

ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Система течений над сложным рельефом дна и ее влияние на перенос примесейБ. И. Самолюбов^{1,a}, Т. В. Кириллова^{2,b}¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики моря и вод суши. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.²Институт водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул 38, ул. Молодежная, д. 1. E-mail: ^a samolyubov@phys.msu.ru, ^b tkirillov@iwer.asu.ru

Статья поступила 26.11.2009, подписана в печать 29.12.2009

Представлены результаты натурных и теоретических исследований структур полей скорости и параметров состава воды в системе стратифицированных течений над сложным рельефом дна. Получены и проверены распределения скорости течения с учетом всех потоков, входящих в систему. Выявлены зависимости распределений концентраций растворенного кислорода и хлорофилла-а от характеристик струйного и придонного плотностного течений.

Ключевые слова: стратифицированные течения, энергообмен, интенсивность турбулентного обмена, турбулентное вовлечение, придонные плотностные потоки, струйные и стоково-дрейфовые течения, перенос примесей, устойчивость течений.

УДК: 556.556:532.5. PACS: 92.40.qj.

Введение

Динамика вод и диффузия примесей в стратифицированных озерах и водохранилищах в значительной мере определяется процессами развития систем течений, существующих в водоеме. Под системой течений понимается совокупность потоков, развивающихся на разных глубинах от поверхности до дна и взаимодействующих между собой. В такие системы входят придонные, струйные и другие потоки. Они изучаются для решения ряда фундаментальных и прикладных, в том числе экологических, проблем геофизической гидродинамики [1–3]. Цели настоящей работы: 1) выявление закономерностей преобразований распределений скорости и параметров состава воды над сложным рельефом дна; 2) развитие математических моделей систем стратифицированных течений и транспорта примесей в этих потоках.

1. Объект и методика исследований

Исследования проведены экспедициями физического факультета МГУ в 2003–2006 гг. в широтной части Телецкого озера (Горный Алтай), одного из основных источников р. Обь. Глубина озера до 325 м, длина 78 км, ширина до 5.2 км. В озеро впадает около 70 рек, вытекает р. Бия [4]. Стратификация вод — термическая. Ниже рассматривается развитие системы придонных, струйных, стоково-дрейфовых течений и перенос примесей от подводного порога, разделяющего глубоководную меридиональную и мелководную широтную части озера, до истока р. Бия. Область распространения течений (рис. 1) отличается сложным рельефом дна с перепадами глубин от 11 до 38 м.

Программа работ включала гидрофизические, гидрохимические и гидробиологические исследования, выполнявшиеся научными группами физического факуль-

тета МГУ и ИВЭП СО РАН с борта НИС ИВЭП [5]. В ходе измерений на продольно-осевых разрезах протяженностью 11.5 км одновременно с шагом по глубине 0.5 м регистрировались профили скорости, температуры, концентраций взвеси, растворенных солей и кислорода, скорость и направление ветра. Аппаратура для измерений параметров течений и состава воды (зонды и градиентные установки) представлена в [3]. На разрезах регулярно отбирались пробы воды для определения концентрации хлорофилла-а.

2. Распределения скорости течения и параметров состава воды

Происхождение изучаемых течений связано с перетеканием вод из глубоководной части озера в мелководную область. Профили скорости U , изображенные на рис. 1 до первого слева порога, над ним и после него содержат придонный поток, промежуточные струи и стоково-дрейфовое течение. Измерения выполнены на разрезе 08.08.2006. Профили плотности воды характеризуются основными максимумами градиента $\partial_z \rho$ в пикноклинах на глубинах 7 ± 1.5 и 12 ± 2.4 м.

Эти результаты отличаются от полученных 22.07.2003 и 27.07.2004 устойчивостью стратификации [3]. Средние по разрезу разности плотностей приповерхностных и придонных вод $\overline{\delta \rho_{xa}}$ и числа Ричардсона $Ri_u = g \overline{\Delta \rho} z_u / \rho \overline{U}^2$ для придонного потока в створе I составляли по данным 2003, 2004 и 2006 гг.: $\overline{\delta \rho_{xa}} = 2, 4.4, 5.2 \cdot 10^{-4}$ г/см³, $Ri_{u0} = 0.4, 0.8, 1.3$. Здесь g — ускорение свободного падения, z_u — толщина потока, $\overline{\Delta \rho}$ — разность плотностей вод в потоке и над ним, \overline{U} — скорость течения, средняя по вертикали.

Зарегистрированные течения претерпевали преобразования, связанные с неоднородностями структуры поля плотности воды и рельефа дна. К главным из

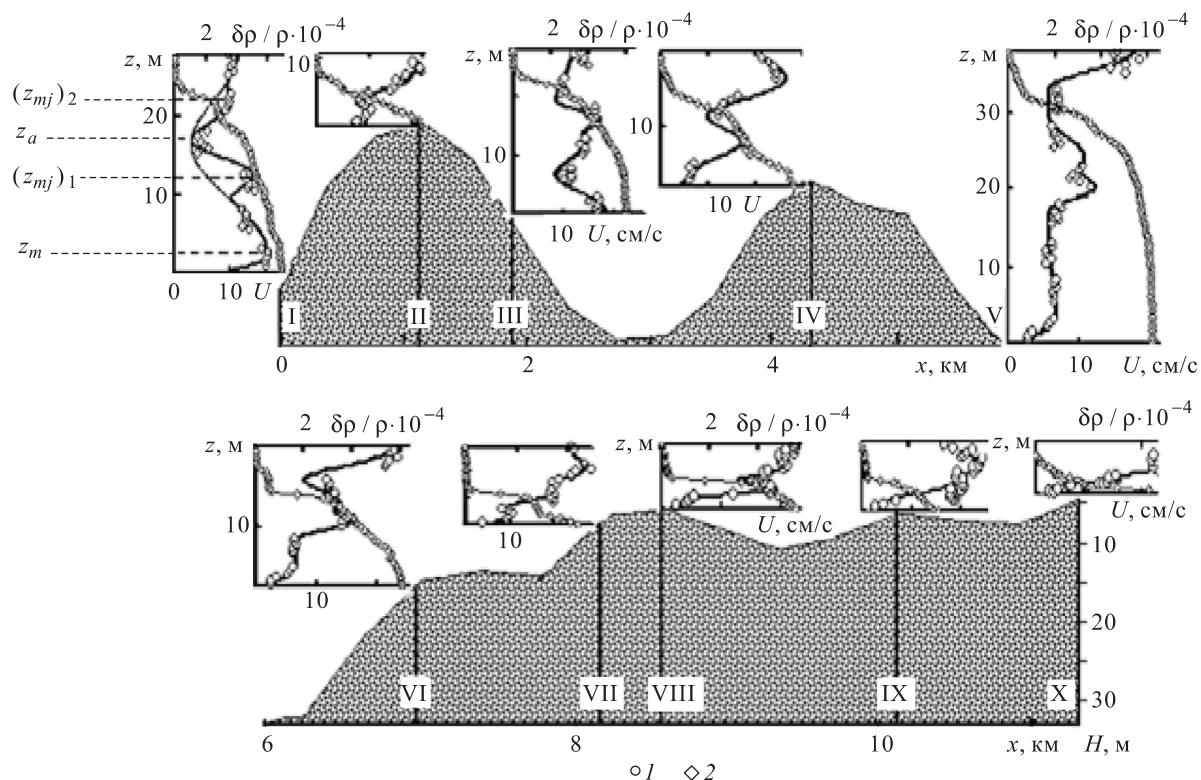


Рис. 1. Вертикальные распределения скорости течения U (1) и изменения плотности воды от поверхности дна $\delta\rho/\rho$ (2) на продольно-осевом разрезе в широтной части оз. Телецкое (м. Караташ — п. Артыбаш, 08.08.2006). Заштрихованная область — профиль дна $H(x)$, H — глубина, x — расстояние вдоль по разрезу, z — высота над уровнем дна. Римские цифры соответствуют номерам вертикалей. На вертикали I (при $x=0$) отмечены уровни высоты придонного течения z_u , максимумов скорости этого потока z_m и струй $(z_{mj})_1$, $(z_{mj})_2$. Тонкой кривой показан профиль скорости, соответствующий суперпозиции придонного плотностного и стоково-дрейфового течений

этих преобразований можно отнести гравитационные ускорения придонного течения на склонах, слияния и разделения двух промежуточных струй в области термоклина и усиление роли стокового течения в финальной части разреза с приближением к истоку р. Бия из озера.

Кривые $U(z)$ на рис. 1 построены по модифицированной в настоящей работе теории из [3] путем суперпозиции профилей скорости потоков, входящих в систему. На первой вертикали (при $x=0$) отмечены характерные уровни, соответствующие высоте придонного течения, максимумам скорости этого потока и струй. Теоретическое распределение скорости получено за счет применения в модели выявленных зависимостей, определяющих ряд ключевых параметров придонного, струйных и стоково-дрейфового потоков.

Для придонного потока получены выражения функции вовлечения вышележащих вод и скорости на его верхней границе. Оказалось, что обычная для гравитационных потоков пропорциональность утолщения течения $\partial_x z_u$ и уклона дна i_s выполняется лишь при докритических уклонах, меньших 0.016. При сверхкритических уклонах связь $\partial_x z_u$ и i_s приобретала более слабый, логарифмический характер. Это объясняется спадом скорости течения и соответственно интенсивности турбулентного обмена при вовлечении на крутых склонах. Соответствующее выражение утолщения потока $\partial_x z_u$, аналогичное функции вовлечения

$E\eta = \bar{U}^{-1} \partial_x (z_u \bar{U})$ при $z_u \bar{U}^{-1} \partial_x \bar{U} \ll \partial_x z_u$, имеет вид:

$$\partial_x z_u \cong \begin{cases} 0.044 i_s & \text{при } |i_s| < 0.016, \\ 0.08 \ln(i_s + 0.02) & \text{при } 0.016 < |i_s| < 0.024. \end{cases} \quad (1)$$

Скорость на верхней границе плотностного потока $U_F = U(z_u)$ зависит от профиля скорости стокового течения (из озера в р. Бия), который в свою очередь подвержен влиянию устойчивости стратификации. Из анализа данных измерений следует, что главным фактором, определяющим изменения величины U_F , является устойчивость всей водной толщи к ветровому воздействию. Эта устойчивость характеризуется полным числом Ричардсона $Ri_H^* = g \Delta \rho_H H / \rho U_*^2$ [6]. Здесь $\Delta \rho_H = \rho|_{z=0.5\text{ м}} - \rho|_{z=H-0.5\text{ м}}$, H — глубина, $U_{*w} = (\tau_{*w} / \rho)^{1/2}$ — скорость трения на границе вода-воздух, $\tau_{*w} = \rho_A C_{DA} U_w |U_w|$ — напряжение трения, $\rho_A = 1.2 \cdot 10^{-3}$ г/см³ — плотность воздуха при $T = 20^\circ\text{C}$ и атмосферном давлении, $C_{DA} = 1.7 \cdot 10^{-3}$ — коэффициент сопротивления, U_w — скорость ветра в 2 м над поверхностью воды. С учетом изменений Ri_H^* вдоль по разрезу $U_F = U(z_u)$ определяется найденным выражением вида

$$U_F \cong U_{F0} \exp(1 - (Ri_H^* / Ri_{H0}^*)), \quad (2)$$

согласно которому рост устойчивости стратификации всей водной толщи к ветровому воздействию приводит к ухудшению энергообмена в стоковом течении и снижению скорости этого течения у дна. Здесь

и ниже подстрочный индекс 0 соответствует значению параметра в начальном створе (при $x = 0$).

С учетом (1), (2) получено распределение средней скорости плотностного потока $\bar{U}(x)$ по модели из [3], сопоставленное с данными измерений на рис. 2, а. По теоретическим значениям \bar{U} определялась максимальная скорость придонного течения U_m при расчете профилей $U(z)$ (рис. 1). На основной части разреза ($x < 9$ км) выполнялось обычное приближение квазиинвариантности дефекта скорости $D_u = U_m/\bar{U} = 1.2$ при $U_m = U(z_m)$. Эта закономерность нарушалась лишь в завершающей части разреза ($x = 9-11.4$ км), когда струйное течение опережало придонное настолько, что вертикальный градиент скорости в слое смешения придонного потока $z_m - z_u$ менял знак. Максимум скорости потока оказывался на уровне z_u , а на высоте прежнего максимума z_m соотношение скоростей составляло $U(z_m)/\bar{U} = 0.4$.

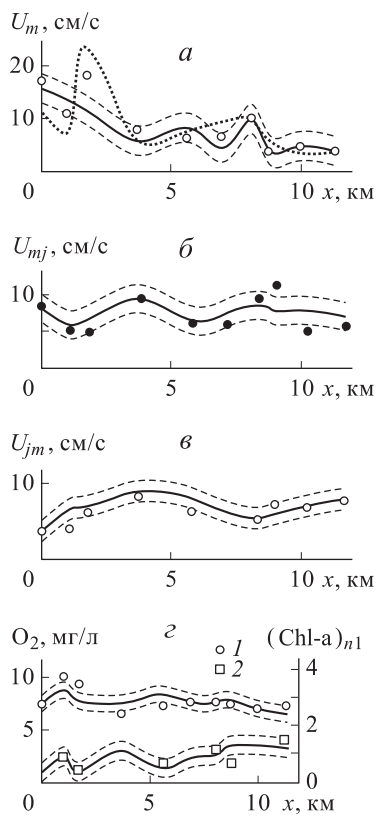


Рис. 2. Измеренные и теоретические продольные распределения: а — скорости придонного потока, б и в — скоростей нижней и верхней струй, г — концентраций кислорода в плотностном течении и хлорофилла-а на его верхней границе. Результаты получены на разрезе 08.08.2006. Сплошные кривые на а, б, в соответствуют модифицированной модели из [3]. Кривая 1 на рис. г — $O_2(x)$ по модели из [7], кривая 2 — Chl-a по (5). Пунктир на рис. а — $U_m(x)$ по (3). Штрихпунктир — границы стандартного отклонения

Скорости струй $U_j(x, z)$ получались по модели из [3], дополненной выражениями для траектории (положения максимума скорости) $z_{mj}(x)$ и толщины Δz_{mj} каждой из струй. Для $z_{mj}(x)$ обнаружена квазилинейная связь с глубиной вида $(z_{mj})_1 \cong 0.46H(x)$

и $(z_{mj})_2 \cong 0.66H(x)$ для струй в областях нижнего и верхнего пикноклинов. Толщины струй определяются на базе типичной для гравитационных потоков связи функции вовлечения с уклонами i_{sj} по траекториям нижней и верхней струй:

$$(\Delta z_{mj})_1 \cong (\Delta z_{mj})_1|_{x=0} + \int_0^x (i_{sj})_1 dx,$$

$$(\Delta z_{mj})_2 \cong (\Delta z_{mj})_2|_{x=0} + 0.35 \int_0^x (i_{sj})_2 dx.$$

Распределения скорости струй по модели из [3] с учетом этих выражений приведены на рис. 2, б, в.

Взаимосвязь скоростей придонного потока и вышележащей струи в системе течений отражается выявленной зависимостью соотношения скоростей этих потоков от уклона дна:

$$U_m/U_{mj} \cong (95|i_s| + 0.3). \quad (3)$$

Эта зависимость обусловлена следующими факторами. С одной стороны, скорость придонного потока U_m может поддерживаться не только при положительных уклонах за счет гравитационного ускорения, но и при отрицательных под действием градиента давления, связанного с уменьшением толщины потока и плотности воды у дна вдоль по течению. С другой стороны, скорость струи U_{mj} обратно пропорциональна уклону, поскольку с увеличением глубины перераспределяется плотность воды и снижается разность плотностей вод в струе и ней. В итоге соотношение U_m/U_{mj} оказывается пропорциональным $|i_s|$. Кривая $\bar{U}(x) = U_m/D_u$ с U_m из (3) приведена на рис. 2, а.

Скорость стоково-дрейфового течения, необходимая для применения модели из [3], оценивается в приближениях постоянства удельного (на единицу ширины потока) расхода воды по всей глубине и пропорциональности скоростей дрейфового течения и ветра. Соответствующее выражение скорости стоково-дрейфового течения на глубине 3 м имеет вид

$$U_{H-3} \cong 0.8(q_{H0}/H) + 4 \cdot 10^{-3} \cdot U_w. \quad (4)$$

Здесь $q_{H0} = U_{FD} \cdot H$ — удельный расход при $x = 0$, U_{FD} — скорость, средняя по всей глубине, $4 \cdot 10^{-3}$ — ветровой коэффициент для течения на глубине 3 м.

Применение в модели из [3] зависимостей (1)–(4) дает неплохое соответствие расчетных и измеренных распределений скорости (рис. 1, 2).

3. Влияние системы течений на распределение кислорода и хлорофилла-а

Среди распределений примесей наиболее динамичными оказались зависимости концентраций растворенного кислорода и хлорофилла-а от расстояния вдоль по разрезу, сопоставленные на рис. 2, г с теоретическими кривыми. Спад концентрации O_2 в придонном потоке с расстоянием x обусловлен постепенным перемешиванием вод этого течения, транспортирующего кислород из глубоководной части озера в мелководную, с вышележащими водами. Удовлетворительное соответствие теоретических и измеренных продольных распределе-

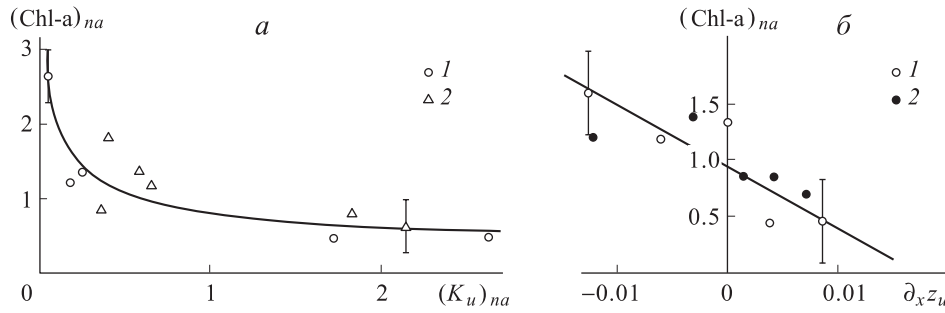


Рис. 3. Зависимости концентрации хлорофилла, нормированной на среднюю по разрезу: *a* — от нормированного аналогичным образом коэффициента турбулентного обмена, найденные по данным измерений на двух разрезах в широтной части озера и *б* — от функции вовлечения вышележащих вод в плотностное течение (27.07.2004 г. — 1 и 08.08.2006 г. — 2). Интервалы соответствуют границам стандартного отклонения

ний концентрации кислорода подтверждает основные положения модели из [7], по которой рассчитана кривая на рис. 2, *з*.

Продольное распределение хлорофилла-а (см. рис. 2, *з*) построено по выявленной зависимости его удельного содержания от коэффициента турбулентного обмена для придонного потока K_u (рис. 3, *a*):

$$(\text{Chl} - a)_u = (\text{Chl} - a)_{u1} (K_{u1}/K_u)^{0.5}. \quad (5)$$

Индексом 1 отмечены параметры для вертикали, расположенной над первым подводным порогом (створ II на рис. 1). Пробы для спектрометрического анализа на содержание хлорофилла-а отбирались на разрезах в 2004 и 2006 гг. в створах II, III, V, VII, VIII, X на горизонтах $z = H - 0.5$ м и $z_{\text{проб}} = (0.85-1.45)z_u$. Значение K_u рассчитывалось по выражению $K_u \cong l\sigma_w \cong 14.4 \cdot 10^{-4} z_u \bar{U} / (1 + 0.4 \text{Ri}_u)^{3/4}$, где $l \cong 0.06 \cdot 0.6z_u / (1 + 0.4 \text{Ri}_u)^{1/4}$ и $\bar{\sigma}_w \cong 0.04\bar{U} / (1 + 0.4 \text{Ri}_u)^{0.5}$ — средние по толщине течения путь смешения и стандарт вертикальной компоненты пульсаций скорости [3, 8].

Как следует из (5), усиление вертикального обмена в плотностном потоке ведет к спаду концентрации хлорофилла-а при $z = z_u$. Это объясняется разбавлением вод на верхней границе течения водами из его придонного слоя с пониженной концентрацией хлорофилла. Согласно зависимости концентрации хлорофилла-а на верхней границе течения от функции вовлечения в него окружающих вод (рис. 3, *б*), концентрация обратно пропорциональна функции вовлечения и максимальна при отрицательном вовлечении.

По данным измерений 2004, 2006 гг. концентрации хлорофилла-а у поверхности $z = H - 0.5$ м и у верхней границы придонного потока $z_{\text{проб}} = (0.85-1.45)z_u$ обратно пропорциональны (рис. 4). Соотношение концентраций хлорофилла-а R_{ch} на этих уровнях убывает от 3 до 1 ± 0.3 с ростом стандарта вертикальной компоненты пульсаций скорости течения $(\sigma_{wj})_a$, среднего для верхней и нижней струй (рис. 5). Это свидетельствует о выравнивании концентраций с ростом $(\sigma_{wj})_a = 0.5((\sigma_{wj})_1 + (\sigma_{wj})_2)$. Следовательно, усиление обмена в струях приводит к переносу хлорофилла-а в глубинные слои.

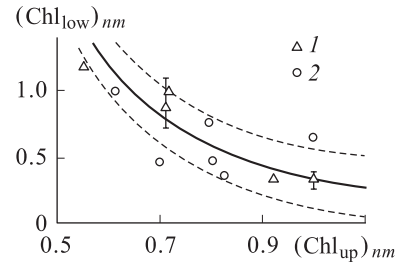


Рис. 4. Связь концентраций хлорофилла-а у поверхности воды и в области верхней границы придонного потока. Концентрации нормированы на их значения, средние по разрезу. Обозначения 1 и 2 соответствуют результатам, полученным на разрезах 2004 и 2006 гг., штрихпунктир — границам стандартного отклонения

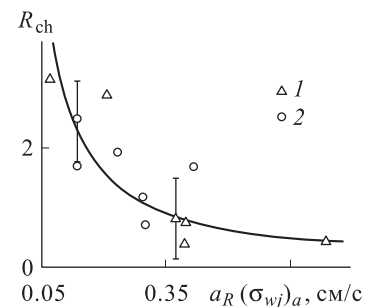


Рис. 5. Зависимость соотношения концентраций хлорофилла-а R_{ch} у поверхности воды и у верхней границы придонного потока от стандарта вертикальной компоненты пульсаций скорости течения $(\sigma_{wj})_a$, осредненного по верхней и нижней струям. Обозначения 1 и 2 соответствуют результатам, полученным на разрезах 2004 и 2006 гг., а интервалы — границам стандартного отклонения

Величина σ_{wj} определялась как $\sigma_{wj} \cong 0.04\bar{U}_j / (1 + 0.4 \text{Ri}_\Delta)^{0.5}$ [9]. Здесь $\text{Ri}_\Delta = g\bar{\Delta\rho}_j\Delta z_j / \rho\bar{U}_j^2$ — число Ричардсона для струи, $\bar{\Delta\rho}_j$ — разность плотностей вод в струе и над ней, Δz_j и \bar{U}_j — толщина и средняя скорость струи. Кривая на рис. 5 соответствует выражению $R_{\text{ch}} = a_R / (\sigma_{wj})_a$, где $a_R = 0.3((\text{Ri}_{u1})_{04} / \text{Ri}_{u1})^{0.5}$, Ri_{u1} — число Ri_u над первым слева подводным порогом (в створе II), $(\text{Ri}_{u1})_{04} = 0.18$ — число Ri_{u1} на разрезе в 2004 г. В 2006 г. число Ri_{u1} составляло 0.27. Согласно зависимости R_{ch} от Ri_{u1} и $(\sigma_{wj})_a(x)$, чем больше

устойчивость плотностного потока в створе II, тем слабее перемешивание вод на верхней границе этого течения с придонными и тем эффективнее выравнивание концентраций хлорофилла-а над плотностным потоком под влиянием струй.

Заклучение

1. Установлено, что обнаруженная система стратифицированных течений над сложным рельефом дна включает придонный плотностный, промежуточные струйные и стоково-дрейфовый потоки.

2. Показано, что распределения скорости потоков, входящих в систему, согласуются с построенными по модели, модифицированной в настоящей работе. Модификация включает зависимости, определяющие: а) траектории и толщины внутренних струй; б) функцию вовлечения для придонного потока и скорость на его верхней границе; в) скорость стоково-дрейфового течения; г) связь скоростей придонного и струйного потоков.

3. Установлено, что усиление вертикального обмена в промежуточных струях приводит к выравниванию концентраций хлорофилла-а в зоне действия этих течений и таким образом способствует обогащению глубинных вод питательными веществами.

4. Проверена модель для расчета продольного распределения концентрации кислорода в придонном потоке. Получена зависимость концентрации хлорофилла-а на верхней границе потока от коэффициента обмена.

Авторы выражают благодарность академику РАН О. Ф. Васильеву и сотрудникам лаборатории водной экологии ИВЭП СО РАН В. В. Кириллову, Е. Ю. Митрофановой и С. О. Власову за помощь в проведении исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 08-05-00574).

Список литературы

1. *Michioku K.* Hydrodynamics in lakes and reservoirs. Res. & practice in hydraulic engineering in Japan // Spec. Iss. of JHNE. SI-1. 1993. N 9. P. 17.
2. *Cesare G. de, Boillat J.L.* Intrusive and bottom density currents and induced vertical exchanges in a stratified lake // XXX IAHR Congress. Auth. Thessaloniki. Greece. 24–29 August 2003. V. 1. Theme. C. P. 381.
3. *Самолубов Б. И.* Плотностные течения и диффузия примесей. М., 2007.
4. *Селегей В.В., Селегей Т.С.* Телецкое озеро. Л., 1978.
5. *Samolyubov B.I., Kirillov W.W.* // Int. Conf. «Fluxes and structures in fluids». Moscow, 2005. Abstr. P. 96.
6. *Michioku K., Tsujimoto G., Miyamoto H.* // Proc. Chine–Japan Bilateral. Simp. on Fluid Mech. and Manag. Tools for Environ. Beijing, 1994. 11. 19. P. 96.
7. *Самолубов Б.И., Тимошина А.Н.* Транспорт минерального фосфора придонным плотностным течением. Физические проблемы экологии. М., 2007. № 14. С. 281.
8. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М., 1973.
9. *Анисимова Е.П., Петров В.В., Сперанская А.А.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1992. № 5. С. 63.

The system of currents above the complex bottom relief and its influence on the transfer of admixtures

B. I. Samolyubov^{1,a}, T. V. Kirillova^{2,b}

¹ *Department of Sea and Inland Water Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

² *Institute of Water and Environmental Problems, Siberian Division of Russian Academy of Sciences, Molodezhnaya st. 1, Barnaul 656099, Russia.*

E-mail: ^a samolyubov@phys.msu.ru, ^b vkirillov@iwep.asu.ru.

The results of natural and theoretical investigations of the fields of the current velocity and water composition parameters in the system of stratified currents above the complex bottom relief are introduced. There were obtained and verified current velocity distributions taking into account all flows included in the system. There were revealed the dependences of the distributions of the concentration of diluted oxygen and chlorophyll-a upon the parameters of the jet and of the near-bottom density current.

Keywords: stratified currents, energy exchange, turbulent exchange intensity, turbulent entrainment, near-bottom density flows, jet-type and flow-drift currents, transport of admixtures, stability of currents.

PACS: 92.40.qj.

Received 26 November 2009.

English version: *Moscow University Physics Bulletin 2(2010).*

Сведения об авторах

1. Самолубов Борис Исаевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотр.; тел.: (495) 939-10-46, e-mail: samolyubov@phys.msu.ru.
2. Кириллова Татьяна Владимировна — канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; тел.: (3852) 36-46-81, e-mail: vkirillov@iwep.asu.ru.