

## СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА СТРАТИФИЦИРОВАННОГО ОЗЕРА

М.А. Терешина<sup>1</sup>, О.Н. Ерина<sup>1</sup>, Е.А. Вилимович<sup>1</sup>, Д.И. Соколов<sup>1</sup>, Н.М. Коровчинский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия

## COMPARISON OF DIFFERENT MODELS EFFICIENCY IN STUDYING THERMAL REGIME OF A STRATIFIED LAKE

M.A. Tereshina<sup>1</sup>, O.N. Erina<sup>1</sup>, E.A. Vilimovich<sup>1</sup>, D.I. Sokolov<sup>1</sup>, N.M. Korovchinskiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Moscow, Russia

*Термический режим озера Глубокого, расположенного в Московской области, был воспроизведен с помощью двух одномерных моделей – GLM и MyLake. Сопоставлены результаты калибровки моделей, анализируются их сильные и слабые стороны.*

*Two one-dimensional lake models – GLM and MyLake – were used to simulate thermodynamics of Lake Glubokoye in Moscow Region. Calibration results for two models are compared, their strengths and weaknesses are analyzed.*

Температурный и динамический режим озер является неотъемлемым фактором функционирования водных экосистем, так как абсолютно все биологические процессы так или иначе подвержены влиянию абиотических факторов. Устойчивая температурная стратификация, возникающая летом в озерах умеренной зоны, является ярким примером того, как гидрофизика озер влияет на динамику их экологического состояния. Параметры вертикального плотностного распределения влияют на перенос питательных веществ и растворенных газов между различными слоями водоема, определяют возможности для развития тех или иных живых организмов.

Использование методов математического моделирования помогает получить развернутое представление о термическом режиме озер даже при ограниченном объеме данных натурных наблюдений за вертикальным распределением температуры воды. Однако, из-за большого разнообразия подходов и их реализаций, в настоящее время существует проблема выбора модели для решения конкретных задач. Для большинства малых и средних озер, как правило, достаточным оказывается одномерное представление водоема.

В настоящей работе были рассмотрены две одномерных динамических модели водоемов: MyLake и GLM. Эти модели появились сравнительно недавно, но уже доказали свою успешность на примере множества водоемов по всему миру. Обе они воспроизводят вертикальный профиль температуры воды с шагом в 1 сутки, позволяя проследивать сезонную динамику термической структуры озера.

Модель MyLake была разработана сотрудниками Норвежского института водных исследований (NIVA) в 2004 году. Моделирование температурного профиля в модели MyLake основано на комплексе, объединяющем 2 подхода: первый основан на уравнении диффузии, второй – на энергетическом балансе. Расчет ведется по равномерной сетке, шаг модели по глубине – 1 метр [1].

Модель GLM (General Lake Model) разрабатывается в Университете Западной Австралии (UWA) и основывается на принципах, ранее реализованных в модели DYRESM, впервые она была представлена в 2012 году. Расчет тепло- и массообмена в модели производится исключительно по энергетическому принципу (сопоставление доступной для перемешивания кинетической энергии и устойчивости водной толщи), при этом вертикальная структура озера не разделяется по равномерной сетке, а разбивается на однородные по плотности слои с переменной толщиной [2].

В качестве объекта исследования выбрано озеро Глубокое, расположенное в Рузском районе Московской области, на территории одноименного государственного заказника (рис. 1). Выбор объекта обусловлен наличием данных по температуре поверхности воды за период с 1991 года, а также данных учащенных наблюдений за вертикальным распределением температуры воды за

теплый период 2017 года. Максимальная длина озера составляет 1200 м, ширина – 850 м, максимальная глубина достигает 32 метров, средняя глубина – 9,3 м. Площадь зеркала составляет 593 тыс. м<sup>2</sup>, объем – около 5,5 млн м<sup>3</sup>, длина береговой линии – 3414 м. Вода в озеро поступает преимущественно из болот и канав, осадки составляют 74% от общего питания [3].

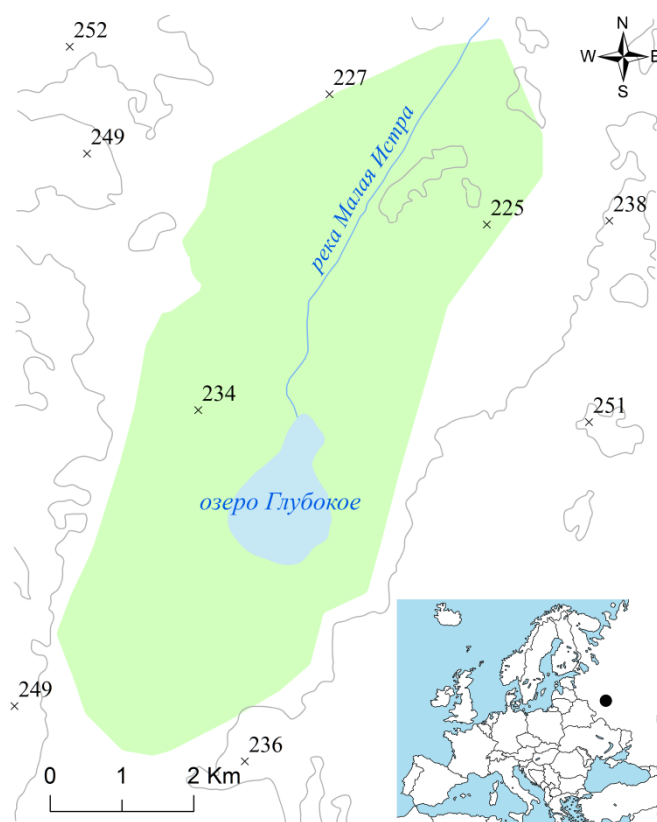


Рис. 1. Географическое положение оз. Глубокое

По термодинамическому режиму оз. Глубокое можно отнести к димиктическому типу. Озеро не имеет притоков, характеризуется малой минерализацией воды и невысокой биологической продуктивностью [4].

В качестве входных данных использовались: батиграфическая кривая озера, ряды среднесуточных значений метеорологических характеристик (для обеих моделей: температура воздуха, относительная влажность, скорость ветра, количество осадков, облачность; только для модели MyLake – атмосферное давление), вертикальный профиль температуры воды в начальный период времени. В качестве метеорологических характеристик использовались данные наблюдений метеостанции Можайск.

Оптимизация параметров модели велась с использованием данных учащенных наблюдений за вертикальным распределением температуры воды в оз. Глубоком за вегетационный период 2017 года. Оптимизация параметров модели проводилась автоматически с помощью функции `modFit`, реализованной в пакете FME [5] в программной среде R. Основой выбранной функции является алгоритм Нелдера-Мида по поиску локального экстремума (минимума) функции. В качестве критерия оптимизации использовалось значение среднеквадратической ошибки расчета температуры воды (RMSE). Для оценки качества модели также использовались другие показатели: средняя абсолютная ошибка (MAE), и индекс Тейла [6], который широко применяется в экологическом моделировании (качество моделирования считается удовлетворительным при значении индекса менее 0,4).

В результате калибровки моделей была достигнута значительная сходимость рассчитанных характеристик с фактическими данными. Статистические характеристики качества полученных модельных оценок представлены в таблице 1. Значения выбранных характеристик позволяют сделать вывод о хорошем воспроизведении термического режима озера обеими моделями:

среднеквадратическая ошибка расчета температуры воды RMSE не превышает в обоих случаях  $1^{\circ}\text{C}$ , значения индекса Тейла находятся значительно ниже критического значения (0,4).

Таблица 1. Статистические критерии качества модельного расчета температуры воды оз. Глубокое в 2017 году

| Модель        | MyLake |       |      | GLM  |      |      |
|---------------|--------|-------|------|------|------|------|
| Параметр      | RMSE   | MAE   | T    | RMSE | MAE  | T    |
| Значение      | 1,00   | -0,34 | 0,02 | 0,90 | 0,14 | 0,05 |
| Длина ряда, n | 403    |       |      |      |      |      |

При подробном рассмотрении результатов моделирования был выделен ряд особенностей, связанных с точностью воспроизведения моделями отдельных черт термического режима. Так, вертикальные профили распределения температуры воды по результатам расчета в модели MyLake оказались крайне близки к фактическим во все расчетные даты (рис. 2). Однако, можно заметить, что слой термоклина в модели оказывается более растянутым по вертикали, чем это наблюдалось в реальности, а слой эпилимниона из-за этого оказывается менее мощным.

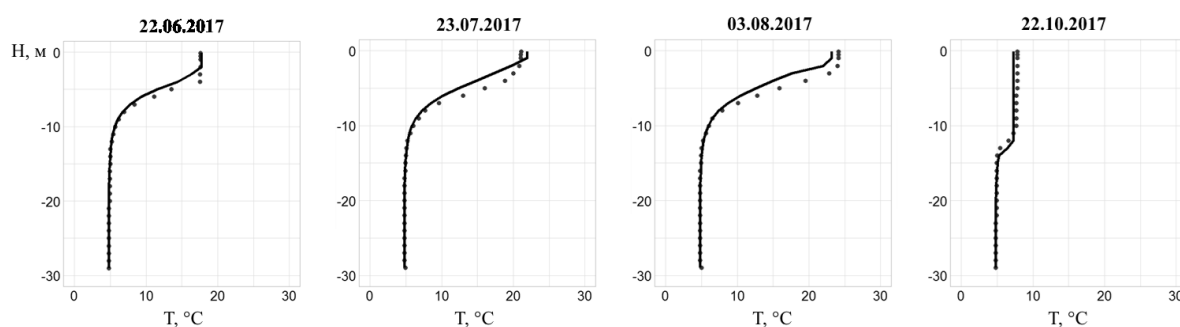


Рис. 2. Сравнение модельных (линия) и фактических (точки) вертикальных распределений температуры воды в оз. Глубокое по результатам расчета в модели MyLake

Результаты расчетов в модели GLM показывают другие отклонения модельных оценок от действительности. В большинстве случаев GLM удается хорошо повторить реальное распределение температуры воды, хотя может наблюдаться чрезмерное перемешивание слоя эпилимниона, в результате чего температура воды в поверхностных слоях может значительно отличаться от данных наблюдений (рис. 3). При этом границы термоклина, как правило, воспроизводятся достаточно точно. Другой проблемой модели GLM оказалось слишком раннее наступление периода осеннего перемешивания, в результате которого вертикальный профиль температур начинает выравниваться, и эпилимнион значительно заглубляется раньше того, чем это наблюдается в действительности. Слишком раннее осеннее перемешивание обнаруживалось при почти любом наборе значений калибровочных параметров, полученных на различных этапах оптимизации модели.

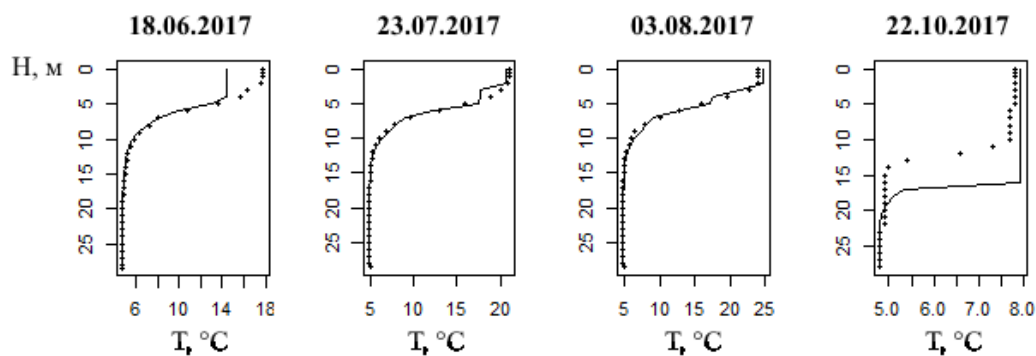


Рис. 3. Сравнение модельных (линия) и фактических (точки) вертикальных распределений температуры воды в оз. Глубокое по результатам расчета в модели GLM

Для более качественного воспроизведения температурного режима оз. Глубокое с помощью моделей MyLake и GLM необходим более тщательный подход к выбору калибровочных параметров, а также расширение объема данных для калибровки и верификации.

В целом оптимизация параметров моделей позволила добиться достаточно высокой точности воспроизведения термического режима оз. Глубокое, хотя для отдельных характеристик наблюдается расхождение модельных оценок с фактическими значениями. Дальнейшее совершенствование подходов к калибровке моделей и расширение базы данных учтенных наблюдений за температурой воды в озере должны позволить добиться полного соответствия модельных расчетов действительности, что даст возможность перейти к использованию выбранных моделей для получения более точных характеристик термического режима озера и их прогностических оценок.

### Литература

1. Saloranta, T.M., Andersen, T MyLake (v.1.1): Technical model documentation and user's guide for version 1.1. Norwegian Institute for Water Research, 2004. 44 p.
2. Hipsey, M.R., Bruce, L.C., Hamilton, D.P. GLM - General Lake Model: Model overview and user information. AED Report #26, The University of Western Australia, Perth, Australia, 2014. 42pp.
3. Муравейский С.Д. Морфометрия Глубокое озера // Труды Лимнол. Станции в Косине. Вып. 13-14, 1931. С. 29-46.
4. Щербаков А.П. Озеро Глубокое. М.: Издательство "Наука", 1967. 380 с.
5. 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.
6. Гидрологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз). М.: Издательство "Перо", 2015. 286 с.  
*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 18-35-00691 мол а.*

*This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project 18-35-00691.*