

ГЕОФИЗИКА

УДК 532.529.2:551.481.1

**ВЛИЯНИЕ ВЕТРА НА ДИНАМИКУ РАЗВИТИЯ ТЕРМОБАРА
В ПЕРИОД ВЕСЕННЕГО ПРОГРЕВА ВОДОЕМА****Н. С. Блохина, Д. А. Соловьев***(кафедра физики моря и вод суши)*

E-mail: blokhina@phys.msu.ru

На основе нелинейной системы уравнений термогидродинамики в приближении Буссинеска построена математическая модель динамики развития термобара. Особое внимание уделяется исследованию влияния ветра различной силы и направления на термогидродинамические процессы в пресных водоемах в весенний период.

Весной, после таяния льда, температура поверхностных вод в озерах меньше температуры максимальной плотности ($T_m = 4^\circ\text{C}$). Весенний прогрев водоема приводит к тому, что прибрежные поверхностные воды быстрее нагреваются и достигают температуры 4°C . Более теплые и наиболее плотные прибрежные воды опускаются до дна, образуя фронтальный раздел с температурой 4°C от поверхности до дна. Этот фронтальный раздел называется термобаром. Слева и справа от термобара образуются две циркуляционные ячейки с зоной схождения воды около изотермы 4°C (рис. 1). Этот фронтальный раздел препятствует горизонтальному перемешиванию вод между двумя циркуляционными ячейками и проникновению прибрежных вод в центральную часть водоема. По мере прогрева водоема термический бар смещается к центру и исчезает, когда температура всей акватории водоема становится больше 4°C . Подобное явление наблюдается и осенью, когда температура воды на поверхности понижается до 4°C . В крупных озерах термический бар может существовать в течение нескольких месяцев, что сказывается на термогидродинамическом режиме водоемов.

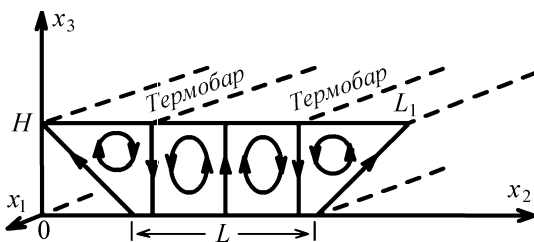


Рис. 1. Схематическое представление течений в моделируемом водоеме. H — глубина водоема, L — ширина по дну, L_1 — ширина по поверхности

Начиная с 1950-х годов, после открытия явления термобара на Ладожском озере А. И. Тихомировым [1] появились работы по изучению термобара в природных условиях, лабораторному и теоретическому исследованию этого явления. На основе этих исследований построено несколько математических моделей, описывающих термогидродинами-

ческие процессы в водоемах в период существования в них термобара и динамику его развития. Однако в этих работах не уделяется достаточного внимания исследованию влиянию силы Кориолиса на динамику развития термобара в больших озерах, которая изменяет скоростной режим течений, тем самым оказывая влияние на продолжительность существования термобара. Также в большинстве работ не проводится детальный анализ влияния метеорологических условий на картину течений и термическое состояние водоема в период весеннего прогрева.

Авторами построена математическая модель термогидродинамических процессов в пресном водоеме в период существования в нем термобара с учетом силы Кориолиса и таких метеорологических условий, как скорость и направление ветра, температура и абсолютная влажность воздуха [2–5]. В настоящей работе основное внимание уделено изучению влияния ветра на условия развития термобара.

В работе рассматривается движение жидкости в области, представленной на рис. 1 в системе координат $Ox_1x_2x_3$. Считается, что задача однородна по координате Ox_1 . Для описания термогидродинамических процессов в вязкой несжимаемой жидкости используется система уравнений, включающая уравнения Навье–Стокса в приближении Буссинеска, неразрывности, теплопроводности и состояния для пресной воды:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} &= \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} + \\ &+ g\gamma(T - T_m)^2 \delta_{i3} - 2\Omega(U_1 \delta_{i2} - U_2 \delta_{i1}) \sin \alpha, \\ \frac{\partial U_i}{\partial x_i} &= 0, \\ \frac{\partial T}{\partial t} + U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} &= \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x_j \partial x_j}, \\ \rho(T) &= \rho_0 (1 - \gamma(T - 4^\circ\text{C})^2). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $U_i(x_1, x_2, x_3, t)$ — компоненты вектора скорости ($i = 1, 2, 3$), T — температура, P — давление,

ρ — плотность воды, ρ_0 — плотность воды при $T_m = 4^\circ\text{C}$, ν и λ — соответственно коэффициенты молекулярной вязкости и теплопроводности, α — географическая широта, δ_{ij} — символ Кронекера, $\gamma = 0.000085$ град $^{-2}$.

Ниже приведены граничные условия, используемые при решении системы (1).

На дне водоема ($x_3 = 0$), правой и левой наклонных границах задаются условие прилипания и непроницаемости ($U_1 = U_2 = U_3 = 0$) для скорости и условие отсутствия потоков тепла для температуры.

На верхней границе ($x_3 = H$) задаются следующие условия:

$$\rho\nu\frac{\partial U_2}{\partial x_3} = \tau_{w2}, \quad \rho\nu\frac{\partial U_1}{\partial x_3} = \tau_{w1}, \quad U_3 = 0$$

для скорости;

$$-c_0\rho\lambda\frac{\partial T}{\partial x_3} = Q$$

для температуры. Здесь $Q = Q_R + Q_T + Q_L$, где Q_R — постоянный по времени и акватории водоема радиационный поток тепла, $Q_T = \rho_a c_p C_T (T - T_{\text{air}}) V$ — поток явного тепла, $Q_L = LC_q (q - q_{\text{air}}) V$ — поток скрытого тепла, $\tau_{wi} = C_u \rho_a (V_i)^2$ и V_i ($i = 1, 2$) — напряжение трения и скорость ветра вдоль соответствующих координат, ρ_a — плотность воздуха, C_u — коэффициент сопротивления, $V = \sqrt{V_1^2 + V_2^2}$ — скорость ветра над водной поверхностью, c_0 — теплоемкость воды, c_p — теплоемкость воздуха при постоянном давлении, C_T и C_q — коэффициенты Стентона и Дальтона для переноса тепла и влаги соответственно, L — скрытая теплота парообразования, T_{air} и q_{air} — температура и удельная влажность воздуха, T и q — температура поверхности воды и удельная влажность вблизи ее поверхности.

После соответствующих преобразований, подробно описанных в работе [6], из (1) окончательно получим в безразмерном виде в переменных функции тока ψ и вихря ϕ систему уравнений

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial x_3} \frac{\partial U_1}{\partial x_2} - \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \frac{\partial U_1}{\partial x_3} - 2 \frac{\partial \psi}{\partial x_3} \Omega \sin \alpha = \mu \left(\frac{\partial^2 U_1}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 U_1}{\partial x_3^2} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \left(\frac{\partial \psi}{\partial x_3} \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} - \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \frac{\partial \varphi}{\partial x_3} \right) + 2 \frac{\partial U_1}{\partial x_3} \Omega \sin \alpha = \mu \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_3^2} \right) - 2(T - T_m^*) \frac{\partial T}{\partial x_2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \left(\frac{\partial \psi}{\partial x_3} \frac{\partial T}{\partial x_2} - \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_3^2} \right), \quad (4)$$

$$\Delta \psi = \varphi, \quad U_2 = \frac{\partial \psi}{\partial x_3}, \quad U_3 = -\frac{\partial \psi}{\partial x_2} \quad (5)$$

с уравнением замыкания

$$\mu^2 = \frac{c^3}{s} \int_S \left[4 \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_2 \partial x_3} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_2^2} \right)^2 - (T - T_m^*) \frac{\partial T}{\partial x_3} \right] ds, \quad (6)$$

где $\mu = \nu_T / (H \sqrt{gH})$ и T_m^* — безразмерные коэффициент турбулентной вязкости и температура максимальной плотности пресной воды, ν_T — размерный коэффициент турбулентной вязкости, S — площадь всей области моделируемого водоема, c — эмпирическая константа, H — глубина водоема (характерный линейный размер крупномасштабных образований).

В качестве масштаба приняты: для расстояний x_i — глубина водоема H , температуры T — $\sqrt{1/\gamma}$, скоростей U_i, V — \sqrt{gH} , времени t — $\sqrt{H/g}$ ($i = 1, 2, 3$).

В начальный момент времени температура на поверхности водоема изменяется по линейному закону от 0°C в центре до 3.9°C у берега. На дне водоема задается температура максимальной плотности. На наклонных боковых границах температура изменялась по линейному закону от температуры дна до 3.9°C , а внутри рассматриваемой области — от температуры дна до значения температуры на верхней границе на данной вертикали. Считалось, что движение в водоеме в начальный момент времени отсутствует.

Уравнения (2)–(6) вместе с граничными и начальными условиями образуют замкнутую систему для моделирования термогидродинамических процессов в водоеме заданного размера. Решение этой системы уравнений реализуется на ЭВМ с помощью численного метода чередующихся направлений (неявная схема) [7].

Рассматривался водоем в Северном полушарии Земли на географической широте $\alpha = 60^\circ$. Ширина моделируемого водоема $L_1 = 3000$ км, а максимальная глубина $H = 50$ м. Поток тепла, поступающий на верхнюю границу водоема от Солнца $Q_R = 210$ Вт/м 2 . Температура $T_{\text{air}} = 10^\circ\text{C}$ и относительная влажность воздуха $q_{\text{air}} = 80\%$ соответственно.

Опишем динамику развития термического бара. На рис. 2 представлены поля распределения температуры T (а) и функции тока ψ (б) с шагом по времени $t = 95$ ч после начала прогрева водоема. После достижения поверхностных вод у берегов температуры максимальной плотности в водоеме зарождаются два термобара у правого и левого берегов (рис. 2, t_1). По мере прогрева водоема термобары перемещаются к центру водоема (рис. 2, t_1 – t_4). Через 400 ч непрерывного прогрева температура всей акватории

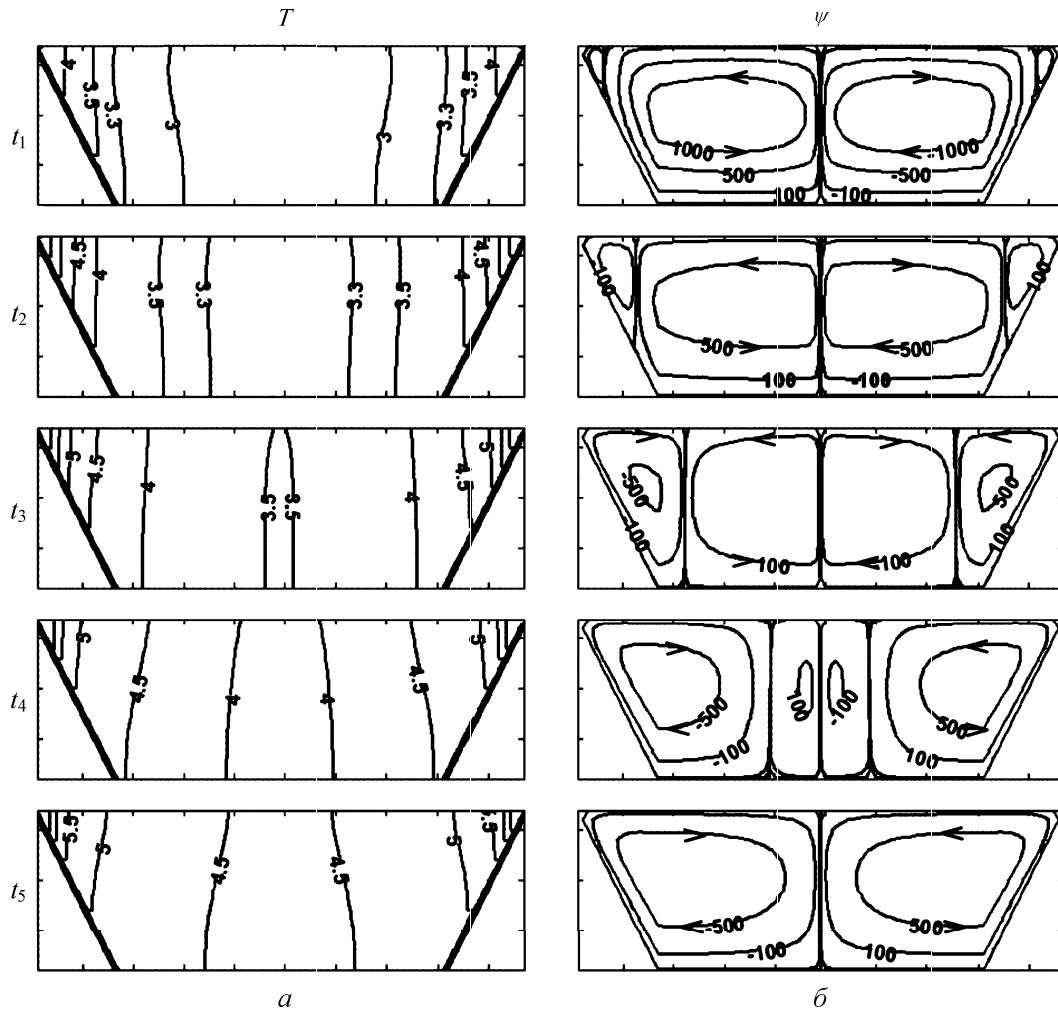


Рис. 2. Поля распределения температуры T (а) и функции тока ψ (б) в плоскости (x_2, x_3) с шагом по времени $t = 95$ ч. Полю t_1 соответствуют результаты, полученные через 20 ч после начала счета

водоема становится больше температуры максимальной плотности, и область опускания водных масс с температурой 4°C от поверхности до дна исчезает (рис. 2, t_5).

По мере прогрева поверхностных вод и продвижения термобара к центру озера около берегов прибрежные циркуляционные ячейки увеличиваются в размере, подавляя циркуляционные структуры в центральной части водоема. Если в начальной стадии зарождения термобара (рис. 2, t_1) вода опускалась в районе изотермы 4°C , а поднималась в центре водоема, образуя две большие центральные циркуляционные ячейки, охватывающие большую часть водоема, то после прохождения термобара картина движения жидкости меняется. Две циркуляционные структуры охватывают весь водоем, образуя зону конвергенции в его центре (рис. 2, t_5).

Таким образом, в начальной стадии развития термобара в центре на поверхность водоема поднимаются придонные воды, а после его исчезновения — опускаются поверхностные. Средняя скорость распространения термобара составила 3.75 м/ч. Оценка средних скоростей циркуляционных течений во время существования термобара показала, что вер-

тикальная скорость равна 18 м/ч, а средняя горизонтальная скорость — 54 м/ч. Полученные характеристики близки к данным натурных наблюдений [8].

Проведем анализ влияния ветра различной силы и направления на динамику развития термобара.

На рис. 3 представлены поля распределений функции тока ψ и температуры T в момент времени 230 ч после начала прогрева водоема при скоростях ветра $V = 2, 4, 6$ м/с, направленного к правому (а) и левому (б) берегам. Ветер действовал в течение последних 4 ч. Направление ветра указано стрелками в верхней части рисунка.

Воздействие ветра на поверхность водоема существенно меняет картину течений. Обращает на себя внимание, то, что для слабого ветра (до $V = 2$ м/с) в правой и левой частях водоема наблюдается термобар, с обеих сторон которого возникают циркуляционные структуры. При этом антициклонические циркуляционные структуры, вращающиеся по часовой стрелке в случае а более развиты, чем циклонические (в случае б наоборот). При скорости ветра 4 м/с происходит объединение циркуляционных ячеек, для которых направление течения на поверхности совпадает с направлением действия

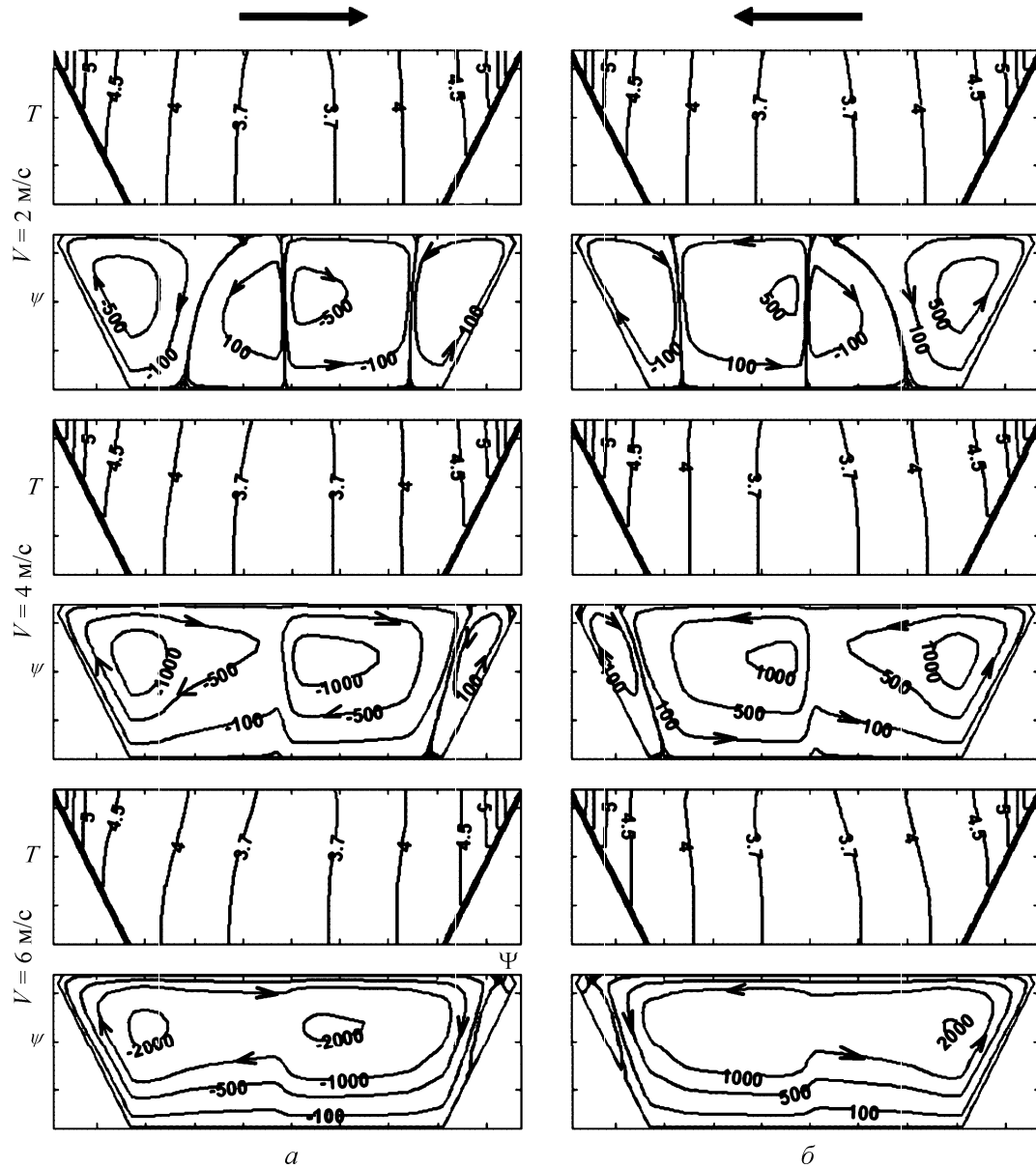


Рис. 3. Поля распределения температуры T и функции тока ψ в плоскости (x_2, x_3) при различных значениях скорости ветра V

ветра. При этом небольшая ячейка с наветренной стороны водоема около берега существует, а область опускания водных масс находится достаточно далеко от зоны расположения изотермы 4°C . При скорости ветра 6 м/с прибрежная ячейка практически исчезает, и весь водоем охватывает единая циркуляционная структура. Уже при скоростях ветра 4 м/с правый и левый столбы воды с температурой 4°C не совпадают с зоной опускания водных масс и его нельзя назвать термобаром. С увеличением скорости ветра изотерма 4°C наклоняется на поверхности в сторону действия ветра и мало изменяет свое положение на дне водоема.

Анализ результатов расчета показал, что при небольших скоростях ветра динамические процессы, связанные с неоднородным распределением плотности, преобладают над динамическими процессами, вызванными ветровым воздействием. Увеличение

скорости ветра приводит к подавлению термической конвекции и сопровождается ростом скорости циркуляции жидкости. Это следствие подтверждается зависимостью среднего числа Ричардсона Ri для всего моделируемого водоема от времени действия ветра, представленной на рис. 4.

Критерий Ричардсона определяет роль термической стратификации в вертикальном переносе энергии по сравнению с динамическими факторами, в качестве которых можно рассматривать ветровое воздействие на поверхность водоема. С увеличением скорости ветра значение числа Ричардсона приближается к нулю, что иллюстрирует преобладающее действие сил инерции над архимедовой силой. По временной зависимости числа Ричардсона можно оценить длительность времени перестройки конфигурации течений до достижения стационарной картины во всей области моделируемого водоема

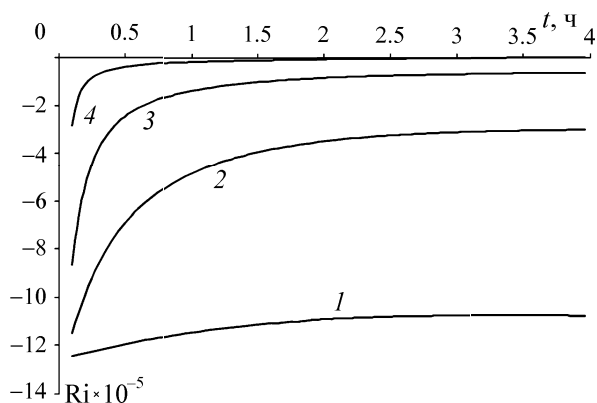


Рис. 4. Зависимость среднего числа Ричардсона Ri от времени воздействия ветра различной интенсивности. Скорость ветра: 1 — 2 м/с, 2 — 4 м/с, 3 — 6 м/с, 4 — 10 м/с

при постоянной скорости ветра. При слабом ветре перестройка и достижение стационарного режима движения воды происходят медленнее (рис. 4, кривые 1, 2) по сравнению со случаем значительных ветровых нагрузок, которые перестраивают течение за несколько минут. Этот факт иллюстрирует картина течений, представленная на рис. 3, и зависимость $Ri(t)$ (рис. 4), из которых следует, что при скорости ветра 6 м/с по истечении получаса четыре вихря (рис. 2, t_3) объединяются в один.

Из полученных результатов также следует, что динамика развития течения в водоеме зависит от направления ветра с той разницей, что подавление конвекции и исчезновение термобара происходят при различных скоростях ветра. Отметим, что в случае направления ветра вдоль фронта термобарразначения скоростей больше. В то же время при одной и той же

скорости ветра и различном его направлении наблюдается небольшая асимметрия в картинах течения (рис. 3), что, по-видимому, связано с действием силы Кориолиса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 06-05-64911).

Литература

1. Тихомиров А.И. // Изв. Всесоюз. геогр. об-ва. 1959. **91**, № 5. С. 424.
2. Блохина Н.С., Савельева О.С., Орданович А.Е. // Тр. конф. «Физические проблемы экологии (экологическая физика)». 1999. Т. 4. С. 54.
3. Блохина Н.С., Овчинникова А.В., Орданович А.Е. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2002. № 2. С. 60 (Moscow University Phys. Bull. 2002. N 2. P. 73).
4. Блохина Н.С., Орданович А.Е., Соловьев Д.А. // Тр. конф. «Физические проблемы экологии (экологическая физика)». 1999. Т. 12. С. 5.
5. Соловьев Д. А. Блохина Н.С. // Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальной науке «Ломоносов 2003». Секция Физика. М., 12–15 апр. 2003. С. 37.
6. Ковалев В.А., Орданович А.Е. Физико-математическая модель турбулентного горизонтального стратифицированного потока с учетом когерентных структур. Ч. 1. Построение модели // Деп. ВИНТИ. № 2771-81.
7. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М., 1980.
8. Тихомиров А.И. Термина крупных озер. Л., 1982.

Поступила в редакцию
25.03.05