

КОНФЕРЕНЦИЯ С
ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА
ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСЕЙ В ОЗЕРЕ БАЙКАЛ

Б. О. Цыденов¹

¹Томский государственный университет, Томск, tsydenov@math.tsu.ru

Ключевые слова: перенос примесей, озеро Байкал, математическое моделирование, коротковолновая и длинноволновая радиация, скрытое и чувствительное тепло

В работе представлены результаты численного моделирования распространения примесей на разрезе пр. Средняя – м. Гольй озера Байкал. В модели в качестве атмосферных данных используется информация о температуре воздуха, относительной влажности, атмосферном давлении, облачности из архива погодных условий метеостанции г. Бабушкин в период с 01.06.2016 по 30.06.2016 г. Результаты расчетов показали, что растворенные в воде примеси достигают дна Селенгинского мелководья. По мере усиления темпов теплонакопления и прогрева речного притока максимальные концентрации взвешенных веществ имеют тенденцию оставаться в верхних слоях водной толщи.

Резкое увеличение антропогенной нагрузки на окружающую среду в последние десятилетия ведет к загрязнению крупнейших водоемов планеты. Российская Федерация по ресурсам поверхностных вод занимает ведущее место в мире. Только в озере Байкал сосредоточено около 20% мировых запасов озёрной пресной воды. Согласно данным Федеральной службы по надзору в сфере природопользования основным источником загрязнения Байкала является река Селенга, которая приносит 60% общего объёма поступающих загрязняющих веществ. Для правильного выбора стратегии предотвращения загрязнения воды важное значение имеет изучение природных механизмов озёрной гидродинамики.

Целью работы является численное воспроизведение переноса примесей на участке впадения реки Селенги в озеро Байкал в период прогрева водоема с помощью 2.5D математической модели, учитывающей суточную изменчивость метеорологических данных [1].

Транспорт примесей в модели описывается с помощью конвективно-диффузионных уравнений вида

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial u \Phi}{\partial x} + \frac{\partial w \Phi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right),$$

где Φ – концентрация взвешенных веществ, мг/л.

Математическое моделирование нестационарного течения в глубоководном озере проводится путём численного решения системы уравнений (уравнений неразрывности, количества движения, энергии, турбулентных характеристик) термогидродинамической модели [1]. Решение задачи основано на методе конечного объёма, согласно которому скалярные величины (концентрация взвешенных веществ, теплофизические характеристики воды и т.д.) определяются в центре сеточной ячейки, а компоненты вектора скорости – в средних точках на границах ячеек. В целях приближения расчётной области к прибрежному профилю озера

применяется метод блокировки фиктивных областей [2]: приравняются нулю компоненты скорости в выключенной зоне за счёт использования больших значений коэффициентов вязкости.

Для исследования распространения взвешенных веществ в озере Байкал выбран вертикальный разрез пр. Средняя – м. Голый [3]. Начало системы координат совпадает с устьем реки (рис. 1а). Вычислительная область имеет протяженность 15 км, глубину 150 м (рис. 1б) и покрыта равномерной ортогональной сеткой с шагами $h_x=25$ м и $h_z=3$ м. Шаг по времени – 60 с.

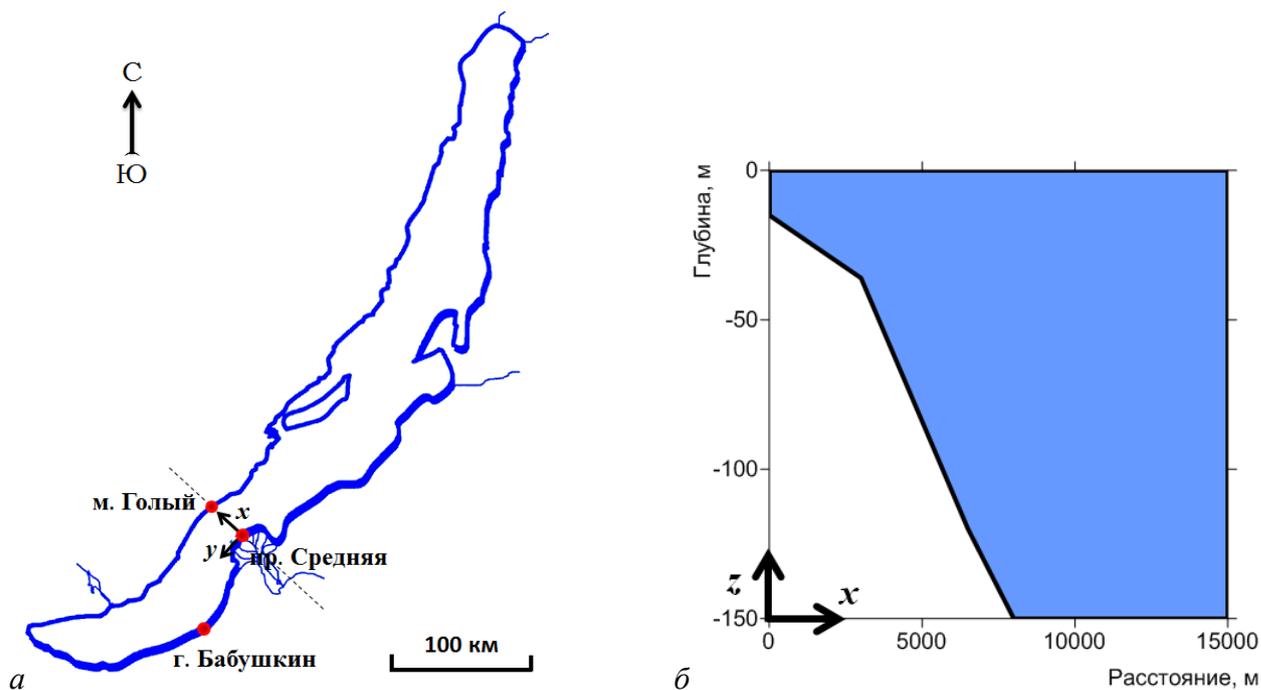


Рисунок 1 – Область исследования: (а) – разрез пр. Средняя – м. Голый, (б) – вычислительная область

В вычислительном эксперименте начальное поле температуры воды в озере имеет вертикально неоднородное распределение, отражающее многолетние средние значения Южного Байкала за июнь месяц [4]. Воды притока прогреваются с 5 до 20 °С. Река впадает в озеро со скоростью 0.01 м/с. Начальная концентрация взвеси в озере составляет 0.5 мг/л, в реке – 0.9 мг/л и увеличивается до 8 мг/л. Минерализация воды в озере равна 0.096 г/кг, а в реке линейно растёт от 0.190 до 0.195 г/кг [5].

В качестве атмосферных данных выступает информация о температуре воздуха, относительной влажности, атмосферном давлении, облачности из архива погодных условий метеостанции г. Бабушкин в период с 01.06.2016 по 30.06.2016 г. (<https://rp5.ru>), на основе которой рассчитаны значения коротковолновой и длинноволновой радиации, потоков скрытого и чувствительного тепла (рис. 2) по модели №3 из [6].

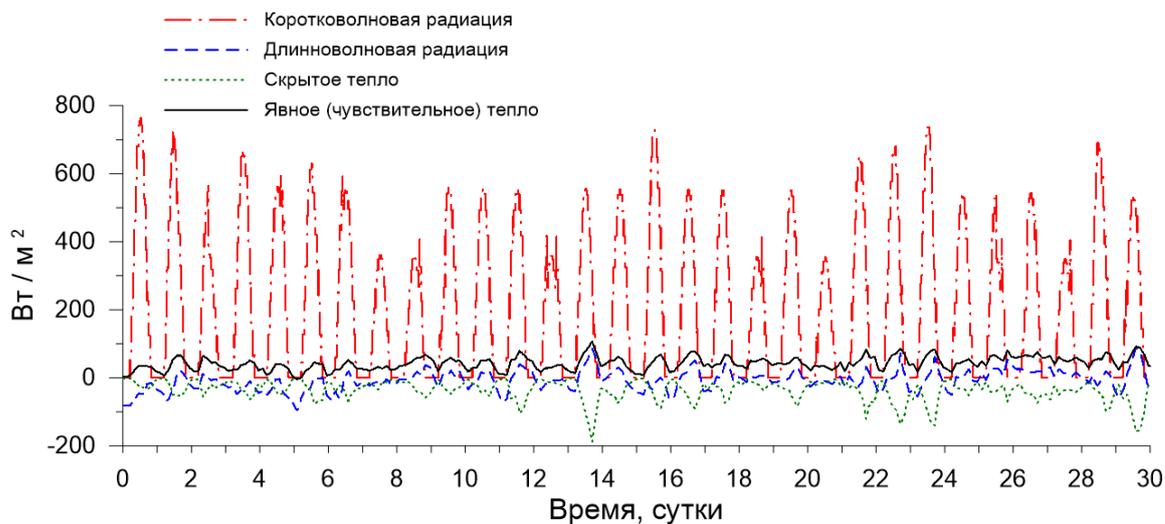


Рисунок 2 – Компоненты тепловых потоков, рассчитанные на основе атмосферных данных метеорологической станции г. Бабушкин в период с 01.06.2016 по 30.06.2016 г. (местное стандартное время)

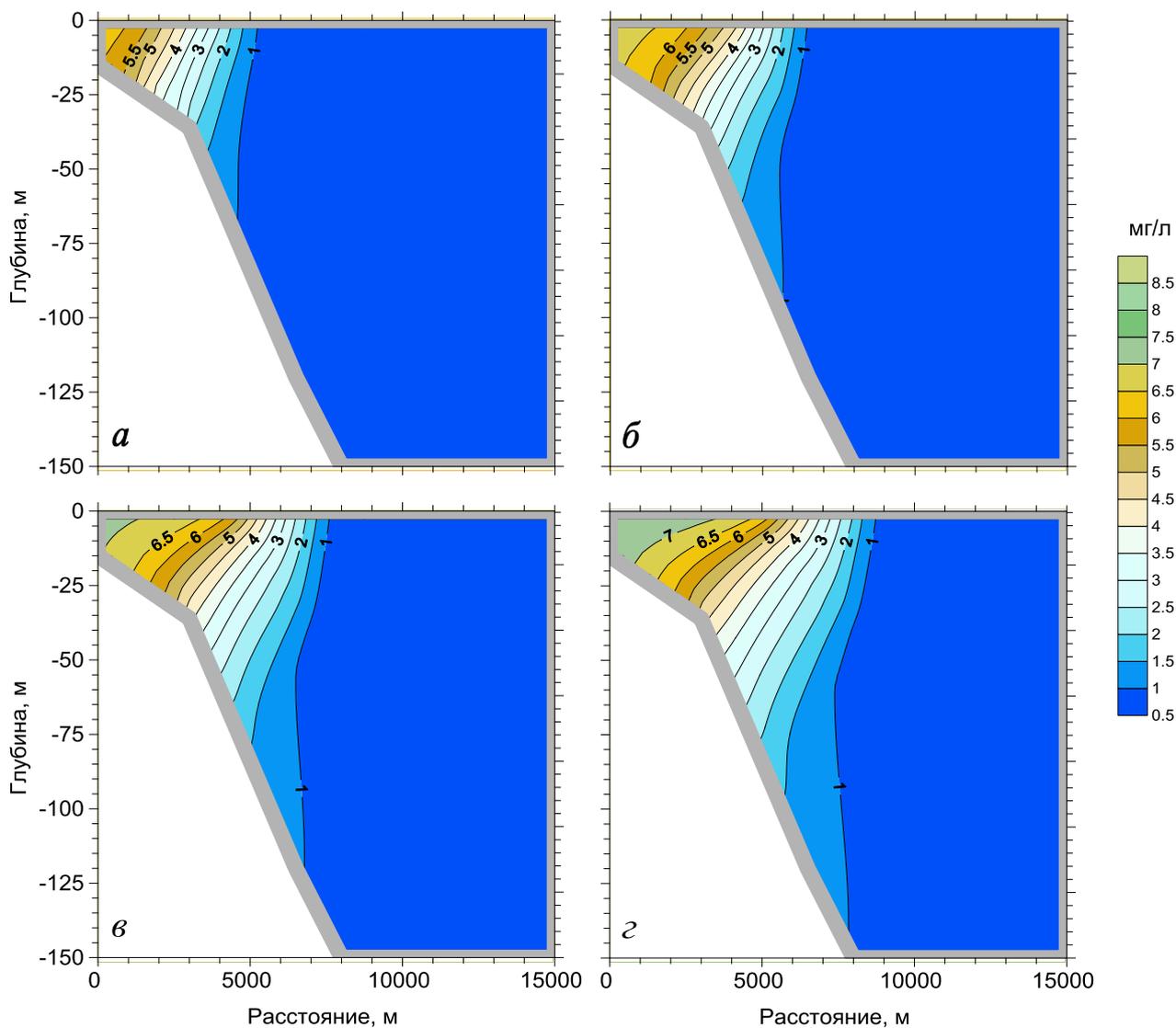


Рисунок 3 – Распределение взвешенных веществ на 15 (а), 19 (б), 23 (в), 27 (г) сутки моделирования

Из рис. 2 видно, что длинноволновая радиация принимает как положительное, так и отрицательное значение, и варьируется от -98 до 101 Вт/м^2 . Значения потока скрытого тепла на протяжении всего моделируемого периода меняются в диапазоне от -200 до 0 Вт/м^2 . Благодаря высокой среднесуточной температуре воздуха, чувствительное тепло вносит положительный вклад в тепловой баланс водоема и на 14-й день месяца принимает максимальное значение, равное 102 Вт/м^2 . Из всех четырех компонентов тепловых потоков коротковолновая радиация оказывает доминирующее влияние на прогрев поверхностных слоев озера, в дневное время суток при низкой облачности достигает наибольших значений (максимум составляет 780 Вт/м^2).

Полученные в ходе моделирования распределения взвешенных веществ (рис. 3) показывают максимальную концентрацию примесей в приустьевой части акватории озера. В начальной стадии моделирования (рис. 3а) взвеси опускаются до дна мелководья, изолинии имеют почти вертикальный характер. По мере усиления темпов теплонакопления и прогрева речного притока, менее плотная водная масса распространяется по поверхности озера, что способствует концентрации максимальных значений взвешенных веществ в верхних слоях водоёма (рис. 3в, рис. 3г). Результаты численного эксперимента качественно и количественно согласуются с материалами съемок в период отбора проб воды на Селенгинском мелководье с 18 по 20 июня 1971 г. [3].

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-4790.2016.5.

Список литературы

1. Tsydenov B.O., Kay A., Starchenko A.V. Numerical modeling of the spring thermal bar and pollutant transport in a large lake // *Ocean Modelling*. 2016. Vol. 104. P. 73-83.
2. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости [пер. с англ.]. М.: Энергоатомиздат, 1984. 124 с.
3. Тарасова Е.Н. Органическое вещество вод Южного Байкала. Новосибирск: Наука, 1975. 147 с.
4. Shimaraev M.N., Verbolov V.I., Granin N.G., Sherstyankin P.P. Physical limnology of Lake Baikal: A review. Irkutsk–Okayama. 1994. 81 p.
5. Иванов В.Г. Формирование и эволюция весеннего термобара за счет стока реки (на примере Селенгинского мелководья озера Байкал) : автореф. дис. ... канд. геогр. наук / В. Г. Иванов. Иркутск, 2012. 24 с.
6. Tsydenov B.O., Starchenko A.V. To the selection of heat flux parameterization models at the water-air interface for the study of the spring thermal bar in a deep lake / *Proc. SPIE 9680, 21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2015. P. 1–8.