

УДК 536.25

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ ОЗ. БАЙКАЛ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ 2000 – 2001 гг.

¹Н.М. Буднев, ¹С.В. Ловцов, ¹Ю.В. Парфенов, ¹И.А. Портыанская, ¹А.Э. Растегин, ¹В.Ю. Рубцов
²M. Shurter, ²M. Shturm, ²A. Wuest

RESULTS OF MODELING OF TEMPERATURE REGIME OF LAKE BAIKAL ACTIVE LAYER FROM 2000–2001 EXPERIMENTAL DATA

¹N.M. Budnev, ¹S.V. Lovtsov, ¹Yu.V. Parfenov, ¹I.A. Portyanskaya, ¹A.E. Rastegin, ¹V.Yu. Rubtzov,
²M. Shurter, ²M. Shturm, ²A. Wuest

В данной работе представлены результаты моделирования температурного режима верхних слоев оз. Байкал в период с марта 2000 по февраль 2001 г. Данные получены в рамках программы исследований на нейтринном телескопе, расположенном в Южном Байкале. В результате проведенного моделирования было установлено, что для описания усредненной эволюции температурного профиля достаточно ограничиться варьированием коэффициента температуропроводности. При этом коэффициент вертикального массопереноса необходимо учитывать только при восстановлении тонкой структуры профиля. В рамках выбранной модели обсуждается возможный сценарий установления гомотермии и формирования устойчивых форм стратификации.

In this paper the simulation results of Lake Baikal upper layers temperature regime are discussed. This simulation was based on the experimental data that were obtained in period from March 2000 to February 2001 in the framework of the Baikal Neutrino Telescope Project. The result of simulation is as follows: the effective diffusivity coefficient varies is enough to describe an averaging evolution of temperature profile. To simulate a fine structure of temperature profile as well as to simulate an anomalous variation of temperature, when a regular course of temperature is broken, the vertical mass-transfer coefficient is need. In the frame of chosen model possible scenarios of gomothermy and stable stratification formation are discussed.

Озеро Байкал – уникальный природный объект, выделяющийся среди остальных такими особенностями, как очень большая глубина, значительная площадь поверхности, низкое значение солености, исключительная для замкнутых резервуаров прозрачность воды, высокое содержание биогенных элементов на больших глубинах [1]. В связи с этим возникает необходимость создания специализированных моделей для его описания.

Существенную роль в сохранении экосистемы Байкала играют процессы горизонтального и вертикального водообмена, которые обеспечивают кислородную вентиляцию глубинных вод и перераспределение органических веществ. Систематическое изучение динамики водной среды по всей толще озера выполняются, начиная с 60-х гг. На основе этих данных построена карта течений, развиты и апробированы модели, описывающие формирование устойчивой стратификации, развитие термобара и элементы фронтотенеза [1]. Новые возможности для изучения динамики вод оз. Байкал появились в рамках проекта по созданию и развитию байкальского нейтринного телескопа [2], расположенного в Южном Байкале в 3.5 км от мыса Ивановский. Программа исследований включает акустическое зондирование, долговременные измерения оптических свойств среды и геоэлектрического поля, мониторинг формирования донных отложений. В 1992 г. были начаты регулярные наблюдения температуры верхних слоев озера в подледный период. С 1999 г. мониторинг температурного режима ведется непрерывно в течение года по всей глубине. Экспериментальные данные получены в сотрудничестве с коллаборацией «Байкал» и отделом поверхностных вод SURF (EAWAG) Швейцарского федерального института прикладных наук и технологий.

На рис. 1 представлен годовой ход температуры на горизонтах 19, 25, 77, 90, 127 и 182 м, соответствующий измерениям 2000–2001 г. Следует отметить, что по данным наблюдений 1999 – 2006 гг. среднее поведение температур на горизонтах в целом повторяется из года в год.

Целью моделирования был расчет основных параметров, характеризующих процессы вертикального тепло- и водообмена в деятельном слое. Поскольку данные эксперимента содержат информацию только

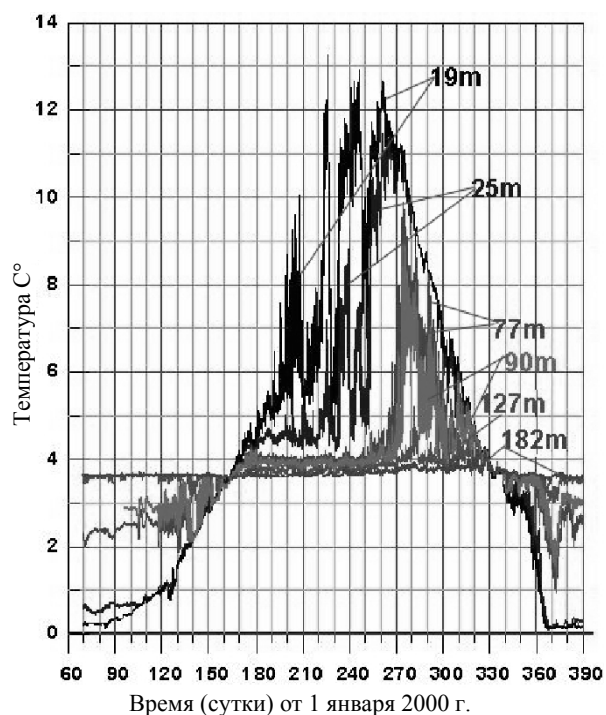


Рис. 1. Годовой ход температуры, соответствующий измерениям 2000–2001 гг.

о распределении температуры по вертикали, использовалась одномерная модель. Эволюция температурного профиля описывается одномерным уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial}{\partial t} T(z, t) = \chi(z, t) \frac{\partial^2}{\partial z^2} \times \\ \times T(z, t) - b(z, t) \frac{\partial}{\partial z} T(z, t) + f(z, t),$$

где $\chi(z, t)$ – эффективный коэффициент теплопроводности, $b(z, t)$ – коэффициент вертикального массопереноса, $f(z, t)$ – слагаемое, описывающее приток тепла извне. Граничные условия были выбраны следующим образом: на поверхности $T(z_0, t) = T_0(t)$, на условной нижней границе деятельного слоя $T(z_1, t) = T_1(t)$. В качестве $T_0(t)$ и $T_1(t)$ были взяты временные ряды температуры на соответствующих границах горизонтах. Значение условной нижней границы деятельного слоя z_1 приравнялось 200 м (его вариации не оказывали существенного влияния на полученные результаты). Положительный коэффициент массопереноса означает движение воды вверх, отрицательный – вниз. Так как в слое интенсивного перемешивания нет выделенного направления смещения водных масс, введение коэффициента вертикального массопереноса имеет смысл лишь в слое с относительно устойчивой стратификацией.

Реконструкция параметров производилась посредством решения обратной задачи. Она проходила в двух режимах: по усредненному температурному ходу и по суточным вариациям температурного режима. Значения коэффициентов теплопроводности и вертикального массопереноса, полученные при реконструкции по суточным вариациям, превосходили значения, полученные при использовании среднего температурного хода, но совпадали по порядку величины.

На рис. 2 и 3 представлены результаты реконструкции годовой эволюции коэффициентов теплопроводности и вертикального массопереноса по суточным вариациям температурного режима. В период устойчивой зимней стратификации (60 – 90 сут) коэффициент теплопроводности соответствует своему молекулярному значению $\sim 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$, а коэффициент вертикального массопереноса можно принять равным нулю. В апреле появляется слой с повышенным значением теплопроводности, который со временем расширяется и захватывает все большие глубины. По мере расширения этого слоя растут и значения коэффициента теплопроводности, достигая $84 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$.

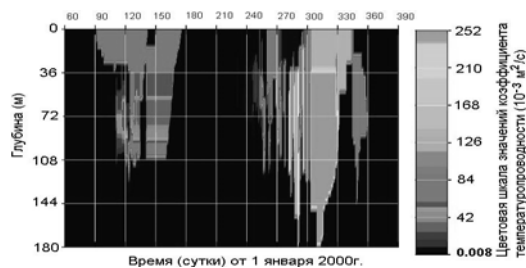


Рис. 2. Годовая эволюция коэффициента теплопроводности по суточным вариациям температурного режима.

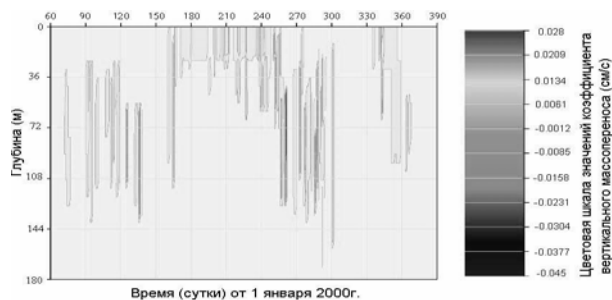


Рис. 3. Годовая эволюция коэффициента вертикального массопереноса по суточным вариациям температурного режима.

Область с максимальным значением теплопроводности можно интерпретировать как область свободной конвекции, приводящей к выравниванию температур по всей толще деятельного слоя. Своего максимального размера область высокой теплопроводности достигает перед началом гомотермии. Период гомотермии, наблюдаемый в первой половине июня, длится около двух недель (135–150 сут). При этом область равных температур простирается на весь исследуемый диапазон глубин. По истечении периода гомотермии устанавливается прямая (летняя) стратификация. Ее формирование сопровождается быстрым сокращением до полного исчезновения области с повышенной теплопроводностью.

Летняя стратификация хорошо описывается молекулярным значением теплопроводности и малым вертикальным массопереносом. В период с середины августа возникает свободная конвекция, достигая к середине сентября наибольшей интенсивности. Это сопровождается повышением теплопроводности и появлением направленного от поверхности вертикального массопереноса. Следует отметить, что период существования области повышенной теплопроводности перед установлением осенней гомотермии является более продолжительным по сравнению с тем, что предшествует весенней гомотермии, и ему соответствуют более высокие значения коэффициента теплопроводности. Наибольшее значение коэффициента теплопроводности для данного периода равно $252 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. По окончании гомотермии начинается формирование обратной стратификации. Общие черты этого процесса сходны с процессом формирования прямой стратификации.

Особый интерес представляют периоды аномальной вариации температуры, когда нарушается естественный ход установления профиля температуры (120–135, 335–365 сут). Наиболее ярким из них является декабрьский период (335–380 сут). В это время наблюдается резкое понижение температуры, которое можно промоделировать заглубленной областью повышенной теплопроводности. Последующее восстановление температуры можно реконструировать за счет вертикального массопереноса, направленного к поверхности. Одно из возможных объяснений такой особенности – интрузии, типичные для этого периода [5].

В заключение можно констатировать, что получен-

ные результаты соответствуют имеющимся общим представлениям о температурном режиме оз. Байкал и подтверждают выводы других исследований.

Работа выполнена при поддержке проекта РНП.2.2.1.1.7334 НОЦ «Байкал» Министерства образования и науки, Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 05-05-97262, 05-02-16593, 06-02-31005, 07-05-00948).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Shimaraev M.N., Verbolov V.I., Granin N.G., Sherstyankin P.P. Physical Lymnology of Lake Baikal: a review. // Baikal International Center for Ecological Research, Print № 2, Irkutsk – Okayama, 1994.

2. Budnev N.M., Lovtsov S.V., Parfenov Yu.V., et al. The hydrophysical processes in the south Baikal from the point of view of long-term temperature monitoring data // The fourth Vereshchagin Baikal Conference (Irkutsk, 26 September - 1 October, 2005). Irkutsk.: Institute of Geography SB RAS Publishers. 2005. P. 24–25.

3. Шимараев М.Н., Троицкая Е.С., Домышева В.М. Интенсивность вертикального водообмена в отдельных котловинах Байкала. / География и природные ресурсы. 2003. № 3.

4. Верболов В.И. Течения и водообмен в Байкале // Водные ресурсы. 1996. Т. 23, № 4.

5. Weiss R.F., Carmack E.C., Koropalov V.M. Deep-water renewal and biological production in Lake Baikal // Nature. 1991. V. 349. P. 665–669.

¹*Иркутский государственный университет, Иркутск*

²*Федеральный институт прикладных наук и технологий, Швейцария*