

Эволюция системы стратифицированных течений при апвеллинге

Е.С. Барбанова*

*Московский Государственный Университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики моря и вод суши. Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

(Статья поступила 12.05.2012; Подписана в печать 13.06.2012)

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований эволюции системы течений, включающей прибрежный апвеллинг, волновые течения сейшевой природы и плотностные потоки в Волховской губе Ладожского озера. Обнаружено, что в придонном слое преобладало придонное стратифицированное течение, вызванное прибрежным апвеллингом. Установлено, что апвеллинг обеспечивал очищение вод губы при умеренном ветре. Выявлена блокировка затопленной струи речных вод апвеллингом. Показано, что в ходе этого процесса происходил подъем струи и её утолщение при росте скорости и высоты придонного потока. Предложена версия математической модели обнаруженной системы течений, замкнутая с применением полумпирических выражений высоты апвеллинга, траектории и толщины струи.

PACS: 92.10.Lq, 92.10.Wa, 92.40.-t, 92.40.Ni. УДК: 556.556:532.5

Ключевые слова: стратифицированные течения, апвеллинг, энерго- и массообмен, перенос примесей, гидродинамическая устойчивость.

ВВЕДЕНИЕ

Роль течений, обусловленных апвеллингом, в динамике озер и морей не ограничивается подъемом глубинных вод [1, 2]. При наличии движений вод иной природы влияние апвеллинговых потоков приводит к формированию систем стратифицированных течений, прогноз развития которых возможен лишь с учетом их взаимодействия. Изучение таких явлений направлено на решение как фундаментальных, так и прикладных задач, поскольку подобные системы течений могут существенно влиять на распределения примесей в водоемах и на развитие водных экосистем. Под системой стратифицированных течений понимается совокупность течений, развивающихся на различных глубинах от поверхности до дна и взаимодействующих между собой.

В настоящей работе приведены и сопоставлены с теоретическими распределения параметров течений и состава воды по глубине и во времени, измеренные в натуральных условиях. Рассмотрены выявленные закономерности пространственно-временных преобразований профилей этих характеристик. Анализируемые результаты, по которым проверяются методы математического моделирования течений и переноса примесей, получены при участии автора в комплексных измерениях скорости течения, температуры воды, концентраций взвеси и растворенных солей и состава воды в Волховской губе Ладожского озера 13-18 августа 2011 года. Исследования проводились с применением многопараметрического зонда RCM-9 (Aanderaa) и других измерителей указанных параметров. Выполнялась плановая съемка по всей акватории юго-

восточной части залива (по 16 вертикалям) и проводились многочасовые серии комплексных последовательных зондирований на двух суточных станциях.

1. СТРУКТУРЫ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ, ТЕМПЕРАТУРЫ, КОНЦЕНТРАЦИЙ ВЗВЕСИ И РАСТВОРЕННЫХ СОЛЕЙ

Распределения температуры воды и концентраций взвеси на разрезе от приустьевой зоны р. Волхов в открытое озеро имеют вид, типичный для прибрежного апвеллинга. К характерным элементам относятся: а) подъем более прозрачных и холодных озерных вод вверх по склону, б) изотермы фронтальной формы в головной части апвеллинга.

Концентрация взвеси убывает по мере удаления от зоны впадения речного потока в залив и снижается почти на порядок в апвеллинге, четко отражая контуры его фронтальной части.

По профилям скорости U и изменения плотности $\delta\rho$ от поверхности с глубиной можно выделить основные этапы трансформации полей скорости и плотности воды в ходе развития затопленной стратифицированной струи речных вод и апвеллинга (рис. 2). На начальном участке распространения струи вод р. Волхов прослеживается явно выраженный максимум скорости струи на глубинах от 3 до 7 м (рис. 2, а). В сформировавшейся струе заметно ее утолщение за счет турбулентного обмена с окружающими водами и ускорение (рис. 2, б).

В области затухания струи наблюдается уменьшение скорости и толщины течения, что может быть связано не только со снижением интенсивности обмена, но и с растеканием (расширением) струи на холодном жидком грунте, который сформирован апвеллингом, восходящем по склону. Максимум скорости апвеллинга располагается в интервале 1 – 3 м над уровнем дна.

*E-mail: lera117@yandex.ru

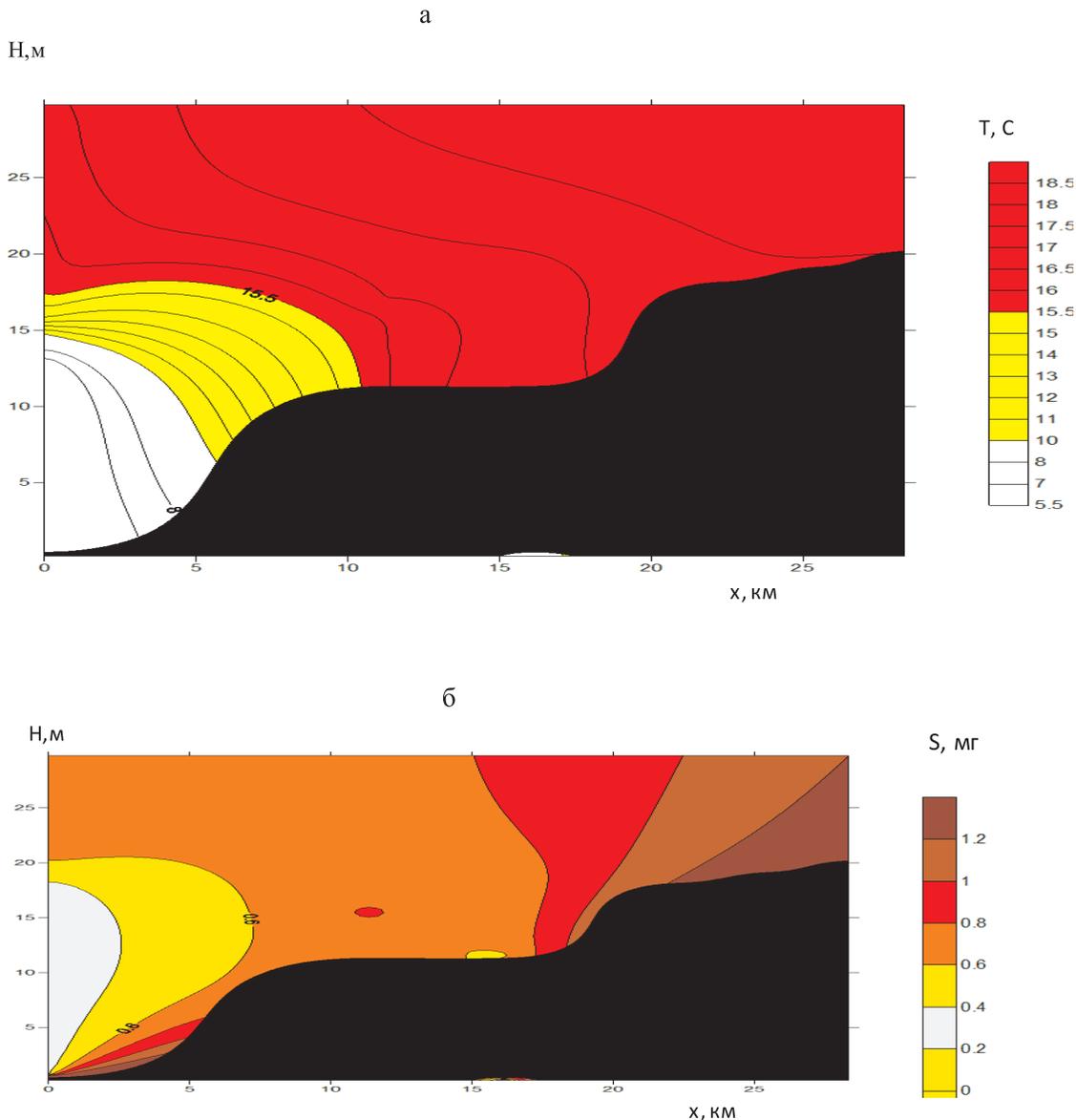


Рис. 1: Распределения по глубине и вдоль по разрезу на линии максимальных глубин Волховской губы: а — температура воды и б — концентрация взвеси

Верхняя граница апвеллингового течения практически совпадает с положением термоклина. Интегральные числа Ричардсона (1) для апвеллинга и струи в указанных зонах ее формирования, развития и затухания составляли соответственно а) $Ri_j=0,4$, $Ri_u=3,3$ (апвеллинг), б) $Ri_j=3$, $Ri_u=1,5$ и в) $Ri_j=25$ $Ri_u=23$.

$$Ri_u = g\overline{\Delta\rho}z_u / \rho\overline{U}^2 \quad \text{и} \quad Ri_j = g\overline{\Delta\rho}_j\Delta z_j / \rho\overline{U}_j^2 \quad (1)$$

Здесь g — ускорение свободного падения, z — толщина потока, $\overline{\Delta\rho}$ — разность плотностей вод в потоке и над ним, \overline{U} — скорость течения, средняя по вертикали; $\overline{\Delta\rho}_j$ — разность плотностей вод в струе и над ней, Δz_j и \overline{U}_j — толщина и средняя скорость струи. Числа Ричардсона для струи растут по мере ее про-

движения к открытому озеру (к выходу из губы). Для апвеллинга имеет место минимум числа Ричардсона на промежуточной вертикали (рис. 2 б), которая располагается на участке с нулевым уклоном дна (рис. 1). Этот минимум обусловлен локальным ускорением течения за счет отсутствия тормозящей тангенциальной составляющей силы тяжести.

2. ЭВОЛЮЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ И ПАРАМЕТРОВ СОСТАВА ВОДЫ

Измерения велись на двух станциях, расположенных вблизи выхода из губы в открытое озеро в цен-

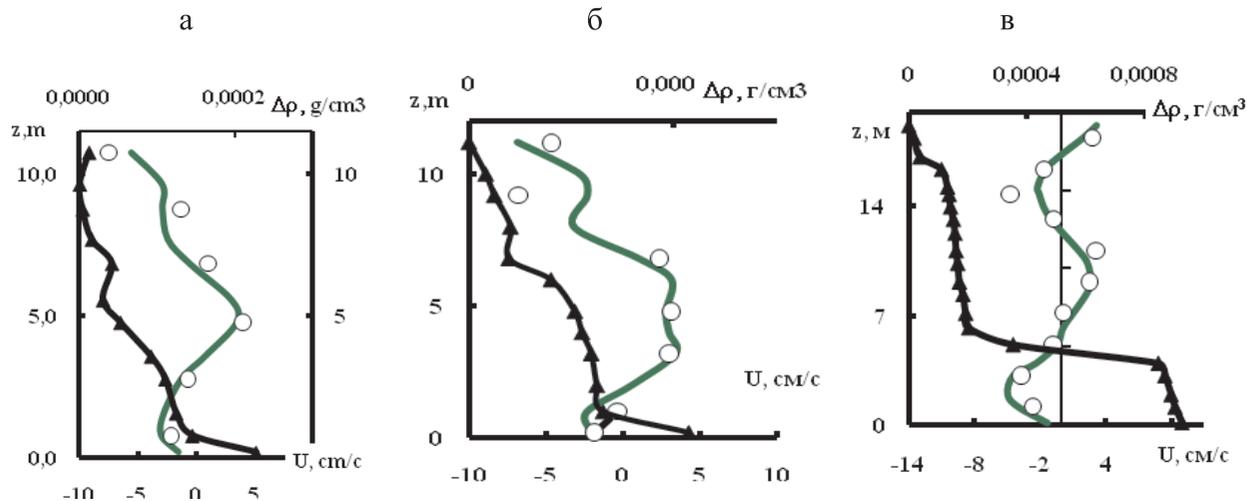


Рис. 2: Профили скорости U (o) и изменение плотности (Δ) с глубиной $\delta\rho$: а) на начальном участке затопленной струи вод р. Волхов; б) в зоне сформировавшейся струи и в) в области её затухания

тре восточной части залива. В период исследований преобладал западный ветер со скоростью 5 – 10 м/с. Первая серия зондирований выполнялась 15.08.2011 г. в точке с глубиной 18 м. На фоне возмущений вихреволновой природы в поле скорости течения (рис. 3 б) наблюдается преобладающее течение из открытого озера в Волховскую губу в придонном слое $z \leq 10$ м. В этой области, толщина которой убывает во времени, имеет место зона холодных вод, ярко выраженная в поле температуры (рис 1, а). На верхней границе холодного слоя развиваются колебания изотерм в противофазе, характерные для второй моды внутренней волны (при $t = 14 - 22$ ч). Такая структура, типичная для апвеллинга вод открытого озера в залив, подтверждается также и распределением концентрации взвеси (рис. 3, в). На этом распределении области холодных вод соответствует зона повышенной прозрачности. Формирование апвеллинга обычно вызвано соответствующим направлением ветра либо с берега в сторону открытого озера, либо вдоль берега, и меняется во времени. В первой половине серии зондирований холодные прозрачные апвеллинговые воды проникают почти до открытой поверхности. По мере ослабления апвеллинга верхняя граница этих вод приближается к дну.

Во фронтальной части апвеллинга при $t = 2 - 8$ ч. зарегистрировано повышение концентрации взвеси, которая по-видимому имеет речное происхождение, так как главным источником поступления взвеси в губу является река Волхов. Воды р. Волхов отличаются по составу от озерных не только присутствием естественных примесей, но и техногенных взвешенных и растворенных веществ [3, 6]. По этой причине зарегистрированный процесс апвеллинга обеспечивает очищение вод губы. В моменты повышения скорости течения как в зоне придонного апвеллинга, так и в приповерхностном слое за счет усиления ветра

происходит снижение гидродинамической устойчивости и «прорыв» вод из придонного слоя в приповерхностный. Такой вихреволновой процесс отмечен при $t = 6 - 14$ ч. Квазипериодические изменения скорости течения по глубине и во времени, которые наблюдаются на рис. 3, б во всей толще воды от поверхности до дна на фоне представленного основного распределения скорости связаны с развитием внутренних волн сейшевой природы.

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АПВЕЛЛИНГА И РЕЧНОЙ СТРУИ

За основу при моделировании взяты уравнения Рейнольдса в приближениях квазистационарности и в рамках плоской задачи и уравнение неразрывности (2):

$$\begin{cases} U \frac{\partial U}{\partial x} + W \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{\Delta\rho}{\rho} g i_s - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial z}, \\ 0 = -\Delta\rho g - \frac{\partial P}{\partial z}, \\ \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Ось x направлена по склону, а ордината z – к открытой поверхности; ρ, U, W – средние значения плотности жидкости, продольной и вертикальной компонент скорости; P – давление; τ – турбулентное напряжение; $i_s \ll 1$ – уклон дна, g – ускорение свободного падения. Для расчета плотности воды применялось уравнение состояния воды из [10] для диапазонов $T = 0 - 30^\circ \text{C}$, $P = 0 - 180$ бар (при глубинах до 1800 м). С учетом дополнения к плотности за счет вклада взвеси это уравнение имеет вид $\rho^P = \rho^0 (1 - P/K)^{-1}$, где $\rho^0 = \rho^0(T, C_{dil}) + (\Delta\rho_s/\rho_s) \cdot S$ – плотность воды с учетом ее сжимаемости, как функция параметров состояния T, K, S, P , ρ^0 – плотность

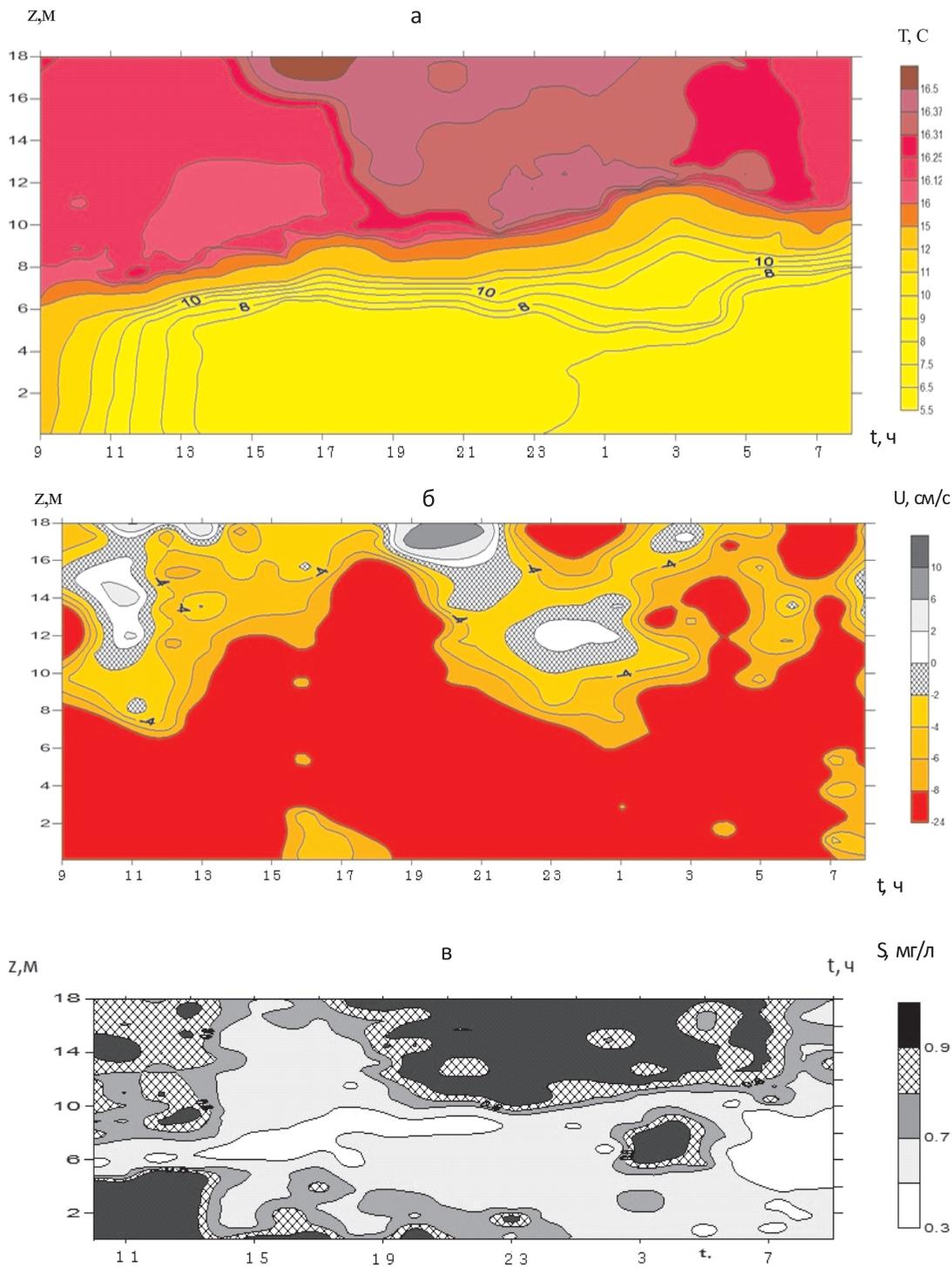


Рис. 3: Распределения по высоте над уровнем дна и во времени: *a* — температура воды; *б* — скорость течения и *в* — концентрация взвеси

при давлении P , равном его значению на поверхности воды; ρ_s — плотность материала взвеси, $\Delta\rho_s = \rho_s - \rho_w$, ρ_w — плотность воды без твердой примеси, C_{dil} — электропроводность, S — концентрация взвеси и $K = K(T, P, C_{dil})$ — эмпирические функции аргументов T, S, P (полиномы 6-го и 4-го порядков), вид

которых не представлен здесь во избежание перегрузки текста.

После интегрирования по вертикали от нижней до верхней границы течения из системы (2), с учетом преобразований, приведенных в [3, 4], получается одномерное уравнение динамики придонного потока вы-

сотой z_u в виде

$$\partial_x \bar{U}^2 = g \frac{2\Delta\bar{\rho}}{\rho} \cdot i_s - \alpha_p \frac{2g}{z_u \rho} \partial_x \left(\bar{\rho} \cdot \frac{z_u^2}{2} \right) - g i_{surf} - \frac{C_D \bar{U}^2}{z_u}. \quad (3)$$

Обозначения с чертой сверху относятся к средним по высоте z_u . Помимо параметров упоминавшихся выше, уравнение включает разность плотностей воды в потоке и над ним $\Delta\bar{\rho}$, коэффициент сопротивления на границе поток-дно C_D и уклон поверхности воды i_{surf} . Аналогичное уравнение получается для речной струи с некоторой коррекцией обозначений [3]. Решение этого уравнения невозможно без выражений толщины придонного потока (апвеллинга) z_u и ординаты осевой линии (траектории) струи z_{mj} , полученных в ходе данной работы, а также без уравнения, учитывающего уклон поверхности воды i_{surf} [11]. Выражения, применяющиеся совместно с приведенным уравнением для получения замкнутой системы уравнений имеют вид (4):

$$\begin{cases} i_{surf} = \tau_x / \rho g H, \\ C_D = 2,5 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 10^{-4} R i_u, \\ z_u = z_{therm}, \\ \Delta z_j = \Delta z_{j0} + 0,4 \cdot \int_0^x i_{sj} dx, \\ z_{mj} = (z_{mj})_0 \exp(U_{upw} / 2 (U_{upw})_0). \end{cases} \quad (4)$$

где U_{upw} — скорость апвеллинга, z_{mj} — траектория струи.

Третье и пятое полуэмпирические выражения системы получены в ходе работы. Входными параметрами модели являются уклон дна, начальная скорость течения и распределение плотности (скорость ветра использовалась при разработке математической модели и при анализе данных, вместе с направлением

ветра), в результате расчетов получается распределение скорости, высота максимума скорости апвеллинга, толщина струи и её траектория.

Экспериментальные точки и теоретические распределения скоростей струи и апвеллинга удовлетворительно согласуются (рис. 4). Пунктиром отмечены границы стандартного отклонения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обнаружено, что в придонном слое преобладал апвеллинг в виде холодного потока к верховьям залива.
2. Выявлена вихреволновая компонента скорости апвеллинга, которая усиливалась за его фронтальной зоной и приводила к появлению прозрачных линз
3. Установлено, что зарегистрированный процесс апвеллинга обеспечивал очищение вод губы при умеренном ветре.
4. Установлено, что апвеллинг приводил к блокировке затопленной струи речных вод, к подъему и к утолщению струи при росте скорости и высоты придонного потока.
5. Предложена версия математической модели обнаруженной системы течений, замкнутая с применением полуэмпирических выражений высоты апвеллинга, траектории и толщины струи.

Автор выражает благодарность доктору физ.-мат. наук, профессору Б. И. Самолюбову за постоянную помощь в работе на всех этапах её выполнения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-05-01146).

[1] Lorke A., Peeters F. *Wuest A.*. Limnology and Oceanography. **50**, N. 2. (2005).
 [2] *Голенко М. Н.* Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. Вып. 1. С. 35. (2009).
 [3] *Самолюбов Б. И.* Придонные стратифицированные течения. (М.: Научн. мир, 1999).
 [4] *Самолюбов Б. И.* Плотностные течения и диффузия примесей. (М.: Изд. ЛКИ, 2007).
 [5] *Астраханцев Г. П., Менишуткин В. В., Петрова Н. А., Руховец Л. А.* Моделирование экосистем больших стратифицированных озер. (СПб.: Наука, 2003).
 [6] *Науменко М. А., Авинский В. А., Барбашова М. А. и*

др. Экол. химия. (2000).
 [7] *Niebauer H. J., Ragotzkie T. G and R. A.* Journal of physical oceanography. **7**, November. P. 918 (1977).
 [8] *Blanton J. O.* Journal of physical oceanography. **5**, January. P. 111. (1975).
 [9] *Smith N. P.* Journal of physical oceanography. **13**, September. P. 1709 (1983). 1709.
 [10] *Chen C. T. A., Millero F. J.* Limnology and Oceanography. **31**, N. 3. P. 657. (1986).
 [11] *Garvine R. W.* Journal of physical oceanography. **1**, July. P. 169 (1971).

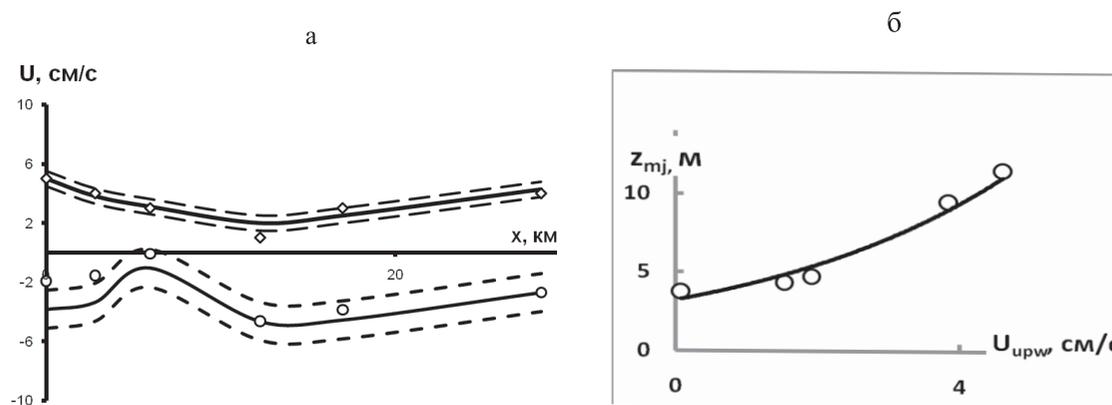


Рис. 4: Зависимости: а — скоростей струи и апвеллинга от расстояния вдоль по разрезу; б — траектории струи от скорости апвеллинга

Evolution of stratified currents system during upwelling

E. S. Barbanova

*Marine Physics and Land Water department, Faculty of Physics,
 M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.
 E-mail: lera117@yandex.ru*

The paper presents experimental results and results of theoretical studies of evolution of stratified currents system, which includes upwelling-induced currents, seiche-induced wave currents and density currents in Volkhov bay, Lake Ladoga. It was discovered that in the near bottom layer coastal upwelling prevails. It was found that upwelling provides bay's water purification in a moderate breeze. Blocking of submerged jet of river water by upwelling was discovered. It was shown that during this process jet rise and jet thickening took place, given that the speed increased and the height of bottom current also increased. The version of mathematical model of discovered currents system was suggested, being represented as a determined system, using semi-empirical expression for upwelling height, trajectory and thickness of a jet.

PACS: 92.00.00.

Keywords: stratified currents, energy exchange, mass exchange, impurity transfer, hydrodynamic stability.

Received 12 May 2012.

Сведения об авторах

Барбанова Елена Сергеевна — студентка; e-mail: lera117@yandex.ru.