

С.Д. Голосов, И.С. Зверев, Е.А. Шипунова

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА В ОЗЕРАХ ПСКОВСКО-ЧУДСКОЙ СИСТЕМЫ

S.D. Golosov, I.S. Zverev, E.A. Shipunova

MODELING SEASONAL CHANGES IN CONTENT OF DISSOLVED OXYGEN IN PSKOVSKO-CHUDSKOYE LAKE SYSTEM

Разработанная в Институте озераведения РАН параметризованная математическая модель FLakeEco адаптирована к условиям Псковско-Чудской озерной системы. Результаты верификации модели по данным натурных наблюдений продемонстрировали ее адекватность реальным гидрофизическим и химико-биологическим процессам, происходящим в озерах под влиянием метеорологических условий.

Ключевые слова: моделирование, модель FLakeEco, термический и кислородный режим.

The reduced lake ecosystem model FLakeEco is adapted to the conditions of the Pskovsko-Chudskoye lake system. The model is based on the self-similar representation of the vertical distribution of the concentration of dissolved oxygen in lake water. The results of verification against field data revealed the fairly well ability of the model to describe the main physical, chemical and biological processes in lakes.

Key words: modeling, FLakeEco model, thermal and oxygen regime.

Общие положения

Содержание растворенного кислорода (РК) является одним из важнейших показателей качества воды в озере. Концентрация кислорода играет решающую роль в создании величины окислительно-восстановительного потенциала и в значительной мере определяет направление и скорость процессов химического и биохимического окисления органических и неорганических соединений. Анаэробные условия, возникающие при дефиците кислорода, способствуют протеканию химических и биохимических реакций восстановительного типа, в результате чего в воде накапливаются такие токсичные соединения как аммонийный азот, метан, сероводород, а также гниющие растительные остатки. Все это приводит к тому, что озера становятся практически непригодными для нужд питьевого водоснабжения и рекреации, коренным образом изменяются условия обитания гидробионтов, что ведет к снижению рыбопродуктивности водоема. Главными факторами, определяющими кислородный режим озера, являются условия аэрации и биологическая продуктивность. Аэрация водоема, в свою очередь, зависит от возможности перемешивания водной массы и продолжительности подледного периода, а биологическая продуктивность определяется, в основном, уровнем биогенной нагрузки на водоем.

Псковско-Чудская озерная система представляет собой один из крупнейших в Европе водоемов (четвертый по площади акватории и седьмой по запасам пресной воды). Система является трансграничной, расположенной между Россией и Эстонией. Водоем активно используется обеими сторонами для рыболовства, хозяйственных нужд и рекреации.

Процесс антропогенного эвтрофирования Псковско-Чудского озера начался в 50-х гг. прошлого века, но стал очевидным только в 90-х. В 1991–1994 гг. озеро относилось к эвтрофному типу, преимущественно слабозагрязненному с отдельными более сильно загрязненными участками. На данном этапе существования Псковское озеро классифицируется как гиперэвтрофное, Теплое озеро — переходящее к гиперэвтрофному, Чудское — эвтрофное озеро. Кроме того, озера существенно различаются по условиям перемешивания водной массы. Более мелководное Псковское озеро является полимиктическим, т.е. перемешивание водной массы от поверхности до дна происходит в нем многократно в течение года. Чудское озеро — в основном димиктическое, т.е. перемешивается дважды в год во время весенней и зимней конвекции.

В силу трансграничного положения осуществление мониторинга всей акватории озерной системы затруднено. В такой ситуации методы математического моделирования могут служить незаменимым средством оценки текущего состояния и прогнозирования возможных изменений в озерных экосистемах. Ниже приводятся первые результаты моделирования термического и кислородного режимов озер Псковско-Чудской системы с использованием моделирующей системы FLake-FLakeEco, разработанной совместными усилиями Института озераведения РАН и Германской службы погоды (DFG).

Моделирующая система FLake-FLakeEco

Среди природных водоемов значительную часть составляют мелководные озера и водохранилища со средними глубинами до 20–30 м и горизонтальными размерами от нескольких сотен метров до нескольких километров. Одной из основных особенностей таких водоемов является существенная горизонтальная однородность поля температуры в них и преобладание процессов вертикального переноса тепла над адвективными. Озера Псковско-Чудской системы принадлежат именно к таким водоемам. При моделировании термического режима водоемов этого класса зачастую достаточно использовать простые одномерные модели, основанные на интегрировании уравнения вертикальной диффузии тепла и различных способах представления вертикального распределения температуры. Такие модели, как правило, основаны на ясных физических предположениях, не требуют задания коэффициентов вертикального турбулентного обмена, просты в реализации и удобны для проведения численных экспериментов.

Примером модели такого типа является модель FLake, разработанная совместными усилиями сотрудников Института озераведения РАН, Института водных проблем Севера РАН, и Службы погоды Германии (DWD). Модель FLake является универсальной математической моделью гидротермодинамики озера, в которой реализованы последние достижения в области физической лимнологии. Модель применяется

для решения широкого круга лимнологических проблем. В качестве метода учета влияния озер на формирование локальных климатических условий модель внедрена в практику численного прогноза погоды в метеорологических организациях разных стран мира — Российской Федерации, Германии, Великобритании, Канады, Португалии, США, Франции, Финляндии, Швеции и Международного Европейского Центра среднесрочных прогнозов погоды. Работа с моделью FLake может осуществляться, в частности, с международного сайта модели www.lakemodel.net.

Детальное описание модели дано в [1, 2]. В настоящей работе схематично представлено вертикальное распределение температуры в системе снег—лед—водная масса—донные отложения, временная динамика которого рассчитывается в модели.

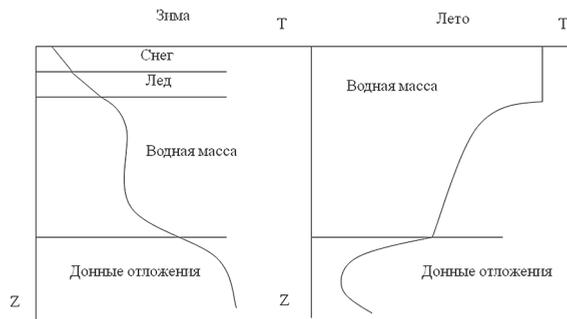


Рис. 1. Схема вертикального профиля температуры в системе снег—лед—водная масса—донные отложения, реализованная в модели FLake

Для описания особенностей формирования годового цикла растворенного кислорода под воздействием атмосферных, гидротермодинамических и химико-биологических факторов в настоящей работе использовалась модель FLakeEco, являющаяся экологическим «расширением» модели FLake. Детальное описание уравнений и параметризация модели приведены в [3, 4, 5]. На рис. 2 схематично представлены процессы, учитываемые в модели в периоды открытой воды и ледостава.

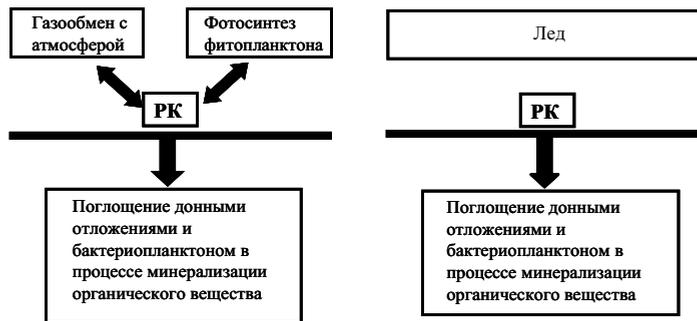


Рис. 2. Основные процессы, формирующие режим РК в водоеме и учитываемые в модели FLakeEco

Исходная информация для расчетов

Для выполнения расчетов по моделям FLake-FLakeEco в качестве входной информации были использованы данные реанализа метеорологических наблюдений для Чудского и Псковского озер за период с 2001 по 2007 г. Реанализ был выполнен для всего земного шара в национальных центрах по защите окружающей среды (NCEP) и исследованиям атмосферы (NCAR) США. Данные представляют собой ряды восстановленных величин метеорологических параметров — приходящей солнечной радиации, температуры воздуха, скорости ветра, абсолютной влажности, облачности, давления и осадков. Временной шаг между сроками «наблюдений» составляет 6 ч. Выборка необходимых для расчетов данных производится по координатам расчетной точки.

Данные натуральных наблюдений

Для верификации модели в распоряжение авторов сотрудниками Псковского филиала ФГНУ ГосНИОРХ были любезно предоставлены данные натуральных наблюдений за температурой воды и концентрацией растворенного кислорода, полученные в период с 2001 по 2007 г. Наблюдения выполнялись в центральных частях обоих озер и представляют собой временные ряды значений температуры воды и концентрации РК в поверхностном и придонном слоях водной массы.

Результаты верификация модели по данным натуральных наблюдений

С использованием упомянутой выше исходной метеорологической информации по модели FLakeEco были выполнены расчеты изменчивости термического и кислородного режимов Чудского и Псковского озер в период с 2001 по 2007 г. Результаты сравнения результатов расчетов с данными натуральных наблюдений представлены на рис. 3–6.

Очевидно, что модель адекватно — как качественно, так и количественно — описывает временную изменчивость температуры поверхности воды в обоих озерах и может быть использована для оценки реакции озерных экосистем на возможные изменения регионального климата.

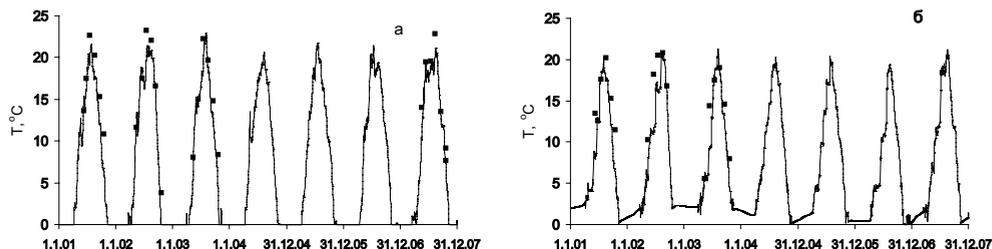


Рис. 3. Результаты верификации модели FLakeEco по данным натуральных наблюдений за температурой в Чудском озере: *a, б* — поверхностная и придонная температура соответственно. Точки — измеренные данные, сплошная линия — результаты расчетов

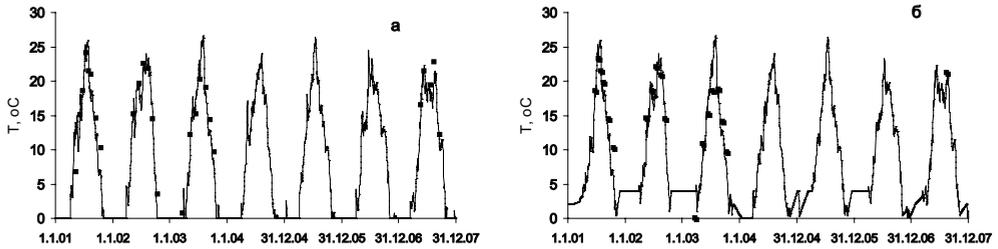


Рис. 4. Результаты верификации модели FLakeEco по данным натуральных наблюдений за температурой в Псковском озере. Обозначения — см рис. 3

Сезонная изменчивость термического режима озер

На основе анализа данных, представленных на рис. 3, 4 можно сделать самые общие заключения об особенностях сезонной изменчивости температуры водной массы в озерах. Так, Псковское озеро со средней глубиной около 3 м практически всегда в период открытой воды является полностью перемешанным от поверхности до дна. Периоды слабоустойчивой стратификации крайне непродолжительны, их появление носит случайный характер. В летний период водная масса озера хорошо прогревается — средняя температура столба воды в июле достигает 25–26°C. В зимний период в озере отчетливо выражен эффект подледного прогрева, когда температура воды подо льдом повышается от значений, близких к 0°C до температуры максимальной плотности.

Сезонная изменчивость термического режима Чудского озера имеет несколько другой характер. Средняя глубина озера составляет около 8 метров, что определяет возможность образования и более или менее длительного существования устойчивой плотностной стратификации водной массы. По той же причине озеро прогревается меньше, чем Псковское — летние температуры поверхности здесь составляют 20–22°C. Эффект подледного прогрева менее выражен. Это объясняется тем, что из-за наличия летней устойчивой плотностной стратификации придонные слои водной массы и донные отложения аккумулируют меньше тепла по сравнению с Псковским озером.

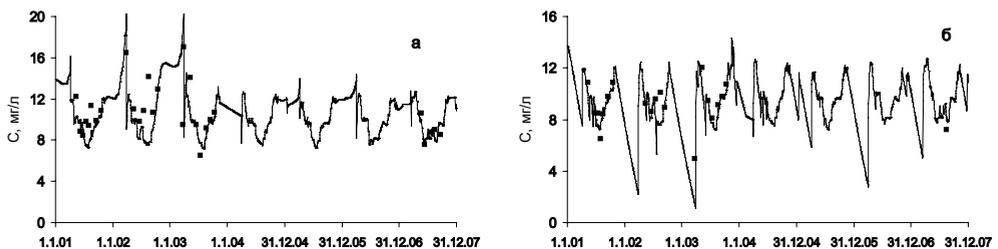


Рис. 5. Результаты верификации модели FLakeEco по данным натуральных наблюдений за концентрацией РК в Чудском озере: *a, б* — поверхностная и придонная концентрации соответственно.

Точки — измеренные данные, сплошная линия — результаты расчетов.

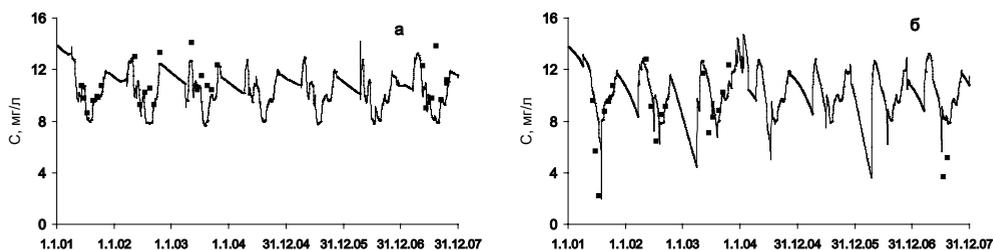


Рис. 6. Результаты верификации модели FLakeEco по данным натуральных наблюдений за концентрацией РК в Псковском озере. Обозначения — см рис. 5

Сезонная изменчивость кислородного режима озер

Данные, представленные на рис. 5, 6 свидетельствуют, что кислородный режим обоих озер в настоящее время не испытывает особых проблем по крайней мере в открытый период. Верхние слои водной массы хорошо перемешаны и, как следствие, насыщены растворенным кислородом. Уменьшение концентрации РК в придонных слоях носит кратковременный характер. Отсутствие данных наблюдений в период ледостава позволяет судить о режиме РК только по данным моделирования. В зимний период снижение концентрации РК в отсутствие атмосферной аэрации особенно заметно в Псковском озере. Учитывая высокий трофический статус озера (гиперэвтрофный водоем) и его мелководность это выглядит вполне естественным. В зимний период в придонной области в озере могут возникать анаэробные зоны.

В заключении к настоящей работе необходимо отметить, моделирующая система FLake-FLakeEco на примере Псковско-Чудской озерной системы подтвердила свою пригодность для решения широкого круга лимнологических проблем. Результаты верификации модели по данным наблюдений на Чудском и Псковском озерах продемонстрировали ее адекватность реальным гидрофизическим и химико-биологическим процессам, происходящим в озерах под влиянием метеорологических условий.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 12-05-00702-а.

Литература

1. *Кондратьев С.А., Голосов С.Д., Зверев И.С., Рябченко В.А., Дворников А.Ю.* Моделирование абиотических процессов в системе водосбор-водоем (на примере Чудско-Псковского озера). — СПб.: Нестор-История, 2010. — 104 с.
2. *Mironov D.* Parameterization of lakes in numerical weather prediction. Description of a lake model. // COSMO Technical Report, 2008, 11, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Germany. — 41 p.
3. *Kondratiev S., Golosov S., Kreiman K., Ignatieva N.* Modelling hydrological processes and mass transfer in a watershed-lake system. // Water Resources (Vodnye Resursy), 1998, 25, 571–580.
4. *Golosov S., Ignatieva N.* Hydrothermodynamic features of mass exchange across the sediment-water interface in shallow lakes. // Hydrobiologia, 1999, 408/409, 153–157.
5. *Golosov S., Maher O., Schipunova E., Terzhevnik A., Zdorovenнова G., Kirillin G.* Physical background of the development of oxygen depletion in ice-covered lakes. // Oecologia, 2007, 151(2), 331–340.