

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕТРОВОГО ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В СТРАТИФИЦИРОВАННОМ ОЗЕРЕ ШИРА

Гаврилова Л. В., Компаниец Л. А.

(Россия, Красноярск)

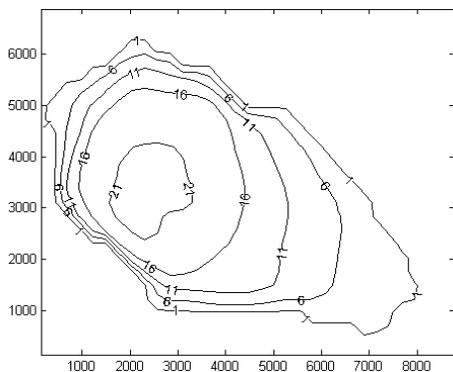
*Рассматривается задача о ветровом движении жидкости в стратифицированном озере Шира. Выдвигается гипотеза о том, что ветровое движение жидкости в озере Шира происходит следующим образом: нижний слой практически не движется, а верхний слой движется как однородная жидкость в «фиктивном» озере, глубина которого определяется толщиной перемешанного слоя. Эта гипотеза была подтверждена численными расчетами.*

Данная работа является составной частью исследований экосистемы озера Шира и качества воды в нем. Необходимость такого исследования обусловлена тем, что вода озера Шира обладает уникальными лечебными свойствами, поэтому озеро относится к числу водоемов, изучение которых является предметом международных программ.

Озеро Шира представляет собой бессточное озеро без островов, в которое впадает одна речка Сон. В силу малости притока все влияние реки сосредоточено в приустьевой зоне, поэтому основным внешним фактором, определяющим течение в озере, является ветровое воздействие.

Основные характеристики озера: озеро имеет овальную форму, длина — 9,4 км, ширина — 5 км, площадь водного зеркала — 34,7 км<sup>2</sup>, средняя глубина — 11,2 м, максимальная глубина меняется со временем от 21 м до 24 м, естественный среднегодовой водосток — 1,6 млн куб. м/год, подземный водообмен составляет 9% от общего водопоступления.

На рис. 1 показана батиметрия озера Шира по данным измерений 1958 г. В 2000 году были проведены замеры глубины озера с помощью многофункционального эхолота LMS-350 А (с выводом информации на персональный компьютер). Сравнение данных показало, что уровень воды заметно повысился и наибольшая глубина составила 24,3 м по сравнению с 21,7 м в 1958 г.



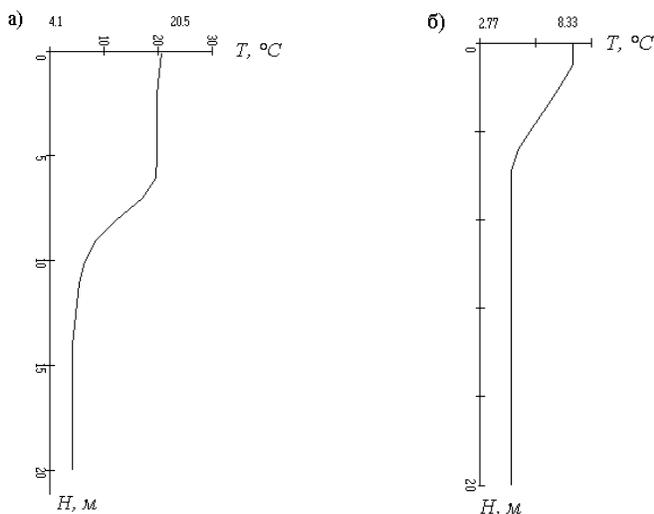
**Рис. 1.** Батиметрия озера Шира

Минерализация воды меняется в сторону уменьшения (от 18–22 г/л по наблюдениям 1958 г. до 11–13 г/л по наблюдениям 2004 г.). Согласно распространенному в лимнологии определению, оз. Шира относится к малым озерам (к большим озерам принято относить водоемы со средней глубиной более 25 м и площадью поверхности не менее нескольких сотен квадратных километров).

Наиболее важным параметром в моделях качества воды озер является температура воды и в особенности — ее распределение (изменение) по глубине водоема [1].

На рис. 2 приведены характерные летний и весенний профили температуры в озере Шира. Вверху образуется слой конечной толщины, определяемой пределом эффективности механизма

турбулентной диффузии в переносе тепловой энергии. Указанный слой (называемый эпилимнионом) в летний период с ростом температуры воды медленно расширяет свою нижнюю границу в глубину водоема. При этом температура придонных слоев тоже повышается, но весьма незначительно. Эта область носит название гиполимниона и может быть определена как глубинный слой, в котором вертикальный градиент температуры воды пренебрежимо мал. Между гиполимнионом и эпилимнионом обычно располагается слой воды (металимнион), в пределах которого градиент  $\partial T/\partial z$  очень велик. Этот слой часто называют областью термоклина, хотя, строго говоря, термоклин — это горизонт, на котором  $\partial^2 T/\partial z^2 = 0$ .



**Рис. 2.** Характерное распределение температуры в оз. Шира: а) в летний период, б) в весенний период

В летний период в озере формируется сильная плотностная стратификация: в эпилимнионе более высокая температура воды

(15–25 °С), в гипоплимнионе — более высокая соленость (21–22 г/л) и холодная вода (2–3 °С).

Основные результаты получены по упрощенной модели движения жидкости с переменной плотностью в приближении Буссинеска и гидростатики [2]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - lv = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial x} dz, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + lv = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial y} dz, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

$$\rho = \rho(T, S), \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_T \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (5)$$

Уравнение переноса солей имеет аналогичный вид. Здесь  $u, v, w$  — компоненты вектора скорости течения;  $l$  — параметр Кориолиса;  $K_z, K_T, K_S$  — коэффициенты вертикального турбулентного обмена для скорости, температуры и солености соответственно;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\zeta$  — отклонение свободной поверхности от невозмущенного положения;  $\rho$  — плотность воды,  $\rho_0$  — средняя плотность воды;  $T$  — температура воды;  $S$  — соленость воды.

Система уравнений (1)–(5) дополнена соответствующими начальными и граничными условиями на поверхности, дне и боковых стенках.

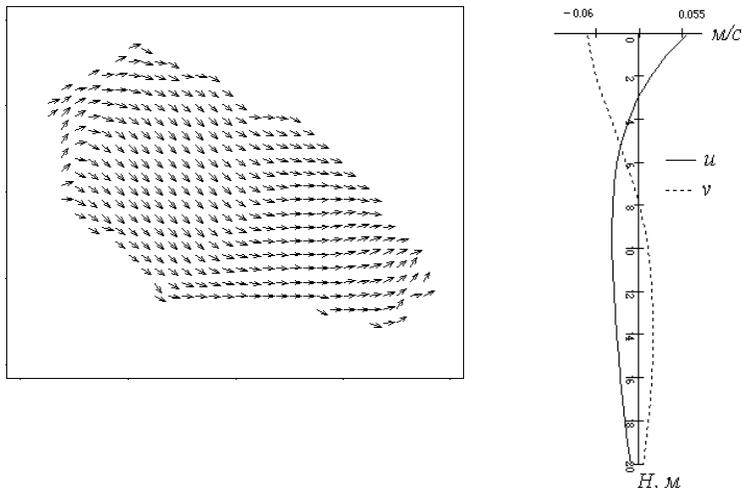
Если предположить, что  $\rho = const$  и течения медленные (в уравнениях движения опускаются нелинейные члены), то получим уравнения модели Экмана [3].

Эта система имеет более простой вид, чем для случая неоднородной жидкости. Более того, в стационарном случае для этой задачи найдены аналитические решения [3], [4]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - lv = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) - g \frac{\partial \zeta}{\partial x},$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + lu = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) - g \frac{\partial \zeta}{\partial y},$$

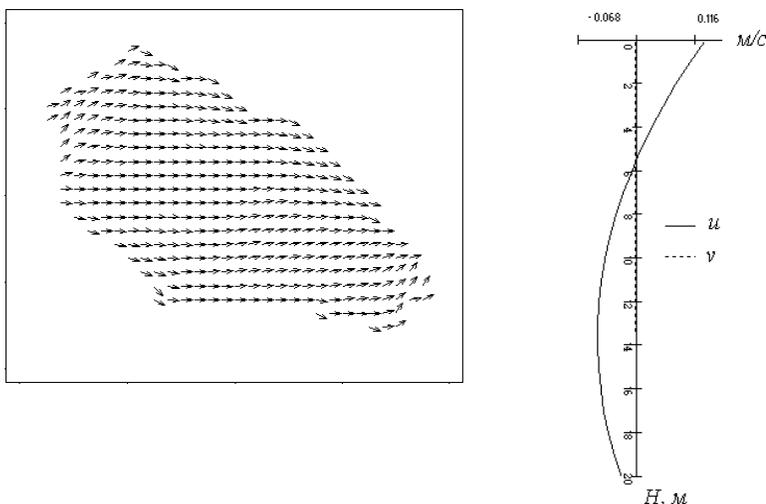
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0.$$



**Рис. 3.** Картина течения на поверхности и распределение горизонтальной составляющей вектора скорости по глубине в центральной точке бассейна, однородная жидкость,  $l \neq 0$

Анализ аналитических решений показывает, что движение жидкости определяется соотношением двух параметров: глубины  $H$  и так называемой глубины слоя Экмана  $D = \pi / \sqrt{l/2K_z}$ .

При  $H/D \ll 1$  водоем принято называть мелким и течение на поверхности имеет направление, практически совпадающее с направлением ветра. При  $H/D \gg 1$  водоем принято называть глубоким, течение на поверхности отклоняется вправо на угол  $45^\circ$ , с глубиной вектор скорости делает поворот. Отметим, что озеро будет мелким, если мала его глубина или мал параметр Кориолиса.



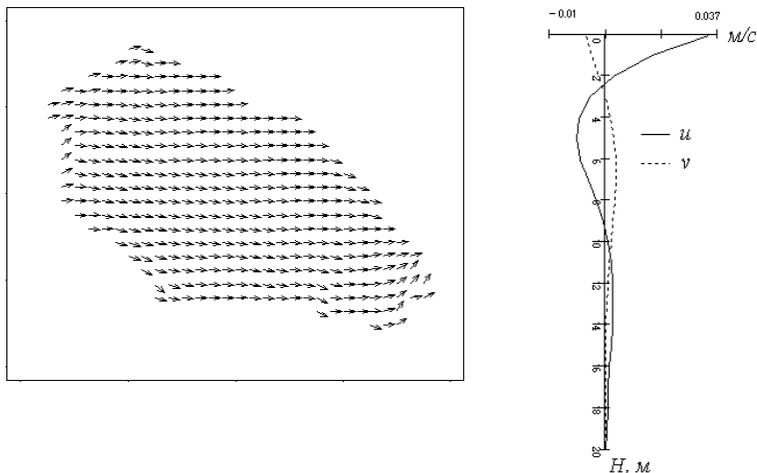
**Рис. 4.** Картина течения на поверхности и распределение горизонтальной составляющей вектора скорости по глубине в центральной точке бассейна, однородная жидкость,  $l = 0$

Возможность применения для анализа течения в стратифицированном озере модели однородной жидкости упрощает поставленную задачу.

Используемый для численного анализа алгоритм аналогичен численному алгоритму, рассмотренному в работе [2], то есть производится замена переменных, спрямляющая дно, для аппроксимации уравнений движения применяется схема стабилизирующей поправки, для уравнения неразрывности — схема Эй-

лера, для аппроксимации уравнений переноса и диффузии тепла и соли применяется разностная схема с разностями против потока для дивергентной формы записи конвективных членов и схема с центральными разностями для вторых производных.

По построенной численной модели был проведен ряд расчетов для определения картины течения в непроточных водоемах, в частности, в озере Шира.

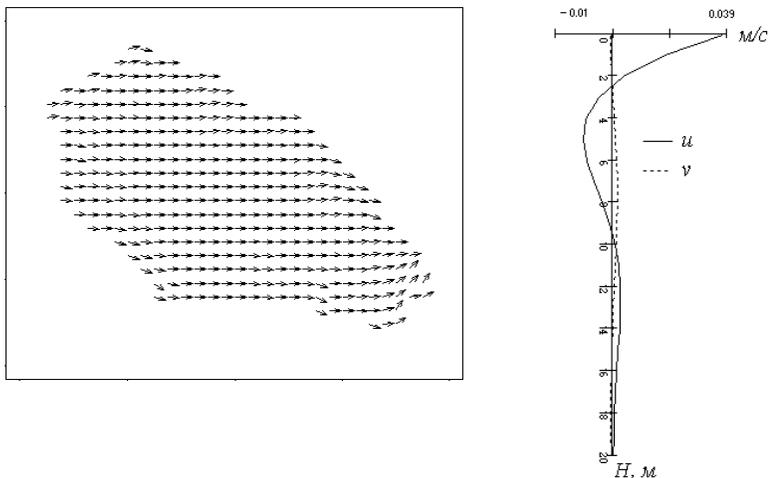


**Рис. 5.** Картина течения на поверхности и распределение горизонтальной составляющей вектора скорости по глубине в центральной точке бассейна, неоднородная жидкость,  $l \neq 0$

Расчеты проводились для однородной и неоднородной жидкости с учетом и без учета сил Кориолиса. Вариант расчетов для случая западного ветра силой 5 м/с, постоянного коэффициента вертикального турбулентного обмена  $K_z = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$  и условия проскальзывания на дне ( $k_b = 10^{-3}$ ) приводится на рис. 3–6.

При данной батиметрии и данном коэффициенте вертикального турбулентного обмена в случае однородной жидкости

при учете сил Кориолиса (рис. 3) получаем, что горизонтальные составляющие вектора скорости в глубоководной части водоема соизмеримы по величине и вектор скорости существенно разворачивается с глубиной. Такая картина течения для стационарного движения однородной жидкости, в соответствии с классическим аналитическим решением Экмана, характерна для глубоких водоемов. В мелководной части направление течения на поверхности совпадает с направлением ветра. Если силы Кориолиса не учитываются (рис. 4), то направление течения на поверхности совпадает с направлением ветра и в глубоководной части водоема, вектор скорости практически не разворачивается с глубиной, т. е. течение является «квазидвумерным» в вертикальной плоскости. Такое течение характерно для мелких водоемов.



**Рис. 6.** Картина течения на поверхности и распределение горизонтальной составляющей вектора скорости по глубине в центральной точке бассейна, неоднородная жидкость,  $l = 0$

Расчеты для неоднородной жидкости с учетом (рис. 5) и без учета (рис. 6) сил Кориолиса дают практически одинаковый результат. Даже при учете сил Кориолиса вектор скорости почти не

разворачивается с глубиной, т. е. получаем «квазидвумерное» в вертикальной плоскости течение.

Анализ полученных результатов позволил выдвинуть гипотезу о том, что движение жидкости в сильно стратифицированном озере происходит следующим образом: нижний слой практически покоится, а верхний слой движется как однородная жидкость в фиктивном озере, глубина которого меньше естественной глубины водоема и определяется глубиной перемешанного слоя. Эту гипотезу подтверждают и расчеты для озера Шира. Результаты одного из таких расчетов приводятся на рис. 7, где сплошной линией изображено распределение горизонтальной составляющей вектора скорости по глубине в оз. Шира для неоднородной жидкости, а пунктирной линией — распределение скорости по глубине в «фиктивном» озере для однородной жидкости. Брался западный ветер силой 7 м/с,  $K_z = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ . Расчеты дали хорошее совпадение результатов.

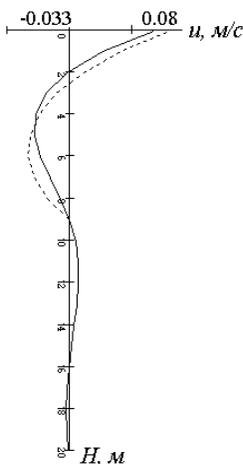
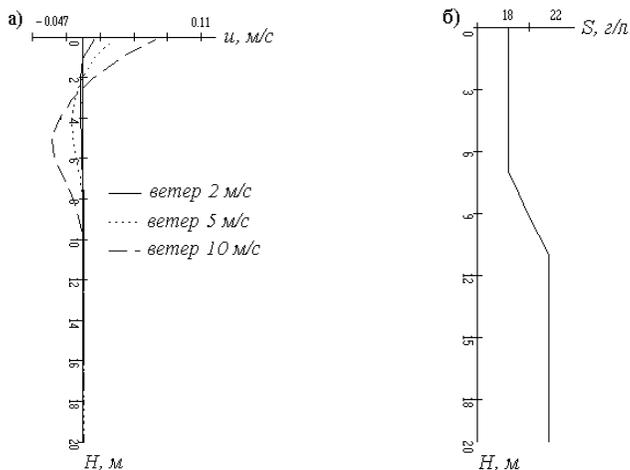


Рис. 7. Распределение скорости  $u$  по глубине

В случае когда глубина перемешанного слоя невелика (для озера Шира эта величина колеблется от 6 до 10 м), движение

жидкости в верхнем слое можно трактовать как движение однородной жидкости в «мелком» озере. Как было указано выше, в этом случае движение жидкости является «квазидвумерным». Поэтому для оценки движения жидкости в стратифицированных водоемах можно применять более простые двумерные в вертикальной плоскости модели, что было сделано в серии расчетов для бассейна, моделирующего вертикальное сечение озера Шира.

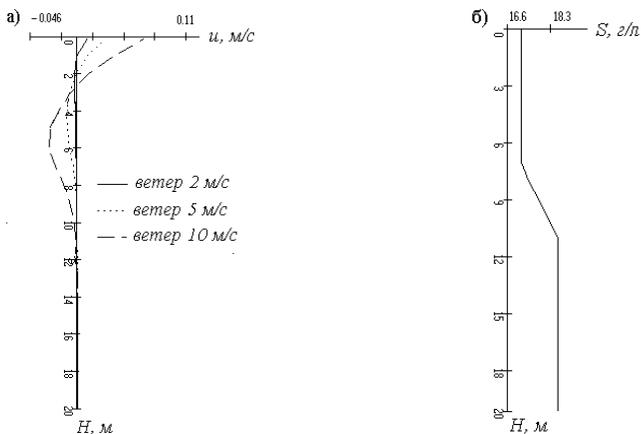
Были проведены расчеты с различными значениями солености, отвечающими натурным наблюдениям, для типичной летней и весенней температурной стратификации воды. Рассматривалась нелинейная зависимость плотности от температуры и солености (формула Гилла [5]).



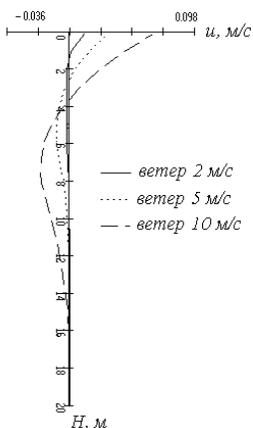
**Рис. 8.** а) Распределение горизонтальной составляющей вектора скорости по глубине в центральной точке бассейна в летний период; б) соленость воды в летний период

Численные расчеты показали, что при солености от 18 г/л в верхнем слое до 22 г/л в нижнем слое в летний период даже при больших ветрах реализуется двухциркуляционное течение, когда верхний слой движется, а нижний практически покоится (рис. 8).

При уменьшении градиента солености (16,6 г/л в верхнем слое, 18,3 г/л в нижнем слое) глубина перемешанного слоя увеличивается на 0,5 м (рис. 9).



**Рис. 9.** а) Распределение скорости  $u$  по глубине в центральной точке бассейна в летний период, б) соленость воды в летний период



**Рис. 10.** Распределение скорости  $u$  по глубине в центральной точке бассейна в летний период, равномерно соленая вода

В случае равномерно соленого озера для летней стратификации глубина перемешанного слоя увеличивается (рис. 10).

Таким образом, наблюдаемое уменьшение градиента солености в озере Шира делает вероятным вариант одноциркуляционного течения в летний период при сильных ветрах. Тем более такая ситуация возможна в весенний период, когда температурная стратификация мала. Это означает, что если тенденция к уменьшению градиента солености в озере сохранится, то возможно изменение типа этого озера с меромиктического (озера, в котором циркуляция охватывает только верхний слой) на димиктический (с полным перемешиванием воды по глубине в осенний и весенний периоды), что может привести к негативным последствиям для экологии озера Шира.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ-ККФН (грант 05-01-97700-р-Енисей).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хендерсон-Селлерс Б. Инженерная лимнология. — Л.: Гидрометеоздат, 1987. — 335 с.
2. Квон В.И. Гидротермический расчет водоемов-охладителей // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, 1979. — № 5. — С. 129–137.
3. Ekman V.W. On the influence of the Earth rotation on ocean currents // Arkiv Mat., Astron., Fysik. 1905. — Bd. 2. — № 11. — P. 1–52.
4. Welander P. Wind action on a shallow sea: some generalizations of Ekman's theory // Tellus, 1957. — Vol. 9. — P. 45–52.
5. Gill A.E. Atmosphere-Ocean Dynamics // Academic Press, 1982. — Vol. 2. — P. 256–278.

## RESEARCH OF WIND-INDUCED MOTION OF FLUID IN STRATIFIED LAKE SHIRA

**Gavrilova L. V., Kompaniets L. A.**

(Russia, Krasnoyarsk)

*The task of the wind-induced motion of fluid in stratified Lake Shira is considered. A hypothesis on wind-induced motion in Lake Shira is put forward: the lower layer is practically at rest and the upper layer is moved as homogeneous fluid in “fictitious” lake with depth determinate of the thickness of upper mixed layer. This hypothesis was verified by numerical calculations*