

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ОТВЕТСТВЕННЫХ ЗА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ В ГЛУБОКОМ ВОДОЕМЕ*†

Е. А. ЦВЕТОВА

Вычислительный центр СО РАН, Новосибирск, Россия

В работе физическое явление, называемое термобаром, рассматривается с точки зрения возможности быстрого распространения поверхностных вод, а следовательно, и загрязнений в толщу вод глубокого озера. Для моделирования термобара используется двумерная негидростатическая модель. Одной из основных особенностей модели является учет сжимаемости воды, в частности, в уравнении состояния, что вызвано необходимостью адекватного описания физических процессов, протекающих в глубоком водоеме. В численных экспериментах использованы параметры, соответствующие условиям озера Байкал.

Основная цель большинства исследований природоохранного характера — выявление источников загрязняющих примесей и тех способов, которыми загрязнения распространяются в природной среде. В настоящей статье представлены математические модели, используемые как инструмент, позволяющий решать природоохранные задачи для озера Байкал. В частности, рассматриваются численные модели гидротермодинамики и распространения примесей. Предлагаемый подход заключается в создании комплекса численных моделей различной степени сложности, построенных на единой методической основе, согласованных по информационным потокам и использующих совместную базу данных.

В моделях учтены различные пути поступления примесей от естественных и антропогенных источников, расположенных на боковых границах, на поверхности и внутри водоема. Особый интерес представляет аккумулятивный источник, распределенный по поверхности озера. Дело в том, что зимой поверхность Байкала почти на пять месяцев покрывается льдом. За этот период в снежном и ледовом покрове накапливаются загрязняющие вещества, попадающие из атмосферы. Во время таяния снега и льда все эти примеси поступают в воду. Очевидно, что с точки зрения загрязнения весенний период может оказаться довольно опасным, поскольку за сравнительно короткий период таяния ледового покрова в воду поступает все, что копилося в течение многих месяцев.

*© Е. А. Цветова, 1997.

†Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант №94-05-16106.

Как же распространяются примеси в озере? Первая наша попытка прояснить этот вопрос с помощью математических моделей была предпринята на трехмерной модели распространения загрязняющих примесей. В численных экспериментах учитывались три основных источника примесей, связанных с самыми крупными реками, впадающими в Байкал: Селенгой, Баргузином и Верхней Ангарой. Еще один постоянно действующий источник примесей задавался в толще вод вблизи Байкальского целлюлозно-бумажного комбината, являющегося основным антропогенным источником примесей, расположенным непосредственно на берегу озера. И последний, распределенный по поверхности источник включался в модели в период таяния ледового покрова. В соответствии с целями исследований моделировались сценарии климатического характера с тем, чтобы выделить в озере зоны повышенной антропогенной нагрузки. Для воспроизведения гидродинамического фона при изучении процессов переноса примесей использовалась трехмерная модель общей циркуляции озера, основанная на системе уравнений гидротермодинамики в гидростатическом приближении. Результаты численных экспериментов были обобщены в [1].

В последнее время, благодаря интенсивной деятельности Лимнологического института и Байкальского международного экологического центра, наши знания о Байкале значительно расширились. В то же время возникли новые задачи, требующие решения, в связи с чем возникла необходимость исследований с помощью численного моделирования более тонких механизмов, управляющих природными процессами распространения примесей в глубоких водоемах. Одной из недавних работ, результаты которой обсуждаются ниже, является исследование Байкальского термобара.

Термобар — это природное явление, возникающее два раза в год во всех димиктических водоемах. Оно связано с формированием температурного фронта и двухъячейковой конвекции при переходе температуры воды через отметку температуры максимальной плотности (ТМП). Температурный фронт, зарождаясь вблизи берега, постепенно продвигается к центру озера. Весной он может возникать по двум причинам термической природы: из-за поступления из рек более теплой, чем в озере, воды и благодаря более быстрому прогреванию мелководных прибрежных участков по сравнению с глубоководными. Другая причина, не термической природы, состоит в различии в солевом составе озерных и речных вод. Специфика термобара в глубоких озерах, в том числе и в Байкале, в отличие от мелких, заключается в том, что изменения температуры максимальной плотности, являющейся ключевым параметром в термобаре, настолько значимы, что создают особые условия для перемешивания. Важность изучения термобара как явления, которое может оказать существенное влияние на процессы загрязнения, состоит в том, что интенсивные нисходящие течения, возникающие между двумя конвективными ячейками, могут привести к быстрому распространению загрязнения из поверхностных слоев до очень больших глубин.

1. Математическая модель

Натурные исследования термобара показывают, что основные изменения всех характеристик происходят в направлении перпендикулярном фронту, т.е., как правило, от берега к центру озера. При этом характеристики в направлении параллельном берегу достаточно однородны. На данном основании полагают, что модель, в которой исключены все градиенты в направлении параллельном берегу, должна качественно правильно описывать процесс. Модель [2], описываемая здесь, также использует гипотезу о квазидвухмерности.

Однако, поскольку речь идет о термобаре глубокого озера, система уравнений отличается от традиционной: она учитывает влияние сжимаемости. Система уравнений выражает законы сохранения момента, массы и энергии для сжимаемой жидкости. Предполагается, что движение осуществляется в плоскости $x - z$, перпендикулярной к оси фронта. В систему входят три уравнения движения для компонент вектора скорости u, v, w в направлениях x, y, z соответственно:

$$\frac{du}{dt} - lv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \nu \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} A \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} + lu = \frac{\partial}{\partial z} \nu \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} A \frac{\partial v}{\partial x}, \quad (2)$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g + \frac{\partial}{\partial z} \nu \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} A \frac{\partial w}{\partial x}. \quad (3)$$

Уравнение неразрывности для сжимаемой жидкости имеет вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

Перераспределение тепла в водной толще описывается уравнением для температуры

$$\frac{dT}{dt} - \Gamma \frac{dp}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} \nu_T \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial T}{\partial x} + q. \quad (5)$$

Дополняет систему нелинейное уравнение состояния

$$\rho = \rho(p, T, S_0). \quad (6)$$

Здесь l — параметр Кориолиса, который из-за сравнительно небольших горизонтальных размеров озер практически всегда принимается постоянным; p — давление, ρ — плотность, A, ν, μ, ν_T — коэффициенты турбулентной диффузии, T — температура, Γ — адиабатический градиент, $\Gamma = \alpha \bar{T} / \rho c_p$, \bar{T} — абсолютная температура, c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении, q — источник, отвечающий за поступление тепла в приповерхностные слои, S_0 — соленость, α — коэффициент термического расширения. Особенности поглощения тепла в Байкале изучались в [3]. В настоящей модели используется параметризация, предложенная в этой статье. Солнечная радиация поглощается в воде по закону $q = Q_0 B \exp(-\beta z)$, где β — коэффициент ослабления, B — размерный параметр, Q_0 — поток тепла на поверхности.

Система уравнений (1)–(6) рассматривается в области $D_t = D \times [0, t]$, где D — область изменения пространственных переменных $[0 \leq x \leq L, 0 \leq z \leq H]$, $[0, t]$ — временной интервал.

Граничные и начальные условия:

на поверхности при $z = 0$

$$\nu \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\tau_x}{\rho}, \quad \nu \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\tau_y}{\rho}, \quad \nu_T \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{Q}{\rho c_p},$$

$$w = 0, \quad p = p_a(x, t), \quad (7)$$

на дне при $z = H(x)$

$$u = v = w = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial N} = 0, \quad (8)$$

на боковых границах

$$u = v = w = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial N} = 0; \quad (9)$$

начальные условия при $t = 0$

$$\varphi = \varphi^0(x, z), \quad \varphi = (u, v, w, T, p, \rho). \quad (10)$$

Здесь $\partial/\partial N$ есть производная по конормали

$$\frac{\partial}{\partial N} = \mu \cos(n, x) \frac{\partial}{\partial x} + \nu_T \cos(n, z) \frac{\partial}{\partial z}, \quad (11)$$

где n — вектор внешней нормали к границе области, p_a — атмосферное давление, τ_x, τ_y — напряжение ветра, Q — поток тепла на поверхности. В некоторых вариантах расчетов в качестве краевых условий на боковой поверхности задается температура.

Уравнение состояния (6), используемое в модели, специально приспособлено к лимнологическим целям [4]: в нем интервалы изменения T, p, S отвечают тем значениям, которые встречаются в озерах. В соответствии с этим уравнением плотность является нелинейной функцией температуры, давления и солёности. В такой версии модели солёность задана постоянной величиной 0.098 г/кг. Адиабатический градиент температуры, коэффициент термического расширения, удельная теплоемкость и другие термодинамические величины, используемые в модели, также вычисляются по формулам из [4].

Одной из важных задач математического моделирования является параметризация движений подсеточного масштаба, которые непосредственно не воспроизводятся в модели. В данном случае это делается с помощью диффузионных операторов второго порядка, причем, как принято в океанологии, горизонтальные и вертикальные процессы параметризуются по-разному, а именно, горизонтальные коэффициенты предполагаются постоянными, а вертикальные определяются в зависимости от градиентного числа Ричардсона [2]

$$Ri = N^2 / \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right],$$

где N^2 — частота Брента — Вайсяля

$$N^2 = -g\alpha \left[\frac{\partial T}{\partial z} - \Gamma g\rho \right].$$

Численный алгоритм основан на методе расщепления по физическим процессам [5]. Для построения энергетически-сбалансированных аппроксимаций используется вариационный принцип [6]. В соответствии с идеей метода расщепления решение задачи на каждом шаге по времени осуществляется в несколько этапов. В данном конкретном случае основными этапами являются перенос плюс диффузия и динамическое согласование полей [2, 7].

2. Обсуждение результатов численных экспериментов

С помощью описанной модели было выполнено несколько серий численных экспериментов, которые показали возможности модели в воспроизведении типичных характеристик термобара .

Двумерная область, в которой решается задача, представляет собой полость с горизонтальным масштабом 20 км. Небольшие отвесы ограничивают область слева и справа, дно имеет трапециевидную форму, причем углы наклона боковых сторон трапеции различны. Максимальная глубина водоема 960 м. Область покрывается регулярной сеткой: $\Delta x = 40$ м, $\Delta z = 20$ м. Шаг по времени $\Delta t = 60$ с. В численной реализации рельеф дна аппроксимируется отрезками, параллельными осям координат.

Обобщая полученные результаты, можно сделать следующее описание термобара в глубоком озере. В начальный период одной из основных особенностей температурного поля является одновременное существование типичных летних, зимних и промежуточных вертикальных профилей температуры. Летнее распределение температуры формируется вблизи берегов после прохождения термобара. Нагревание воды выше ТМП приводит к формированию термоклина и установлению устойчивой стратификации. В этой зоне изотермы от поверхности и до глубины термоклина располагаются почти горизонтально, что свидетельствует о преобладании горизонтальной адвекции и ослаблении вертикального обмена. В области фронта изолинии температуры вертикально ориентированы. Это значит, что горизонтальный обмен здесь затруднен, и движение происходит преимущественно в вертикальном направлении. Интервал температур этой зоны 3.6–4.0 °С соответствует интервалу изменения температур максимальной плотности до глубины приблизительно 300 м. Впереди термобара типичный зимний профиль с инверсным распределением температуры до глубины мезотермического максимума при нагревании поверхности постепенно выравнивается благодаря обычным конвективным процессам весеннего периода. Кстати, при заданном потоке тепла на поверхности, соответствующем байкальским данным, эти процессы происходят достаточно интенсивно, в силу чего два термобара, движущиеся с разных сторон, не успевают встретиться до того момента, когда температура поверхности всюду станет выше соответствующей ТМП.

Система течений, связанных с термобаром, представляет собой две конвективные ячейки, между которыми происходит опускание вод. Типичные абсолютные значения скоростей, полученные в численных экспериментах, были следующими: компоненты u — 1–3 см/с, v — 10–20 см/с, w — 0.01–0.3 см/с. Интересно отметить, что вертикальная скорость изменяется в широком диапазоне и достигает максимальных значений около 1 см/с, однако такие величины сохраняются очень недолго. В глубинных слоях, где нисходящее течение встречает подводный береговой склон, дальнейшее опускание происходит вдоль этого склона до самых больших глубин. По мере того, как термобар отодвигается от берега, размеры ячеек постепенно увеличиваются, простираясь в вертикальном направлении от поверхности до дна.

На рис. 1, 2 представлены результаты численных экспериментов: на первом изображен фрагмент поля скоростей вблизи правой границы области, на втором показаны изолинии функции $T - \text{ТМП}(p, S_0)$. Нулевая изолиния указывает положение термобара. Среди сопутствующих термобару и весенней конвекции процессов следует отметить возникновение глубокой конвекции вблизи слоя мезотермического максимума.

Основной вывод, который можно сделать по результатам численных экспериментов, подтверждает гипотезу [8–10] о том, что во время существования термобара может происходить быстрое опускание вод из поверхностных слоев в глубинную зону.

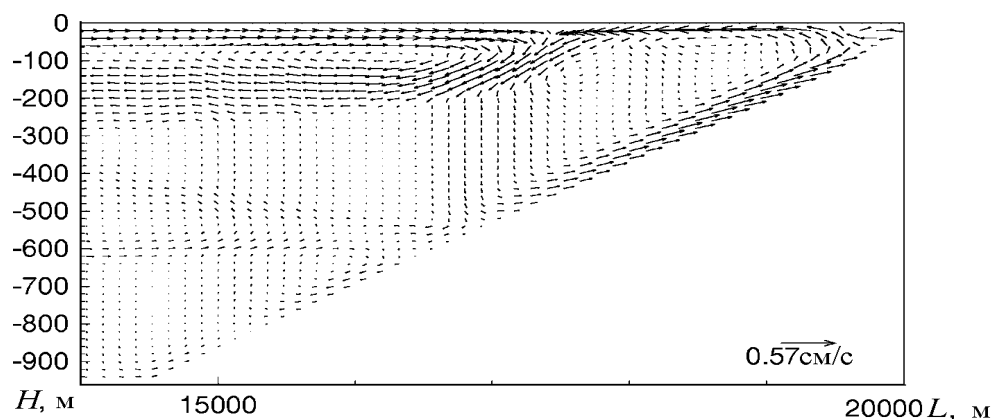


Рис. 1. Фрагмент поля скоростей. Изображен каждый третий по горизонтали вектор.

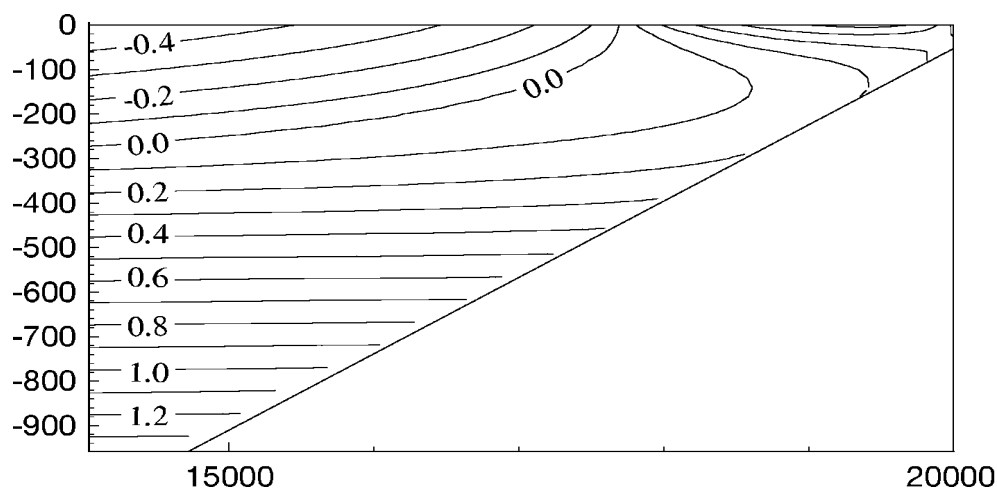


Рис. 2. Изолинии функции $T - T_{МП}(p, S_0)$. Фрагмент области.

Список литературы

- [1] ПЕНЕНКО В. В. и ДР. Оценка антропогенного влияния на регион озера Байкал с помощью численного моделирования. *Метеорология и гидрология*, №7, 1989, 76–84.
- [2] TSVETOVA E. A. A numerical model of thermal bar in lake Baikal. *Bull. Novosibirsk Computing Center, Ser.: Numerical modelling in atmosphere, ocean and environmental studies*, vol. 2, 1995, 85–100.
- [3] ЗВОНКОВА Т. Н. Некоторые результаты измерений подводной радиации на Байкале летом 1960 г. *Труды Лимнологического ин-та*, **5**, 1964, 188–193.
- [4] CHEN C. T., MILLERO F. J. Precise thermodynamic properties for natural waters covering only the limnological range. *Limnology and Oceanography*, **31**, No. 3, 1966, 657–662.
- [5] МАРЧУК Г. И. *Численное решение задач динамики атмосферы и океана*. Гидрометеопиздат, Л., 1974.

- [6] ПЕНЕНКО В. В. *Методы численного моделирования атмосферных процессов*. Гидрометеоиздат, Л., 1981.
- [7] TSVETOVA E. A. Compressibility effects in lake hydrodynamics. *Bull. Novosibirsk Computing Center, Ser.: Numerical modelling in atmosphere, ocean and environment studies*, vol. 1, 1993, 91–103.
- [8] ШИМАРАЕВ М. Н., ГРАНИН Н. Г. Термическая стратификация и механизм конвекции в озере Байкал. *Докл. АН СССР*, **321**, 1991, 831–835.
- [9] SHIMARAIEV M. N., GRANIN N. G. Deep ventilation of lake Baikal waters due to spring thermal bars. *Limnology and Oceanography*, **38**, No. 5, 1993, 1068–1072.
- [10] WEISS R. F., CARMACK E. C., KOROPALOV V. M. Deep water renewal and biological production in lake Baikal. *Nature*, **349**, 1991, 665–669.

Поступила в редакцию 15 сентября 1995 г.

Редактор *Е. Н. Казарезова*
Корректор *Н. А. Лившиц*
Оператор компьютерной верстки *Р. Д. Сидельникова*

Подписано в печать 05.08.97
Офсетная печать
Тираж 300 экз.

Подписано в свет 18.08.97
Усл. п. л. 12.6
Заказ №120

Формат 60 × 84 1/8
Уч.-изд. л. 9.4

Журнал зарегистрирован Комитетом РФ по печати (свидетельство №013787)
Издательство Сибирского отделения РАН, 630090, Новосибирск, Морской пр. 2
Оригинал-макет изготовлен на издательской системе AMS-LATEX
Отпечатано в Издательстве СО РАН