэкологических моделей для оценки вероятных откликов термического режима водоемов. Однако для прогнозирования температуры в озерах необходима адаптация выбранных моделей, а также верификация и калибровка их параметров по данным за исторический период.

В настоящее время такое исследование проводится в рамках работы лимнологической группы международного проекта ISIMIP. Из водоемов России, участвующих в проекте, преобладают крупные озера, испытывающие серьезное антропогенное воздействие, а также водохранилища техногенного происхождения. При этом остаются не охвачены малые озера, преобладающие на территории страны. Включение в проект в качестве модельных объектов малых озер, не подверженных антропогенному воздействию, позволит получить репрезентативные сведения о характере реакции экосистем на климатические изменения и в дальнейшем распространить полученные результаты на другие водоемы такого же типа.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования выбраны два озера Керженского биосферного заповедника – Круглое и Нижнее Рустайское, различающиеся по морфометрии, ландшафтным условиям водосбора и характеру гидравлической связи с р. Керженец, в пойме которой они находятся [1]. Данные водоемы расположены в лесной зоне центральной части Европейской полосы России и, благодаря расположению в пределах ООПТ, не испытывают антропогенного воздействия, в том числе на термический режим.

Нижнее Рустайское озеро – это узкое (средняя ширина около 20 м, максимальная 25 м), сильно вытянутое в плане (длина более 440 м) неглубокое (средняя глубина 1,5 м, максимальная 5,5 м) старичное озеро площадью 0,84 га.

Круглое озеро площадью 1,04 га имеет длину 175 м, максимальную ширину 90 м, среднюю – около 60 м и морфологически разделено на два плеса: больший глубоководный (более 8,5 м) северо-восточный и меньший мелководный (до 2 м) юго-западный.

В качестве инструмента исследования была выбрана одномерная модель Mylake, разработанная в норвежском институте водных исследований NIVA [2] и выбранная лимнологической рабочей группой проекта ISIMIP одним из инструментов прогноза. Моделирование вертикального профиля температуры в ней производится с суточным шагом по постоянной сетке слоев, толщина которых может быть от 0,5 до 2 м. Код Mylake реализован в среде MATLAB.

Основными уравнениями, при помощи которых производится расчет температурного профиля в модели, являются уравнение теплопроводности, а также расчет баланса потенциальной и кинетической энергий, на основе которых определяется интенсивность и глубина ветрового перемешивания [3]. Если

кинетическая энергия ветрового воздействия выше потенциальной энергии в слое, рассчитываемой на основе плотностного профиля, то слой, расположенный ниже эпителиона, перемешивается с ним, а накопленная потенциальная энергия вычитается из кинетической. Эта процедура продолжается с до тех пор, пока оставшаяся кинетическая энергия не становится меньше потенциальной.

В качестве метеорологической информации использовались данные метеостанции Нижний Новгород, расположенной к юго-востоку от объектов исследования. По данным измерений метеорологических характеристик рассчитывались среднесуточные значения температуры воздуха, общей облачности, относительной влажности, скорости ветра, атмосферного давления на высоте станции, а также суточные суммы осадков. Кроме этого, пользователем задается информация о начальном распределении температуры воды и кривая площадей для учета морфометрии озера.

Для калибровки модели были использованы данные многолетнего автоматизированного мониторинга температурного режима в исследуемых озерах при помощи логгеров, осуществляемого сотрудниками заповедника с 2015 года. Ежечасные данные о температуре воды озер на разных глубинах обрабатывались для получения среднесуточных значений. Дополнительно использовались материалы зондирования водной толщи, периодически проводившегося в те же годы при участии авторов.

Сама оптимизация параметров проводилась в среде R при помощи пакета FME [4;5]. Метод контролируемого случайного поиска, реализованный в данном пакете в виде функции `pseudoOptim`, показал свою большую эффективность по сравнению с другими. В качестве функции, используемой для оптимизации, использовались значения среднеквадратической ошибки расчета RMSE в среднем за период калибровки. Массив данных был разделен на две части, одна из которых (2015-2016 гг.) использовалась для калибровки параметров модели, а вторая (2017-2018 гг.) – для верификации.

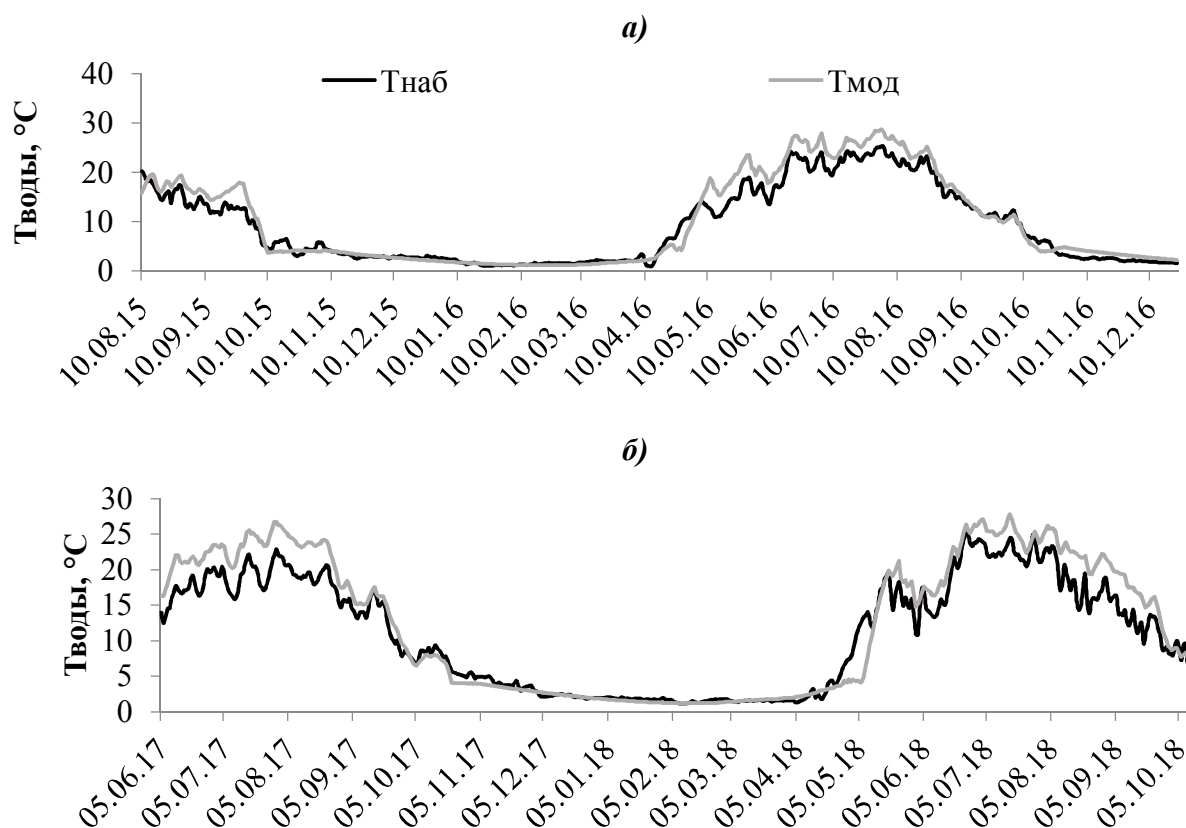
Перечень оптимизируемых параметров модели Mylake был выбран исходя из рекомендаций разработчиков [2] и состоял из двух параметров a_k , входящих в уравнение расчета коэффициентов турбулентной диффузии (отдельно для периода открытого зеркала и ледостава), а также параметра ветрового перемешивания W_{str} из уравнения расчета кинетической энергии.

Результаты и обсуждение

Результаты калибровки модели показали ее способность хорошо воспроизводить термический режим обоих рассматриваемых озер в течение всего года (рисунок). Значение среднеквадратической ошибки для периода калибровки составило для озера Круглое $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ при длине ряда $n = 1156$, а для оз. Нижнее Рустайское – $2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ при длине ряда $n = 597$. Верификация подтвердила полученные погрешности, которые составили для оз. Круглое $1,93\text{ }^{\circ}\text{C}$ при длине ряда $n = 1217$, а для оз. Нижнее Рустайское – $2,34\text{ }^{\circ}\text{C}$ при длине ряда $n = 403$. При этом, несмотря на имеющиеся расхождения, моделью точно воспроизводятся моменты установления и схода ледостава, весеннего прогрева

и осеннего охлаждения, а также глубины расположения термоклина для обоих изучаемых водоемов.

По результатам моделирования стало возможным изучить соотношение влияющих на формирования температурного профиля определяющих физических процессов. Любопытным стал факт гораздо меньшей значимости для термики изучаемых озер ветрового перемешивания. Малый размер водоемов определяет меньшую значимость кинетической энергии ветра по сравнению с более крупными водоемами, а также бóльшую значимость коэффициента вертикальной турбулентной диффузии по сравнению с другими озерами, температурный режим которых исследовался при помощи модели Mylake, среди которых преобладали водоемы среднего и крупного размера.



Распределение температуры воды в поверхностном слое оз. Нижнее Рустайское по данным наблюдений и результатам моделирования а) для периода калибровки 2015-2016 гг; б) для периода верификации 2017-2018 гг.

В результате верификации модели было обнаружено стабильное завышение поверхностных температур воды в обоих исследуемых водоемах (рисунок). Причин подобных погрешностей может быть несколько. Во-первых, вероятна погрешность расчета теплового баланса из-за использования метеорологической информации по данным метеостанции г. Нижний Новгород. Микроклимат городов отличается повышенной на несколько градусов температурой воздуха относительно природных ландшафтов, поэтому и температура воды при таком форсинге будет моделироваться с соответствующей погрешностью. Второй причиной возникающих систематических ошибок является переменный уровень водной поверхности озер. Круглое озеро

характеризуется более стабильным уровнем вследствие более слабой гидравлической связью с р. Керженец, поэтому диапазон колебаний уровня в нем незначителен. Нижнее Рустайское озеро, расположенное в пойме реки, испытывает значительные сезонные колебания уровня, вследствие чего расположение датчиков температуры воды не являлось постоянным в течение всего периода установки и менялось в соответствии с ходом уровня. Это также могло привести к занижению температуры водной поверхности.

Выводы

Одномерная термодинамическая модель Mylake показала свою эффективность для воспроизведения малых пойменных озер, различающихся по морфометрическим характеристикам и условиями водообмена. В результате оптимизации параметров при помощи механизмов прямого поиска и верификации с использованием данных автоматизированного мониторинга термического режима средняя квадратическая ошибка расчета RMSE температуры каждого из озер в целом за период расчета не превышала 2 °С. Возможные несоответствия, вероятно, обусловлены используемым метеорологическим форсингом для модели, поэтому для повышения качества расчета можно рекомендовать использование реанализа или данных других более близко расположенных метеостанций.

В результате моделирования было выявлено, что для озер настолько малого размера влияние ветрового перемешивания на формирование температурного профиля намного ниже, чем для более крупных водоемов.

Адаптированные и откалиброванные модели озер Круглое и Нижнее Рустайское планируется использовать в рамках международного проекта по сравнению отклика термического режима озер на климатические изменения на основании методов математического моделирования, применяемых лимнологической группы проекта ISIMIP.

Библиографический список

1. *Efimova L.E., Korabliova O.V., Lomova D.V.* Landscape dynamics and lakes hydrology of Kerzhenets river floodplain // Riparian zones. Characteristics, management practices, and ecological impacts. Pokrovsky O.S. (Ed.). Nova Science Publishers, Inc., United States New York, 2016. Pp. 125–148.
2. *Saloranta T.M., Andersen T.* MyLake - A multi-year lake simulation model code suitable for uncertainty and sensitivity analysis simulations // Ecological modelling, Vol. 207, 2004. Pp. 45–60.
3. *Hondzo M., Stefan H.G.* Lake water temperature simulation model. J. Hydraulic Eng. Vol.119, 1993. Pp.1251–1273.
4. *Soetaert K., Petzoldt T.* Inverse Modelling, Sensitivity and Monte Carlo Analysis in R Using Package FME // Journal of Statistical Software, №33(3), 2010. Pp. 1-28.
5. *Duggan J.* System dynamics modeling with R // Lecture Notes in Social Networks, 2016. 176 p.