Влияние ветра на развитие термобара и течений в небольшом водоеме в период таяния ледового покрова

Н.С. Блохина

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики моря и вод суши. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2. E-mail: blokhinans@gmail.com

Статья поступила 11.04.2013, подписана в печать 30.04.2013.

В работе с помощью математического моделирования исследуется влияние ветра на развитие термобара и сопутствующих ему течений в водоеме в период таяния ледового покрова. Рассматриваются термогидродинамические процессы в водоеме, частично покрытом льдом в центральной части. Показано, что ветровое воздействие имеет существенное влияние на структуру течений. Скорость и направление ветра определяют поведение и время жизни вихревых структур в водоеме, местоположение зоны их схождения и изотеры 4°С. Показано, что трактовка термобара как области схождения водных масс в районе изотермы 4°С неправомерна уже при небольших скоростях ветра.

Ключевые слова: математическое моделирование, термобар, температура максимальной плотности, конвекция, ветровое воздействие, ледовый покров.

УДК: 532.517, 51-73, 556. РАСS: 92.40.Су.

Введение

К числу явлений, которые оказывают существенное влияние на термогидродинамические процессы в водоемах, относится конвективное перемешивание, возникающее вследствие плотностной неустойчивости водных масс в период весеннего прогрева и осеннего охлаждения пресных водоемов и слабосоленых морей (до 24%). Эта неустойчивость связана с нагревом весной или охлаждением осенью поверхностных вод до температуры максимальной плотности (в пресных водоемах 4°C) и с образованием в этой связи фронтального раздела термобара.

Термобар (термический бар, ТБ) представляет собой узкий вертикальный фронт в водоеме от поверхности до дна с температурой воды в нем, равной температуре максимальной плотности (рис. 1). Он разделяет водоем на две зоны с разными видами вертикальной стратификации температуры, в которых наблюдаются вихревые структуры, сходящиеся в районе термобара. Термобар ограничивает обмен веществом между этими зонами, что, с одной стороны, способствует интенсивному нагреванию вод и накоплению биогенных элементов в прибрежной части озера, а с другой — препятствует распространению загрязнений из прибрежной зоны,



Рис. 1. Схематичное представление расчетной области и циркуляционных структур в водоеме в период существования в нем термобара. H — глубина водоема, L_1 и L — ширина водоема по поверхности и дну соответсвенно

влияя в целом на экологическое состояние водоема. Термобар может существовать от нескольких дней до нескольких месяцев (в зависимости от размера водоема). В связи с этим изучение термогидродинамических процессов в водоемах в период существования в них термобара представляет большой научный и практический интерес.

Современное состояние исследований этого явления характеризуется большим количеством натурных измерений, начиная с первых работ Фореля на Женевском озере [1] и Тихомирова на Ладожском озере [2], единичными лабораторными экспериментами и небольшим числом математических моделей, описывающих реальный процесс.

Во всех имеющихся теоретических работах по изучению температурных распределений и течений в водоеме в период существования в нем термобара рассматриваются случаи, когда водоем полностью свободен ото льда. К ним можно отнести ряд работ [3–10] и др.

Однако, как показано в работе [11], термогидродинамические процессы в водоеме, свободном ото льда и еще полностью от него не освободившемся в период возникновения термобара, существенно отличаются. Кроме того, воздействие ветра на водную поверхность в период формирования термобара оказывает сильное влияние на систему течений в водоеме. Влияние ветра на конвективные процессы в верхнем слое водоема исследовалось в работах [12–14]. Влиянию ветра на развитие термобара, зародившегося в водоеме, свободном ото льда, посвящены работы [4, 15–16]. Однако аналогичных работ для водоемов, в которых течения и термобар сформировались в период таяния ледового покрова, не проводилось.

В настоящей работе с помощью математического моделирования исследуются влияние ветра на развитие термобара и термогидродинамические процессы в пресном небольшом водоеме в период таяния ледового покрова. Предложенная модель является развитием модели, описанной в работах [17, 18].

Особенности температурного распределения и структуры течений в водоеме, свободном и частично покрытом льдом в момент формирования весеннего термобара

Как показано в работе [11], картина течений и температурное распределение в водоеме, частично покрытом и свободном ото льда, в момент существования термобара в прибрежной области существенно различаются. На рис. 2 представлены поля распределения температуры T и функции тока ψ для случая водоема, свободного ото льда (а) и частично покрытого льдом (б), через 8.5 ч после зарождения термобара у берега и дальнейшего прогрева водоема. На всех представленных ниже рисунках шаг сетки по вертикали равняется 0.8 м, а по горизонтали 10 м.

В случае (б) в момент начала прогрева водоема лед находился в центральной части и распространялся к берегу на 50 м. Через 8.5 ч лед полностью растаял. По рис. 2 видно, что месторасположение термобара в этих двух случаях остается одинаковым. Распределение изотерм во всей области, исключая центральную часть, схоже. Отличие лишь в их наклоне. Ближе к центру водоема (случай б) наблюдается значительный градиент температуры по горизонтали. Размер конвективных вихрей справа и слева от термобара в случаях а и б остается одинаковым. Однако во втором случае внутри антициклонического вихря, охватывающего водоем от центра до термобара, в его центральной части существует интенсивный глубинный вихрь (ГВ). Этот вихрь зародился у кромки льда и после его полного таяния занял область в 3-4 раза больше начальной длины ледового покрова. Именно этот вихрь способствует возникновению большого горизонтального градиента температуры в центре водоема, что замедляет его прогрев и перемещение термобара от берега в глубинную часть озера.

Постановка задачи

Рассматривается движение вязкой несжимаемой жидкости в области, представленной на рис. 1. Она соответствует половине водоема, симметричного относительно вертикальной оси Х₃. Водоем имеет наклонное дно. Ширина водоема по поверхности равна L_1 , а по дну водоема L. Глубина водоема равна H. Водоем вытянут вдоль фронта термобара (оси X_1). Считается, что движение жидкости описывается уравнениями гидродинамики в приближении Буссинеска, теплопроводности и неразрывности. Уравнение состояния учитывает квадратичную зависимость плотности воды от температуры в области 4°С:

$$\rho(T) = \rho_0(4^\circ \mathrm{C}) - \rho_0(4^\circ \mathrm{C}) \gamma (T - 4^\circ \mathrm{C})^2,$$

где $\gamma = 0.0000075$ град⁻², $\rho_0(4 \, {}^\circ \, \text{C})$ — плотность воды при температуре 4°С.

Над свободной поверхностью водоема вдоль оси Х₂ (перпендикулярно фронту термобара) дует постоянный по величине и направлению ветер. На границе раздела водоем-атмосфера учитывается суммарный поток тепла, состоящий из радиационного, длинноволнового, скрытого и явного потоков.

Основываясь на данных натурных наблюдений, можно предположить, что термобар распространяется к центру водоема параллельно берегу, и все термогидродинамические характеристики в этом направлении практически однородны. Это позволяет перейти к решению двухмерной задачи. Считается, что крупномасштабные конвективные структуры, возникающие справа и слева от термобара, формирются в турбулентной среде. Для выделения крупномасштабных структур в турбулентной среде система уравнения термогидродинамики преобразуется согласно методике, предложенной в работе [19]. Подробно вывод окончательной системы уравнений и уравнения замыкания дан в работах [13, 18]. При этом учитывалась однородность движения вдоль оси X1, что позволило записать исходную систему уравнений в переменных функции тока ψ и вихря φ . В безразмерном виде она примет следующий вид:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \left(\frac{\partial \psi}{\partial x_3} \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} - \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \frac{\partial \varphi}{\partial x_3}\right) = \\ = \mu \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_3^2}\right) - 2(T - T_4)\frac{\partial T}{\partial x_2}, \tag{1}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \left(\frac{\partial \psi}{\partial x_3}\frac{\partial T}{\partial x_2} - \frac{\partial \psi}{\partial x_2}\frac{\partial T}{\partial x_3}\right) = \mu \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_3^2}\right), \quad (2)$$
$$\Delta \psi = \varphi. \tag{3}$$

$$\varphi = \varphi. \tag{3}$$



Рис. 2. Поля распределения температуры T и функции тока ψ для случая водоема свободного ото льда (a) и частично покрытого льдом (б) через 8.5 ч после зарождения термобара у берега и дальнейшего прогрева водоема. Скорость ветра V = 0

Функция тока ψ введена следующим образом: $U_2 = \partial \psi / \partial x_3, U_3 = -\partial \psi / \partial x_2$ (U_2 и U_3 — скорости движения жидкости вдоль соответствующих координат).

Здесь T_4 — безразмерное значение температуры максимальной плотности пресной воды. При введении безразмерных переменных приняты: масштаб размеров $L_m = H$ — глубина водоема; скорости $V_m = \sqrt{gH}$; времени $t = \sqrt{(H/g)}$; масштаб коэффициента турбулентной вязкости $\nu_m = H \sqrt{gH}$; температуры $T_m = 1/\sqrt{\gamma}$.

Для замыкания системы уравнений и вычисления коэффициента турбулентной вязкости ν_T используется известное соотношение $\nu_T = C \varepsilon^{1/3} H^{4/3}$. Скорость диссипации турбулентной энергии ε находится из уравнения баланса турбулентной энергии. В безразмерном виде уравнение замыкания имеет следующий вид:

$$\mu^{2} = \left(\frac{\nu_{T}}{H\sqrt{gH}}\right)^{2} =$$

$$= \frac{C^{3}}{s} \int_{S} \left[4 \left(\frac{\partial^{2}\psi}{\partial x_{2} \partial x_{3}}\right)^{2} + \left(\frac{\partial^{2}\psi}{\partial x_{3}^{2}} - \frac{\partial^{2}\psi}{\partial x_{2}^{2}}\right)^{2} - (T - T_{4})\frac{\partial T}{\partial x_{3}} \right] ds, \quad (4)$$

где *s* — площадь области решения задачи, *С* — эмпирический коэффициент.

Граничные условия для системы уравнений записываются следующим образом.

На дне водоема и правой наклонной боковой границе условия прилипания и непроницаемости для скорости и отсутствия потока тепла соответственно имеют вид

$$\frac{\partial \psi}{\partial x_2} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x_3} = 0 \quad \text{M} \quad \frac{\partial \psi}{\partial n} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial n^2} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0.$$
(5)

На левой границе области задано условие симметрии для всех переменных

$$\frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \quad \psi = 0, \quad \varphi = 0.$$
 (6)

На верхней границе граничные условия примут вид

$$-\mu \frac{\partial T}{\partial x_3} = Q^b, \quad \frac{\partial \psi}{\partial x_2} = 0, \quad \varphi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} = \tau_b = \frac{C_D \rho_a V_b^2}{\rho_0 \mu}, \quad (7)$$

где $Q^b = Q/Q_1$ (в качестве масштабов потоков принята величина $Q_1 = \sqrt{\gamma}/c_o \rho_0 \sqrt{gH}$). $V_b = V/\sqrt{gH}$ — безразмерная скорость ветра, ρ_a — плотность воздуха.

Здесь поток $Q = Q_R + Q_S + Q_L + Q_{iW}$ состоит из: Q_R потока радиации, поступающего от Солнца; потоков явного и скрытого тепла [13] $Q_S = \rho_a c_p C_T (T - T_a) V$ и $Q_L = L C_q (q - q_a) V = L C_q ((1 - f) \Phi(T_a) + \frac{\partial \Phi}{\partial T} (T - T_a)) V;$ $Q_{iW} = \delta_w \sigma (T_K^4 + T) (0.39 - 0.05 (E(T_a)^* f)^{1/2}) (1 - 0.6n^2)$ потока длинноволнового излучения с поверхности воды $(T_K = 273.15 \text{ K})$, учитывающего облачность и обратную радиацию в отсутствие облаков [20, 21]. Здесь $\delta_w = 0.93$ — излучающая способность воды; $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{K}^4$ — постоянная Стефана-Больцмана; c_o — теплоемкость воды; c_p — теплоемкость воздуха при постоянном давлении; C_T и C_q — коэффициенты Стентона и Дальтона для переноса тепла и влаги, C_D — коэффициент трения; L — скрытая теплота парообразования; T_a и q_a — температура и удельная влажность воздуха; T и q — температура поверхности воды и удельная влажность вблизи ее поверхности; V — скорость ветра над поверхностью водоема; Φ — насыщающая влажность воздуха при данной температуре; E — насыщающая упругость воздуха; n — балл облачности.

Параметры задачи

В работе проведен анализ влияния ветра различной силы и направления на структуру течений в водоеме и местоположения термобара в нем. Время воздействия ветра на водную поверхность составляло t = 0.28 ч. Ледовый покров расположен в центре водоема и имеет длину 50 м и толщину 1 см. Начальные поля распределения температуры T, функции тока ψ и вихря φ соответствуют случаю, когда лед еще не растаял, но термобар и сопутствующие ему течения уже зародились в прибрежной области водоема. Эти поля близки к соответствующим распределениям на рис. 3, V = 0.

Термогидродинамические процессы рассматриваются в водоеме глубиной H = 20 м и шириной 750 м (половина водоема). Скорость ветра принимает значения: V = 1, 3, 5, 7 м/с. Направление ветра задается в двух направлениях: к берегу (рис. 3, *a*) и от берега (рис. 3, *б*). Скорость ветра, направленного от берега, при описании результатов расчетов будем писать со знаком минус. Температура атмосферы принимается равной $T_a = 8 \,^{\circ}$ С; относительная влажность воздуха f = 60%, балл облачности n = 0. Поток солнечной радиации, поступающей на поверхность водоема, равняется $Q_R = 450$ Вт/м².

Задача решается численно. Система уравнений (1)-(3), граничные условия (5)-(7), уравнение замыкания (4) записываются в конечно-разностном виде с использованием центральных разностей для аппроксимации пространственных и односторонних для временных производных. Используется явная конечно-разностная схема. Уравнение Пуассона решается методом последовательной верхней релаксации. Расчеты проводятся на сетке 26×75 .

Обсуждение результатов математического моделирования

Поток солнечной радиации, поступающий на поверхность водоема, способствовал продвижению термобара от берега к центральной его части. За время расчетов t = 0.28 ч ледовый покров в центре водоема не успел растаять. При отсутствии ветрового воздействия на поверхность воды структура течений и распределение температуры в водоеме через t = 0.28 ч представлены на рис. 3 (V = 0). В этом случае в водоеме образуются две циркуляционные ячейки, сходящиеся в районе термобара (изотермы 4°С). Прибрежная конвективная ячейка вращается против часовой стрелки, а глубинная — по часовой, внутри которой существует глубинный вихрь, вращающийся в том же направлении.

Ветровое воздействие существенно изменяет структуру течений. При ветре, направленном к берегу (рис. 3, *a*), друг другу противостоят две силы. Сила,



Рис. 3. Поля распределения температуры T и функции тока ψ для скоростей ветра V = 0, 1, 3, 5, 7 м/с: a — ветер направлен к берегу, б — ветер направлен от берега

связанная с плотностной неустойчивостью (вследствие аномальной зависимости плотности воды от температуры), приводит к образованию термобара и конвективных структур справа и слева от него. Прогрев водоема способствует перемещению термобара к центру водоема. Этой силе противодействует сила, связанная с ветровым воздействием, направленная к берегу. Как видно из рис. 3, a, при V = 1 м/с ветровое воздей-

ствие оказывает небольшое влияние на перемещение термобара и размер вихревых структур по обе стороны от него. При увеличении скорости ветра до 5 м/с прибрежный вихрь еще существует. Однако он уменьшается в размере и смещается к берегу. При V = 7 м/с он полностью исчезает. Таким образом, уже при небольших скоростях ветра, направленного к берегу (V = 3 м/с), и непродолжительном времени его воздействия на водную поверхность (t = 0.28 ч) силы, связанные с напряжением трения ветра, подавляют конвективный прибрежный вихрь. Изотерма 4°С, которая при отсутствии ветрового воздействия определяла месторасположение термобара, за это время практически не смещается к центру водоема.

При ветре, направленном от берега (рис. 3, 6), плотностная неустойчивость, способствующая перемещению термобара от берега, и ветровое воздействие оказывают влияние в одном направлении. При V = -1 м/с прибрежный вихрь увеличивается в размере по сравнению со случаями V = 0 и 1 м/с. Область опускания поверхностных вод перемещается к центру водоема. Усиление скорости ветра до V = -3 м/с способствует также увеличению прибрежного вихря. На поверхности водоема он достигает глубинного вихря (ГВ), сформировавшегося в районе ледового покрова (внутри антициклонического вихря слева от ТБ). При скоростях ветра V = -5 и -7 м/с циклонический прибрежный вихрь полностью занимает область водоема от берега до ГВ. При скорости ветра V = -7 м/с изотерма 4°С смещается на 50 м ближе к центру водоема по сравнению с ее перемещением в случае скорости ветра V = 0. Сравнение случаев V = 1 м/с (рис. 3, *a*) и V = -1 м/с (рис. 3, б) показывает, что даже небольшой по силе ветер меняет картину течений в водоеме. Образовавшиеся вихри имеют разный размер и разный наклон в области их схождения в соответствии с направлением ветра. В случае увеличения скорости ветра, направленного к берегу, антициклонический вихрь постепенно захватывает весь водоем, сохраняя при этом в центре глубинный вихрь, который постепенно становится менее интенсивным. В противном случае прибрежный циклонический вихрь постепенно увеличивается в размере и охватывает водоем до границы ГВ, который, в свою очередь, препятствует дальнейшему его распространению к центру.

Исходя из полученных расчетов была произведена оценка скорости перемещения области дивергенции водных масс V_d . На рис. 4 представлен график, отражающий эту зависимость. Если ветер направлен к берегу, то скорость перемещения области схождения вихрей практически линейно увеличивается с увеличением скорости ветра.

Если ветер направлен от берега, то наблюдается два интервала скоростей ветра, характеризующих разную



Рис. 4. Скорости перемещения области дивергенции водных масс V_d в зависимости от направления и скорости ветра V через t = 0.28 ч после начала его воздействия на водную поверхность. Отрицательные значения V соответствуют случаю, когда ветер направлен от берега

скорость перемещения области схождения вихрей. При небольших скоростях ветра порядка V = -1 м/с скорость перемещения (по модулю) области дивергенции примерно такая же, что и при положительной скорости ветра V = 1 м/с. С увеличением скорости ветра до V = -3 м/с происходит резкий скачок в скорости перемещения области дивергенции вихревых структур. Если при скорости ветра V =-1 м/с она приблизительно равна 0.02 см/с, то при V = -3 м/с она увеличивается до 0.446 см/с. Наблюдается быстрая стадия распространения прибрежной циркуляции к центру водоема и достижения им глубинного вихря, зародившегося ранее у кромки льда. После достижения прибрежным вихрем холодного глубинного вихря скорость его распространения к центру водоема резко замедляется. При увеличении скорости ветра от -3 до -7 м/с область схождения вихревых структур приближается к центру водоема всего на 30 м. Для того чтобы прибрежный вихрь быстрее вытеснял ГВ, необходим как более мощный прогрев водоема, так и более интенсивный ветер над его поверхностью. Отметим, что влияние глубинного вихря на месторасположение области дивергенции водных масс существенно сказывается лишь в случае ветра, направленного от берега (в сторону распространения изотермы 4°С).

Анализ результатов расчетов показал, что с увеличением скорости ветра область дивергенции водных масс и фронтальный раздел с температурой максимальной плотности (термобар) отстоят друг от друга на все большее расстояние. Таким образом, трактовка термобара как области схождения водных масс в районе изотермы 4°С неправомерна уже при небольших скоростях ветра.

Заключение

Показано, что ветровое воздействие имеет существенное влияние на структуру течений. Скорость и направление ветра определяют поведение и время жизни циркуляционных вихревых структур в водоеме, зону их схождения и месторасположение изотермы 4°С. При больших скоростях ветра, направленного от берега, в водоеме доминирует прибрежный циклонический вихрь, занимающий область водоема до глубинного вихря (зародившегося у кромки льда). После достижения им границы ГВ резко замедляется увеличение его размера и скорость его перемещения к центру водоема. В случае, когда скорость ветра направлена к берегу, прибрежная циркуляция постепенно вытесняется конвективным вихрем, зародившемся слева от термобара. При этом глубинный вихрь практически не влияет на картину течений. Показано, что трактовка термобара как области схождения водных масс в районе изотермы 4°С неправомерна уже при небольших скоростях ветра.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 11-05-01146-а).

Список литературы

- 1. Форель Ф.А. Руководство по озероведению (общая лимнология). СПб., 1912.
- 2. Тихомиров А.И. Термика крупных озер. Л. 1982.

- 3. Elliot G.H. // Proc. 12th Conf. Great Lakes. Res. 1971. P. 545.
- 4. Malm J. Thermal Bar Dynamics Springtime Thermoand Hydrodynamics in Large Temperate Lakes. PhD. Dissertation. Rep. 1012. Dept. of Water Resources Eng., Lund University, Sweden, 1994.
- 5. Farroy D.E. // J. Fluid Mech. 1995. 303. P. 279.
- 6. Бочаров О.Б., Овчинникова Т.Э. // Вычислительные технологии. 1996. 1, № 3. С. 21.
- 7. Квон В.И., Квон Д.В. // Вычислительные технологии. 1997.**2**, № 5. C. 46.
- 8. Цветова Е.А. // Метеорология и гидрология. 1997. № 9. C. 58.
- 9. Цыденов Б.О, Стрченко А.В. // Вестн. Томского гос. ун-та. Математика, механика. 2011. № 1. С. 120.
- 10. Farroy D.E. // Eur. J. Appl. Math. 2012. 24, N 2. P. 161.
- 11. Блохина Н.С., Орданович А.Е. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2012. № 1. С. 113. 12. Блохина Н.С., Орданович А.Е. // Метеорология и гидро-
- логия. 1992. № 3. С. 31.

- 13. Блохина Н.С., Орданович А.Е. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1994. 30, № 5. С. 686.
- 14. Блохина Н.С., Гусев А.М. // Океанология. 1988. 28, № 1. C. 65.
- 15. Блохина Н.С., Соловьев Д.А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2006. № 3. С. 59.
- 16. Соловьев Д.А., Блохина Н.С. // Океанология. 2010. 50, № 6. C. 904.
- 17. Блохина Н.С., Орданович А.Е., Савельева О.С. // Водные ресурсы. 2001. 28, № 2. С. 224.
- 18. Блохина Н.С., Овчинникова А.В., Орданович А.Е. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2002. № 2. С. 60.
- 19. Ковалев В.А., Орданович А.Е. Физико-математическая модель турбулентного горизонтального стратифицированного потока с учетом когерентных структур. Ч. 1. Построение модели. Деп. ВИНИТИ № 2771-81. М., 1981.
- 20. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. Т. 1. М., 1986.
- 21. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. Л., 1969.

The influence of wind on the development of a thermal bar and currents in a small reservoir during melting of its ice cover

N.S. Blokhina

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

E-mail: blokhinans@gmail.com.

The effect of wind on the development of a thermal bar and the accompanying currents in a reservoir during the melting of its ice cover are studied based on mathematical modeling. The thermo-hydrodynamic processes in a reservoir that is partially covered with ice in its central part are considered. The wind is shown to have a significant impact on the structure of currents. The behavior and lifetime of vortex structures in the reservoir, the location of the convergence zone, and the 4° C isotherm are determined by the velocity and direction of the wind. The interpretation of the thermal bar as an area of convergence of water masses near the isotherm of 4° C is shown to be incorrect, even at low wind velocities.

Keywords: mathematical modeling, thermal bar, temperature of maximum density, convection, wind effects, ice cover.

PACS: 92.40.Cy. Received 11 April 2013.

English version: Moscow University Physics Bulletin 4(2013).

Сведения об авторе

Блохина Наталия Сергеевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-36-98, e-mail: blokhinans@gmail.com.