

Влияние ветра на развитие термобара и течений в водоемах различной глубины 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 11.02.2015, подписана в печать 13.03.2015.

С помощью математического моделирования исследуется влияние ветра на развитие термобара и течений в водоемах различной глубины в период таяния ледового покрова. Показано, что глубина водоема, скорость и направление ветра определяют поведение и время жизни вихревых структур в водоеме (сформировавшихся по обе стороны от термобара), местоположение зоны их схождения и изотермы 4°C . Выявлены преобладающие механизмы неустойчивости водных масс в водоемах различной глубины при ветровом воздействии на их поверхность. Показано, что чем больше глубина водоема, тем при больших скоростях ветра область схождения водных масс близка к изотерме 4°C на поверхности водоема. В этой ситуации правомерна классическая трактовка термобара как области схождения воды в районе 4°C в отличие от мелких водоемов, где даже при незначительных ветрах расхождение этих зон значительно.

Ключевые слова: математическое моделирование, термобар, температура максимальной плотности, конвекция, ветер, ледовый покров, глубина водоема.

УДК: 532.517, 51-73,556. PACS: 92.40.Cy.

Введение

Особенности формирования течений и термического состояния в пресных и слабосоленых водоемах весной и осенью связаны с формированием в них термического бара. Термобар в водоеме представляет собой фронтальный раздел, где сходятся на поверхности и опускаются до дна водные массы с температурой максимальной плотности (в пресных водоемах — 4°C) (рис. 1). Весной по мере прогрева водоема термобар продвигается от берега к его центру, способствуя образованию конвективных вихревых структур по обе стороны от него и препятствуя обмену энергией и веществом между прибрежными и глубинными водами. Это сказывается как на интенсивности прогрева водоема по разные стороны от термобара, так и на распространении загрязнений в нем.

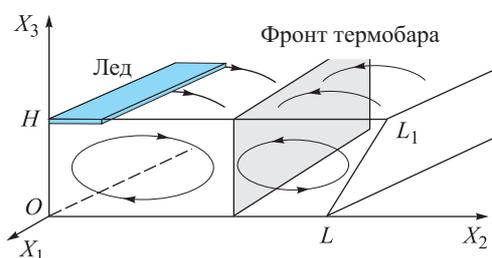


Рис. 1. Схематичное представление водоема и циркуляционных структур в нем в период существования термобара

В природных условиях термобар может развиваться при различных гидрологических и метеорологических условиях. Влияние потока солнечной радиации, температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра, ледового состояния водоема и его глубины, приток воды от втекающих в него рек

и др. — все это сказывается на времени жизни и особенностях развития термобара, а следовательно, и на термогидродинамических процессах в водоеме. Начиная с первых работ Фореля [1] и Тихомирова [2] проводилось много натурных наблюдений, были созданы лабораторные и математические модели для исследования термобара. Однако изучение влияния выше перечисленных факторов на развитие термобара проводилось лишь в единичных работах. Влияние силы Кориолиса исследовалось в работах [3–5]. В работах [6–9] описаны исследования влияния речного стока на развитие весеннего и осеннего термобара. В единичных теоретических работах [10–14] и одном лабораторном эксперименте [16] исследовалось влияние ветра на развитие термобар, влияние ледового покрова рассматривалось лишь в работах автора [12, 16], а влияние этих двух факторов в водоемах различной глубины ранее не изучалось.

В настоящей работе с помощью математического моделирования исследуется влияние ветра на термогидродинамические процессы и развитие термобара в пресных водоемах различной глубины в период таяния ледового покрова. Предложенная модель является развитием модели, описанной в работах автора [12, 16–18].

1. Физико-математическая постановка задачи

Рассматривается движение вязкой несжимаемой жидкости в области, представленной на рис. 1. Глубина и ширина водоема по поверхности и дну равны H , L_1 и L соответственно. В центральной части водоема находится лед толщиной H_i и протяженностью L_3 вдоль оси координат X_2 . Над водоемом вдоль этой оси дует ветер, скорость которого V имеет различное направление и силу.

Термические и динамические процессы в жидкости описывает система уравнений: Навье–Стокса

в приближении Буссинеска, уравнение теплопроводности, неразрывности и уравнение состояния пресной воды в районе 4 °С

$$\rho(T) = \rho_0 (1 - \gamma(T - 4^\circ\text{C})^2). \quad (1)$$

Здесь T — температура, ρ и ρ_0 — плотность воды при температуре T и 4 °С соответственно, $\gamma = 0.000085$ град⁻².

Считается, что вдоль оси X_1 движение однородно, а крупномасштабные конвективные структуры, возникающие справа и слева от термобара, формируются в турбулентной среде. Подробно вывод окончательной системы уравнений и уравнения замыкания дан в работах [12, 16–18].

С учетом сделанных предположений система уравнений термогидродинамики и уравнение замыкания в безразмерной форме в переменных функции тока вихря φ и температуры T приобретают вид

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

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

$$\Delta \psi = \varphi, \quad (4)$$

$$\mu^2 = \frac{c^3}{s} \int_s \left[4 \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_2 \partial x_3} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_2^2} \right)^2 - (T - T_4) \frac{\partial T}{\partial x_3} \right] ds. \quad (5)$$

Здесь $\mu = \nu_T / H \sqrt{gH}$ — безразмерный коэффициент турбулентной вязкости; T_4 — безразмерное значение температуры максимальной плотности воды; s — область решения задачи; c — эмпирическая константа. При обезразмеривании уравнений в качестве масштаба приняты: для расстояний — глубина водоема H ; для температуры — $\sqrt{1/\gamma}$; для скорости — \sqrt{gH} ; для времени — $\sqrt{H/g}$ (g — ускорение свободного падения).

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

$$\frac{\partial \psi}{\partial x_2} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x_3} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial \psi}{\partial n} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial n^2} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0. \quad (6)$$

На левой границе области задаются условия симметрии для всех переменных:

$$\frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \quad \psi = 0, \quad \varphi = 0. \quad (7)$$

На верхней границе для части водоема, свободного ото льда, граничные условия примут вид

$$-\mu \frac{\partial T}{\partial x_3} = Q^b, \quad \frac{\partial \psi}{\partial x_2} = 0, \quad \varphi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} = \tau_b = \frac{C_D \rho_a V_b^2}{\rho_0 \mu}, \quad (8)$$

а подо льдом

$$\frac{\partial \psi}{\partial x_2} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} = 0, \quad T = 0. \quad (9)$$

Здесь ρ_a — плотность воздуха; C_D — коэффициент трения; τ_b — безразмерное значение напряжения трения ветра; $V_b = V / \sqrt{gH}$ — безразмерная скорость ветра; $Q^b = Q / Q_1$, где в качестве масштабов потоков принята величина $Q_1 = \sqrt{\gamma} / c_0 \rho_0 \sqrt{gH}$.

Толщина ледяного покрова H_i определяется из уравнения

$$\frac{\partial H_i}{\partial t} = \frac{(Q_{WB} + Q_{WL} + Q_2)}{L_i r_i}, \quad (10)$$

где L_i — удельная теплота плавления льда; r_i — плотность льда; Q_{WB} и Q_{WL} — потоки, поступающие к нижней и боковой границам льда от воды соответственно. $Q_2 = Q_R + Q_i$, где Q_R — радиационный поток тепла от Солнца, Q_i — поток длинноволнового излучения с поверхности льда.

2. Параметры задачи

Рассматривались водоемы глубиной $H = 10, 20, 50$ м и шириной $L_1 = 750$ м (половина водоема). Скорость ветра принимала значения $V = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7$ м/с. Направление ветра задавалось к берегу (значения скорости со знаком «+») и от берега (значения скорости со знаком «-»). Температура атмосферы принималась равной $T_a = 8^\circ\text{C}$, а относительная влажность воздуха $f = 60\%$. Поток солнечной радиации, поступающий на поверхность водоема, равнялся $Q_R = 450$ Вт/м². Время воздействия ветра на водную поверхность составляло $t = 15$ мин. Начальные поля распределения температуры T и функции тока ψ (рис. 2), а также поле вихря φ соответствуют случаю, когда в период весеннего прогрева водоема в нем сформировался прибрежный термический бар. При этом центральная область водоема покрыта льдом, у кромки которого образовался интенсивный глубинный вихрь (ИГВ) [16].

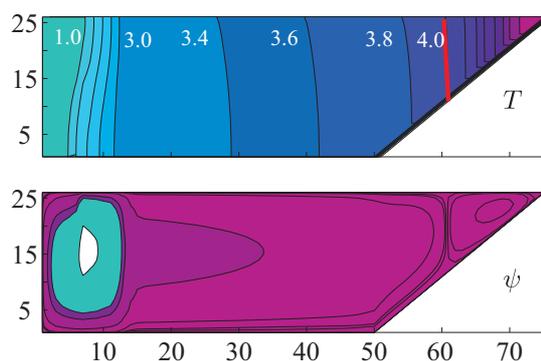


Рис. 2. Начальные поля распределения температуры T и функции тока ψ

Система уравнений (2)–(4), уравнение замыкания (5), уравнение баланса льда (10) совместно с граничными условиями (6)–(9) решались численно на сетке 26×75 . Размерные значения шага сетки по горизонтали и вертикали изменялись в зависимости от задания глубины водоема.

3. Влияние ветра на формирование течений и термическое состояние водоема разной глубины, не освободившегося ото льда

Как показано ранее в работе [16] (рис. 2), в водоеме, не освободившемся ото льда весной (при отсутствии ветрового воздействия), образуются две циркуляционные ячейки, сходящиеся на поверхности воды в районе изотермы 4°C и формирующие термобар. Внутри циклонической циркуляции слева от термобара существует интенсивный глубинный вихрь (ИГВ), сформировавшийся у кромки льда и вращающийся в том же направлении. В работе [12] также показано, что в этой ситуации ветровое воздействие на водную поверхность в неглубоком водоеме существенно меняет картину течений, влияет на формирование, развитие и время жизни термобара. Ниже проводится исследование аналогичной ситуации в водоемах различной глубины.

3.1. Ветер направлен к берегу

При ветре, направленном к берегу (рис. 3), друг другу противостоят две силы. Сила, 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.

Значительные отличия картин течения в водоемах разной глубины заметны уже при небольшой скорости ветра. В мелком водоеме при скоростях ветра, больших $V = 1$ м/с, происходит достаточно быстрое вытеснение прибрежного вихря. Дрейфовое течение вовлекает большую часть водной толщи к перемещению в сторону берега. Интенсивность глубинного вихря у кромки льда практически не меняется. С увеличением скорости ветра V от 3 м/с до 5 м/с в неглубоком водоеме ($H = 10$ м) прибрежная циркуляция полностью вытесняется циклоническим вихрем, сформировавшимся ранее слева от термобара. В глубоком водоеме ($H = 50$ м) прибрежный вихрь лишь немного уменьшается в размере. При $V = 7$ м/с он все еще существует. При этих скоростях ветра время ветрового воздействия $t = 15$ мин недостаточно для подавления прибрежной циркуляции в глубоком водоеме.

С увеличением глубины водоема увеличивается размер и интенсивность вихря, сформировавшегося у кромки льда (ИГВ). Так, при скорости ветра 7 м/с в водоеме глубиной $H = 50$ м максимальная скорость течения у поверхности водоема в районе ИГВ увеличивается в 3 раза по сравнению со случаем $H = 10$ м (от 2.75 до 7.73 см/с). Это в свою очередь приводит к уменьшению градиента температуры в области ИГВ и способствует перемещению холодных вод от центральной части водоема ближе к берегу.

Следует заметить, что в случае мелкого водоема уже при малых скоростях ветра месторасположение изотермы 4°C на поверхности воды, которое при отсутствии ветрового воздействия определяло

расположение термобара, не совпадает с областью схождения вихревых структур. В водоемах глубиной $H = 50$ м месторасположение изотермы 4°C по-прежнему находится в области схождения воды или близко к ней при более сильных ветрах.

3.2. Ветер направлен от берега

При ветре, направленном от берега (рис. 4), плотностная неустойчивость, способствующая перемещению термобара от берега, и ветровое воздействие оказывают влияние в одном направлении.

Как видно из рис. 4, даже небольшой по силе ветер ($V = -1$ м/с) существенно изменяет картину течений. В водоеме глубиной $H = 10$ м прибрежный вихрь значительно увеличивается в размере по сравнению с его размером для водоема глубиной $H = 50$ м. В мелком водоеме он вытягивается вблизи его поверхности и практически достигает ИГВ. По дну водоема размер вихря слева от термобара практически не меняется. Такая форма прибрежного вихря является следствием максимального напряжения трения ветра вблизи поверхности водоема. Область опускания поверхностных вод сильно наклонена в направлении ветра. В случае водоема глубиной $H = 50$ м картина течений остается практически неизменной по сравнению со случаем отсутствия ветрового воздействия.

При скорости ветра $V = -3$ м/с в водоеме глубиной $H = 10$ м прибрежная циркуляция успевает полностью занять область от берега до ИГВ, постепенно вытесняя его. Чем больше скорость ветра, тем дальше продвигается прибрежный вихрь к центру водоема. При этом ИГВ теряет свою интенсивность. При $V = -5$ м/с в водоеме глубиной $H = 50$ м видна ярко выраженная борьба прибрежной и глубинной вихревых структур. Это связано со значительной глубиной водоема и непродолжительным временем ветрового воздействия. Область схождения циркуляций еще далека от центра водоема. Размер вихря, внутри которого существует ИГВ, несколько превышает размер прибрежной циркуляции. При ветре $V = -7$ м/с в глубоком водоеме ($H = 50$ м) интенсивный глубинный вихрь ярко выражен и продолжает сопротивляться распространению прибрежной циркуляции.

Тенденция более быстрого продвижения прибрежной циркуляции к центру в более мелком водоеме наблюдается при всех скоростях ветра. Это связано с тем, что скорость дрейфового течения, уменьшаясь с глубиной по экспоненциальному закону, в мелком водоеме оказывает влияние практически до дна.

Анализ картин движения воды (рис. 4) показал, что развитие течений в водоемах разной глубины происходит по одному сценарию (например, $H = 10$ м, $V = -1$ м/с и $H = 50$ м, $V = -5$ м/с). Однако оккупация прибрежной антициклонической циркуляцией центральной области в глубоком водоеме происходит медленнее. При этом с увеличением глубины водоема возрастает интенсивность ИГВ. Увеличивается его размер и скорость вращения. Это приводит к уменьшению горизонтального градиента температуры в центре водоема и увеличению

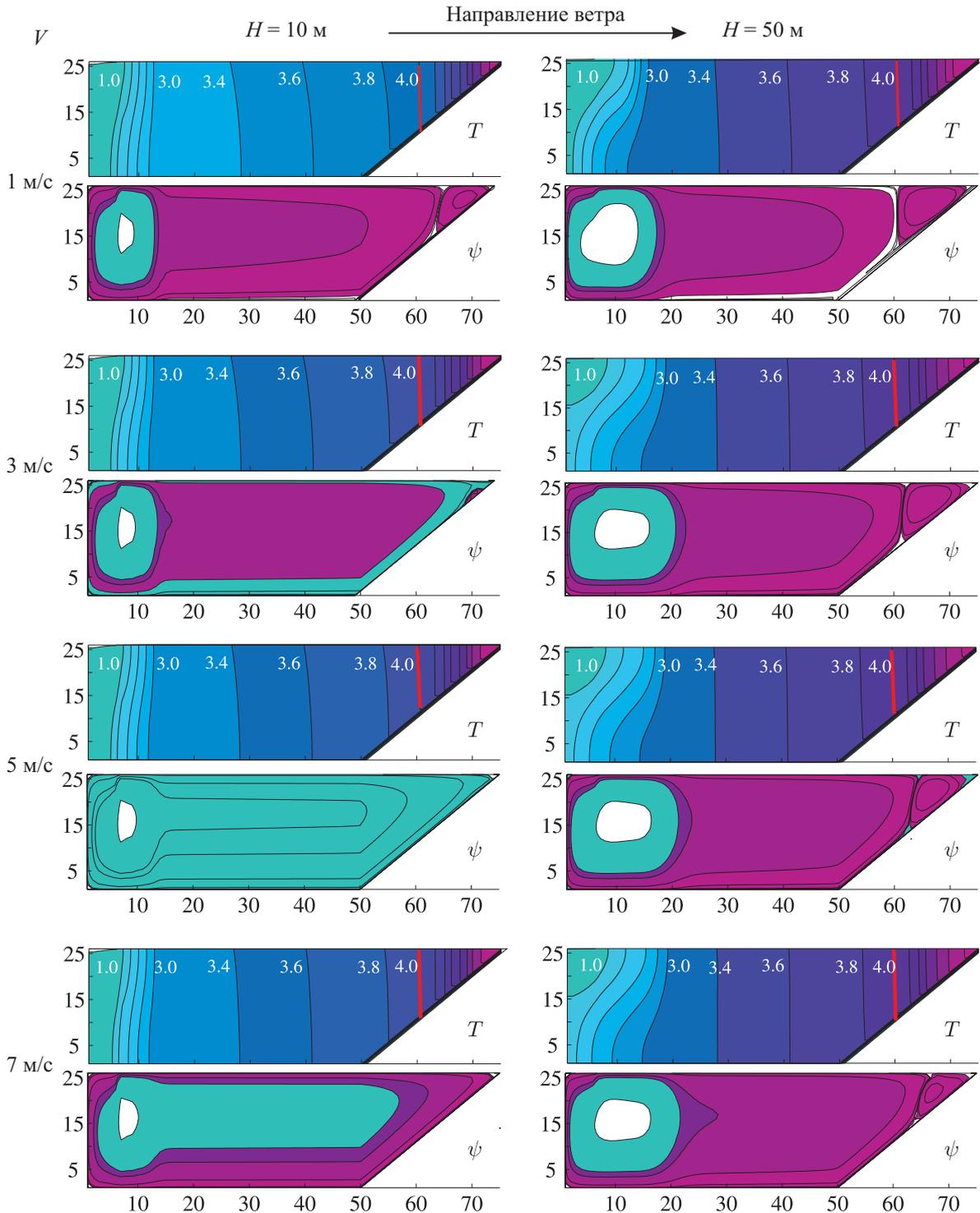


Рис. 3. Поля распределения температуры T и функции тока ψ для скоростей ветра $V = 0, 1, 3, 5$ и 7 м/с в водоемах глубины $H = 10$ и 50 м через 15 мин после начала ветрового воздействия на поверхность водоема. Ветер направлен к берегу. Жирной линией обозначено месторасположение изотермы 4°C

сопротивления глубинного вихря распространению прибрежной циркуляции.

4. Механизмы неустойчивости в водоемах разной глубины

В рассматриваемой задаче два основных механизма неустойчивости приводят к возникновению и изменению картины течения в водоемах. Первый механизм связан с ветровым воздействием на водную поверхность, а второй — с конвективной

неустойчивостью водных масс. По рис. 3, 4 видно, что при ветре, направленном как к берегу (рис. 3), так и от берега (рис. 4), с увеличением глубины водоема наблюдается увеличение размера и усиление интенсивности ИГВ. Таким образом, причина его усиления не связана с дрейфовым течением, а объясняется механизмом конвективной неустойчивости водных масс, критерием которой является безразмерное число Грасгофа G_r . Для квадратичной зависимости плотности пресной воды от температу-

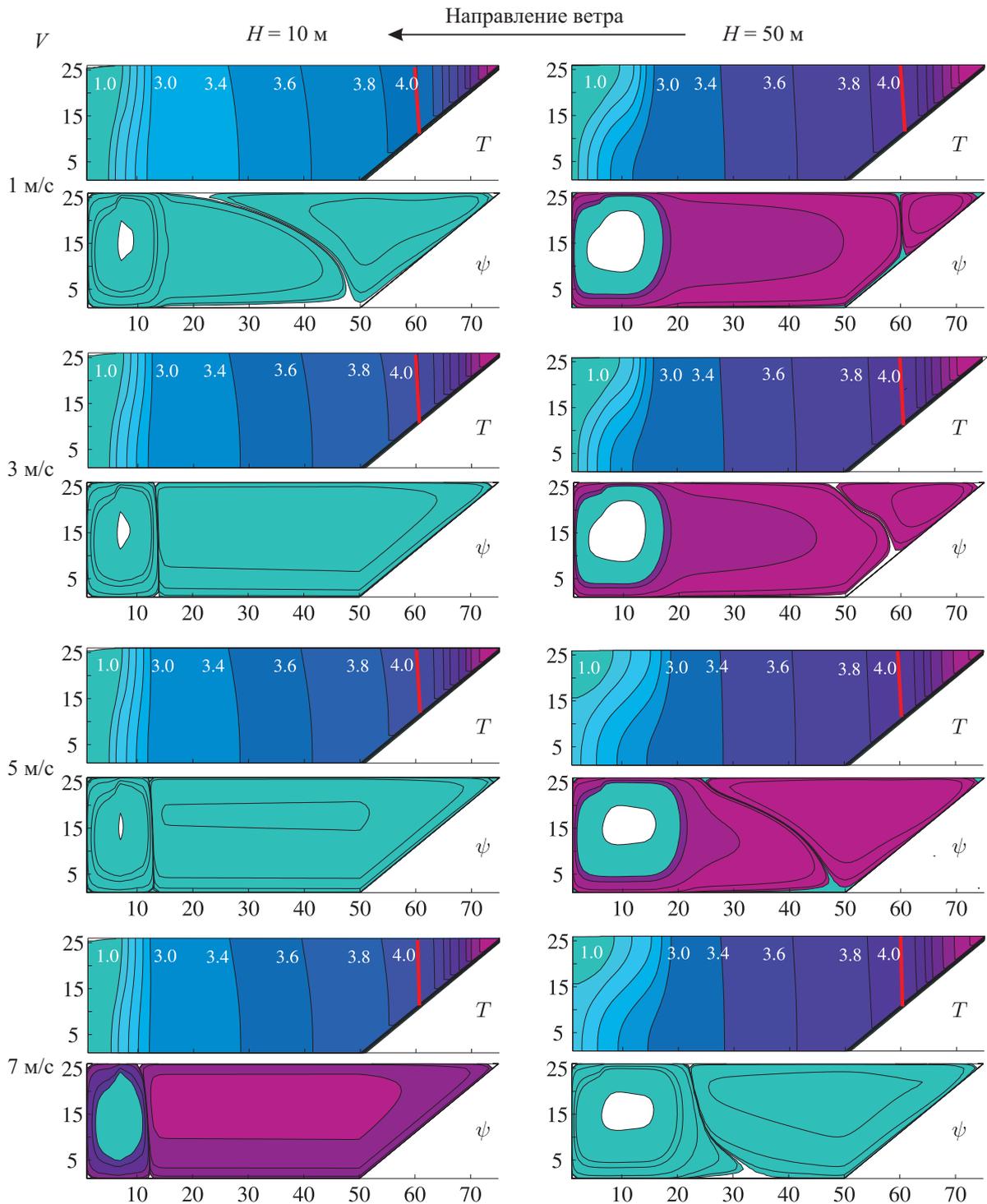


Рис. 4. Поля распределения температуры T и функции тока ψ для скоростей ветра $V = 0, 1, 3, 5$ и 7 м/с в водоемах глубиной $H = 10$ и 50 м через 15 мин после начала ветрового воздействия на поверхность водоема. Ветер направлен от берега. Жирной линией обозначено месторасположение изотермы 4°C

ры эта зависимость получена в работе [20]:

$$\text{Gr} = \frac{g\gamma\Delta T^2 H^3}{\nu^2}.$$

Здесь g — ускорение свободного падения, γ — коэффициент в формуле (1), ΔT — разница между температурой на дне и поверхности водоема, H — глубина водоема, ν — кинематическая вязкость жидкости.

Чем больше число Грасгофа, тем более неустойчив слой воды. При одинаковом нагреве поверхност-

ных вод вблизи кромки льда число Грасгофа будет больше в глубоком водоеме. Так, при $H = 10$ м $\text{Gr} \sim 10^3$, а при $H = 50$ м $\text{Gr} \sim 125 \cdot 10^3$. Следовательно, в глубоких водоемах движение вихря, сформировавшегося у кромки льда, будет интенсивнее. Как показывают расчеты, увеличиваются горизонтальные скорости движения в ИГВ вдоль поверхности водоема, что и способствует увеличению его размера.

Таким образом, в мелких водоемах преобладают

щий механизм неустойчивости связан с дрейфовым течением, а в глубоких — с конвективной неустойчивостью слоя воды.

5. Месторасположение области схождения вихревых структур в водоемах разной глубины

В классическом понимании термобар представляет собой область схождения вихревых структур, где от поверхности до дна температура воды равна температуре максимальной плотности (в пресном водоеме 4°C). Однако воздействие ветра на водную поверхность приводит к существенному изменению как динамической картины течения, так и термического состояния водоема. При этом область схождения вихревых структур и изотерма 4°C перестают совпадать. Это видно на рис. 5, где представлено месторасположение области схождения вихревых структур для водоемов различной глубины при разных скоростях ветра как по величине, так и по направлению. Горизонтальной линией обозначена область расположения изотермы 4°C при отсутствии ветрового воздействия.

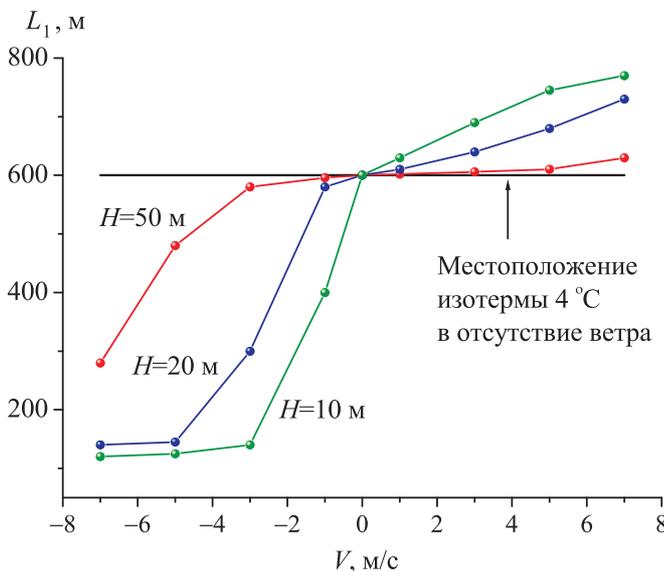


Рис. 5. Месторасположение области схождения вихревых структур в зависимости от скорости ветра и глубины водоема через $t = 15$ мин после начала воздействия ветра на водную поверхность. Горизонтальной линией обозначено месторасположение изотермы 4°C при отсутствии ветра

С увеличением скорости ветра и уменьшением глубины водоема область схождения вихревых структур все дальше отстоит от изотермы 4°C . Наименьшее расхождение наблюдается при скоростях ветра от -1 до 5 м/с в глубоком водоеме. Результаты расчетов позволяют сделать вывод, что при непродолжительном воздействии ветра на водную поверхность и умеренных его скоростях в глубоких водоемах зона схождения водных масс близка или совпадает с областью расположения поверхностных вод с температурой 4°C . При малых глубинах расхождение существенно.

В природных условиях расхождение областей схождения воды на поверхности и изотермы 4°C

наблюдалось около восточного берега Ладожского озера. Температура поверхности воды в области схождения вихрей была около 6°C и находилась примерно в 20 км от берега, а выход изотермы 4°C на поверхность водоема был зафиксирован на расстоянии 28 км от берега. Данные наблюдений С. Г. Каретникова и М. А. Науменко предоставлены в устном сообщении М. А. Науменко.

Заключение

В работе показано, что структура течений и распределений температуры в водоеме весной в период формирования термобара и таяния ледового покрова существенно зависит от глубины водоема, величины и направления ветра над его поверхностью. Определены основные механизмы неустойчивости водных масс в водоеме при данной гидрометеорологической ситуации. Показано, что чем больше глубина водоема, тем при больших скоростях ветра преобладает плотностная неустойчивость водных масс, связанная с аномальными свойствами воды. Механизм неустойчивости, вызванной ветровым воздействием, преобладает в мелких водоемах. Показано, что трактовка термобара в классическом его понимании как области схождения водных масс на поверхности пресного водоема в районе расположения изотермы 4°C (температуры максимальной плотности) не всегда правомерна. В мелких водоемах даже при небольших по силе ветрах расхождение этих зон существенно. Чем больше глубина водоема, тем при больших скоростях ветра классическая трактовка термобара верна.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 14-05-00822, 15-01-06363).

Список литературы

1. Форель Ф.А. Руководство по озероведению (общая лимнология). СПб., 1912.
2. Тихомиров А.И. Термика крупных озер. Л., 1982.
3. Farrow D., McDonald N.R. // J. Geophys. Res. 2002. 107. N C5. P. 1-1.
4. Farrow D. // Environ. Fluid Mech. 2002. 2, N 3. P. 197. 1023/A:1019887913946
5. Блохина Н.С., Соловьёв Д.А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2010. № 3. С. 44. (Blokhina N.S., D.A. Solov'ev // Moscow University Phys. Bull. 2010. 65, N 3. P. 203.)
6. Holland P.R., Kay A., Botte V. // Environ. Fluid Mech. 2001. 1. P. 311.
7. Holland P.R., Kay A., Botte V. // J. Marine Systems. 2003. 43. P. 61.
8. Шерстянкин П.П., Иванов В.Г., Куимова Л.Н., Сидюкович В.Н. // Водные ресурсы.
9. Цыденов Б.О., Старченко А.В. // Вестн. Томск. гос. ун-та. Матем. и мех. 2013. № 5(25). С. 102.
10. Cheng R.T., Powell T.M., Dillon T.M. // Appl. Math. Modell. 1976. 1. P. 141.
11. Farmer D.M., Carmack E.C. // J. Phys. Oceanogr. 1981. 11. P. 1516.
12. Блохина Н.С. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2013. № 4. С. 59 (N.S. Blokhina // Moscow University Phys. Bull. 2013. 68, N 4. P. 324.)
13. Блохина Н.С., Соловьёв Д.А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2006. № 3. С. 59.

14. *Malm J.* Thermal Bar Dynamics — Springtime Thermo- and Hydrodynamics in Large Temperate Lakes. PhD Thesis. Rep. No. 1012. Dept. of Water Resources Eng., Lund University, Sweden, 1994.
15. *Соловьёв Д.А., Блохина Н.С.* // *Океанология*. 2010. **50**. № 6. С. 904. (*Solov'ev D.A., Blokhina N.S.* // *Oceanology*. 2010. **50**, N 6. P. 855.)
16. *Блохина Н.С., Орданович А.Е.* // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* 2012. № 1. С. 113. (*Blokhina N.S., Ordanovich A.E.* // *Moscow University Phys. Bull.* 2012. **67**, N 1. P. 109.)
17. *Блохина Н.С., Овчинникова А.В., Орданович А.Е.* // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* 2002. № 2. С. 60. (*Blokhina N.S., Ovchinnikova A.V., Ordanovich A.E.* // *Moscow University Phys. Bull.* 2002. **57**, N 2. P. 73.)
18. *Блохина Н.С., Орданович А.Е., Савельева О.С.* // *Водные ресурсы*. 2001. **28**, № 2. С. 224. (*Blokhina N.S., Ordanovich A.E., Savel'eva O.S.* // *Water Resources*. 2001. **28**, N 2. P. 201.)
19. *Блохин А.С., Блохина Н.С.* // *Докл. АН СССР*. 1970. **193**, № 4. С. 805. (*Blokhin A.S., Blokhina N.S.* // *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1970. **193**, N 4. P. 805.)

The influence of wind on the development of a thermal bar and currents in reservoirs of different depths during ice cover melting

N. S. Blokhina

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

E-mail: blokhinans@gmail.com.

The influence of wind on the development of a thermal bar and currents in reservoirs of different depths during ice cover melting was studied using mathematical modeling. It is shown that the reservoir depth, as well as the wind velocity and direction, determine the behavior and lifetime of vortex structures in a reservoir that form on both sides of a thermal bar, as well as the location of their convergence zone and the 4 °C isotherm. The dominant mechanisms of the instability of water masses in reservoirs of different depths under wind action on their surface are identified. It is shown that the higher wind speed is, the deeper the reservoir should be in order to get the zone of divergence of water masses close to 4 °C isotherm. In this situation it is justified to use a classical interpretation of a thermal bar as a region of water convergence near 4 °C, unlike shallow reservoirs where even slight winds lead to the significant divergence of these zones.

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

PACS: 92.40.Cy.

Received 11 February 2015.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2015).

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.