

Влияние ветра и рельефа дна на динамику осеннего термобара (на примере оз. Байкал)

Б.О. Цыденов✉*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 26.01.2023 г.;
после доработки 23.03.2023 г.;
принята к печати 24.03.2023 г.

На примере оз. Байкал методами численного моделирования исследуется совместное влияние ветра и морфологических характеристик водоема на его термическое состояние и особенность развития осеннего термобара. Установлено, что при метеорологических условиях с 1 по 30 ноября 2015 г. поведение термобара в начальной стадии его развития на разрезе р. Болдакова — прол. Малое Море более чувствительно к ветровому воздействию, чем на разрезе прот. Средняя (дельта р. Селенги) — р. Бугульдейка. Однако распространение фронта термобара и охлаждение вод в Селенгинском мелководье происходит более быстрыми темпами.

Ключевые слова: рельеф дна, ветер, осенний термобар, численное моделирование, озеро Байкал; bottom topography, wind, autumnal thermal bar, numerical modeling, Lake Baikal.

Введение

В озерах умеренных широт в периоды весеннего прогревания и осеннего охлаждения при переходе воды через температуру максимальной плотности (3,9839 °C для пресной воды на поверхности озера [1]) наблюдается *термобар* — необычное природное явление, представляющее собой узкую зону погружения плотных водных масс. Ограничивая горизонтальный водообмен и создавая специфические температурные условия, термобар влияет на качество воды, жизнь планктонных сообществ и экологическое состояние водоема.

Термобары в оз. Байкал ярко выражены в мелководьях, заливах и окрестностях относительно приглубых прибрежных зон [2–4]. Ключевую роль в их формировании играют речные притоки [5]. К примеру, р. Селенга влияет на физические, химические, биологические характеристики воды в Среднем Байкале [6, 7]. Через фронт термобара на Селенгинском мелководье проходит граница между прозрачными озерными и желтоватыми речными водами [8]. Сроки образования осеннего термобара в оз. Байкал варьируются от середины октября до середины ноября [4]. Начало формирования, динамика перемещения и продолжительность существования термобара зависят от скорости и направления ветра [9, 10]. Более того, под действием

сильных ветров возможно разрушение термического фронта [11]. На интенсивность циркуляционных процессов в период развития термобара может также оказывать влияние рельеф дна [10]. В различных частях Байкала ветровое перемешивание, в зависимости от ветровых и батиметрических условий, распространяется на разную глубину.

Морфология озерной котловины не только отражает происхождение озера и процессы, протекавшие в озере во время его жизни, но и влияет на свойства самих озер [12]. В водоемах одного и того же климатического района формирования термобара, прямой и обратной термической стратификации проявляется с разной интенсивностью и наступает неодновременно из-за морфологических и морфометрических особенностей котловин [13].

Целью работы является исследование методами численного моделирования совместного влияния ветра и морфологических характеристик водоема (на примере оз. Байкал) на его термическое состояние и особенности развития термобара в период осеннего охлаждения.

Математическая модель

Негидростатическая 2.5D-модель для воспроизведения термогидродинамических процессов в глубоком озере включает в себя уравнения количества движения (1)–(3), неразрывности (4), энергии (5) и баланса солености (минерализации) в озере (6):

* Баир Олегович Цыденов (tsydenov@iao.ru).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial u w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) + 2\Omega_z v - 2\Omega_y w; \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial u v}{\partial x} + \frac{\partial w v}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) + 2\Omega_x w - 2\Omega_z u; \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial u w}{\partial x} + \frac{\partial w^2}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{g\rho}{\rho_0} + 2\Omega_y u - 2\Omega_x v; \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial u T}{\partial x} + \frac{\partial w T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho_0 c_p} \frac{\partial H_{\text{sol}}}{\partial z}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial u S}{\partial x} + \frac{\partial w S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial S}{\partial z} \right), \quad (6)$$

где u и v — горизонтальные компоненты скорости; w — вертикальная компонента скорости; Ω_x , Ω_y и Ω_z — компоненты вектора угловой скорости вращения Земли; g — ускорение свободного падения; c_p — удельная теплоемкость; T — температура; S — солёность; p — давление; ρ_0 — плотность воды при стандартном атмосферном давлении и характерной температуре и солёности воды; K_x (D_x) и K_z (D_z) — коэффициенты турбулентной вязкости (диффузии) в соответствующих направлениях, H_{sol} — поток солнечной радиации.

Начальные условия для уравнений модели имеют вид

$$u = 0; \quad v = 0; \quad w = 0; \quad T = T_L; \quad S = S_L, \quad (7)$$

где T_L и S_L — температура и солёность воды в озере.

Граничные условия задаются следующим образом:

а) на поверхности озера

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial v}{\partial z} = 0; \quad w = 0; \quad D_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{H_{\text{net}}}{\rho_0 c_p}; \quad \frac{\partial S}{\partial z} = 0, \quad (8)$$

где H_{net} — тепловой поток, состоящий из потоков длинноволновой радиации, явного и скрытого тепла [14];

б) на твердых границах

$$u = 0; \quad v = 0; \quad w = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial n} = -\frac{H_{\text{geo}}}{\rho_0 c_p}; \quad \frac{\partial S}{\partial n} = 0, \quad (9)$$

где n — направление внешней нормали к области водного пространства; $H_{\text{geo}} = 0,05 \text{ Вт/м}^2$ — геотермальное тепло;

в) на границе раздела река — озеро

$$u = u_R; \quad v = 0; \quad w = 0; \quad T = T_R; \quad S = S_R, \quad (10)$$

где u_R — скорость речного притока; T_R и S_R — температура и солёность в устье реки;

г) на открытой границе задаются условия радиационного типа [15]:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + c_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (\phi = u, v, T, S) \quad (11)$$

и простые градиентные условия

$$\partial w / \partial x = 0. \quad (12)$$

Замыкание системы уравнений (1)–(6) осуществляется при помощи двухпараметрической k – ω модели турбулентности [16] и алгебраических соотношений для определения турбулентной вязкости и диффузии [17]. В качестве уравнения состояния выбрано широко используемое для пресноводных водоемов [18–20] уравнение Чена–Миллера, справедливое в диапазоне $0 \leq T \leq 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $0 \leq S \leq 0,6 \text{ г/кг}$, $0 \leq p \leq 180 \text{ бар}$ [21]. Важно заметить, что в этом уравнении при $p > 120 \text{ бар}$ коэффициент термического расширения при температуре максимальной плотности и $S = 0,096 \text{ г/кг}$ превышает допустимую погрешность $\pm 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ [22].

Сдвиговое напряжение ветра на поверхности озера описывается законом

$$\tau_{\text{surf}}^u = c_{10} \rho_a \sqrt{v_{10}^2 + u_{10}^2} \cdot u_{10};$$

$$\tau_{\text{surf}}^v = c_{10} \rho_a \sqrt{v_{10}^2 + u_{10}^2} \cdot v_{10},$$

где u_{10} и v_{10} — составляющие скорости ветра на высоте 10 м над поверхностью озера; ρ_a — плотность воздуха у поверхности воды; $c_{10} = 1,3 \cdot 10^{-3}$ [23]. Более детальное описание модели и метода численного решения уравнений (1)–(6) с начальными и граничными условиями (7)–(12) приведено в [24].

Область исследования и параметры задачи

С целью оценки степени влияния рельефа дна и ветра на развитие термобара в период осеннего выхолаживания озера выполнены вычислительные эксперименты (таблица) при наличии и отсутствии ветрового трения на поверхности озера для разрезов р. Болдакова — прол. Малое Море и прот. Средняя (дельта р. Селенги) — р. Бугульдейка (рис. 1, а)

Вычислительные эксперименты

Номер эксперимента	Разрез	Условие на поверхности озера
1	р. Болдакова —	без ветра
2	прол. Малое Море	с ветром
3	прот. Средняя —	без ветра
4	р. Бугульдейка	с ветром

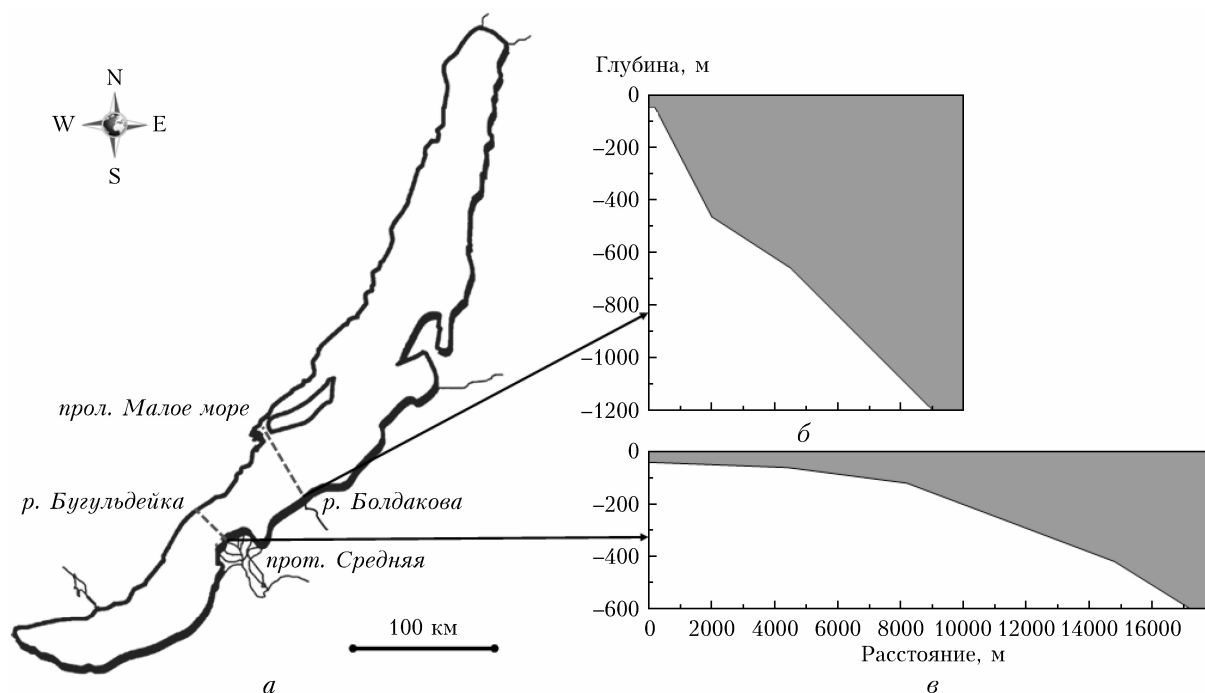


Рис. 1. Озеро Байкал: *а* — схема разрезов; *б* — вычислительная область для разреза р. Болдакова — прол. Малое Море; *в* — вычислительная область для разреза прот. Средняя (дельта р. Селенги) — р. Бугульдейка

на вычислительных областях $10 \times 1,2$ км (рис. 1, *б*) и $18 \times 0,6$ км (рис. 1, *в*) соответственно. Селенгинское мелководье расположено между $51,9$ и $52,5^\circ$ с.ш. и $106,1$ и $106,9^\circ$ в.д., а устье р. Болдакова — в 70 км к северу от дельты р. Селенги. Данные о рельефе дна, соответствующие указанным разрезам, взяты из работ [5, 25]. Вычислительные области покрыты равномерной прямоугольной сеткой с шагами $h_x = 50$ м и $h_z = 5$ м. Шаг по времени — 30 с.

Начальные условия в вычислительных экспериментах задавались в виде вертикально неоднородного распределения температуры, отражающего термический режим Среднего Байкала в октябре [26]. Температура воды в устьях рек в начальный момент времени соответствовала $1,5^\circ\text{C}$ и понижалась на $0,02^\circ\text{C}$ в сутки. Минерализация воды в озере — 96 мг/л [26], в реке — $128,2$ мг/л (средняя минерализация по всем притокам) [27]. Скорость течения речных притоков при впадении в озеро — $0,5$ см/с (приблизительно соответствует максимальным значениям скорости течения прот. Средняя [28]). Коэффициенты горизонтальной турбулентной вязкости и диффузии приняты равными $K_x = D_x = 5,0$ м²/с [29]. Тепловые потоки, поступающие на водную поверхность, параметризованы согласно расчетным формулам, приведенным в [30], с использованием данных метеостанции с. Горячинск о погодных условиях с 1 по 30 ноября 2015 г. [31].

Результаты и обсуждение

Согласно данным архива погодных условий метеостанции с. Горячинска, в ноябре 2015 г. ветер

сильно изменялся по скорости и направлению (рис. 2). С каждым днем ветер ослабевал: его скорость варьировалась в диапазоне $0\text{--}8$ м/с в первой декаде, $0\text{--}6$ м/с во второй и $1\text{--}5$ м/с в третьей. Среднемесячная скорость ветра составила $2,7$ м/с. Следует заметить, что ветры восточного и южного направлений дули достаточно продолжительное время на 6–9-е и 19–20-е сут соответственно (рис. 2, *б*). Эпизодическое возникновение северо-западных ветров на 3, 4, 14-е сут (рис. 2, *б*) сопровождалось порывами более 6 м/с (рис. 2, *а*).

Термобар возникает в том месте, где температура воды близка к температуре ее максимальной плотности. Следовательно, по положению температуры максимальной плотности можно проследить динамику термобара. Анализ графиков, представленных на рис. 3, показывает, что осенний термобар на разрезе р. Болдакова — прол. Малое Море формируется позже, чем на разрезе прот. Средняя — р. Бугульдейка. Это связано с длительным сохранением тепла в приглубых районах озера и быстрым выхолаживанием мелководных зон. Следует добавить, что более поздние сроки формирования термобара возможны и при высоких скоростях ветра, который направлен к устью реки [32].

Из рис. 3 видно, что поведение термобара на начальной стадии его развития в мелководном участке озера менее чувствительно к ветровому воздействию, во-первых, в связи с быстрым отдалением термобара от устья реки и уменьшением вследствие этого влияния речного стока и, во-вторых, из-за активного перемешивания верхних и придонных слоев,

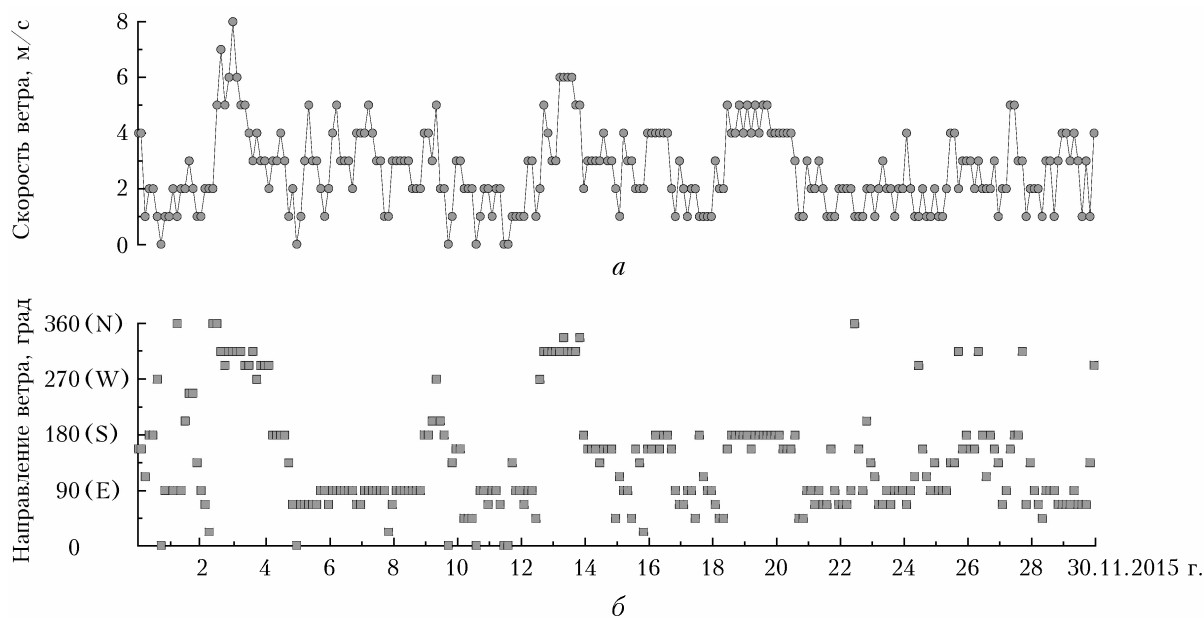


Рис. 2. Скорость (а) и направление (б) ветра в ноябре 2015 г. согласно данным метеостанции с. Горячинск

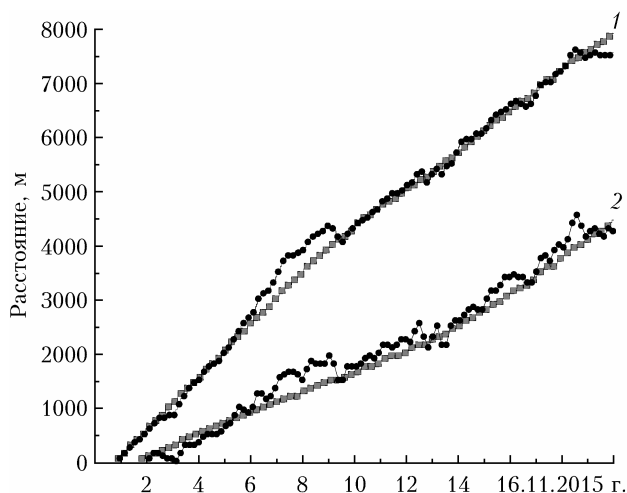


Рис. 3. Динамика перемещения области температуры максимальной плотности на поверхности озера для разрезов прот. Средняя — р. Бугульдейка (1) и р. Болдакова — прот. Малое Море (2) при отсутствии (серые символы) и наличии ветра (черные символы)

и установления явления гомотермии (однородности температуры по всей водной толще) [14]. Более сильное воздействие ветра на разрезе р. Болдакова — прот. Малое Море можно объяснить влиянием более холодных речных и глубоководных озерных водных масс. Важно заметить, что усиление ветра северо-западного направления до 8 м/с на 3-е сут в эксперименте № 2 привело к разрушению фронта термобара (рис. 3).

Так как течения, возникающие за счет плотностной неустойчивости, являются более персистентными [33], то при ослаблении ветра термобар

на разрезе р. Болдакова — прот. Малое Море формируется повторно на 4-е сут (рис. 3). Вследствие длительного воздействия восточного ветра на 6–9-е сут наблюдается увеличение скорости горизонтального перемещения фронта термобара в экспериментах № 2 и 4 (на обоих разрезах). Однако штилевая погода на 10-е сут и ослабление ветра в последующие дни привели к реверсивному движению (в сторону устья реки) термического фронта (рис. 3). Аналогичное поведение термобара может проявляться при высоких скоростях восточного ветра вследствие кратковременного дневного прогрева поверхностных вод на фоне долговременного сезонного охлаждения озера [34]. По мере продвижения фронта термобара в центральную часть озера замечен спад влияния ветра.

Изотермы, полученные на 9-е сут (рис. 4), иллюстрируют выраженный эффект ветрового трения лишь в верхнем 100-метровом слое, что связано с невысокой ветровой активностью. Тем не менее при сильных ветрах ветровое перемешивание в открытой части оз. Байкал может доходить до глубин 200–250 м [34, 35]. Согласно профилю температуры максимальной плотности фронт термобара на 9-е сут располагался на расстоянии 1,4 км от устья реки в эксперименте № 1, 1,9 км — в эксперименте № 2, 3,9 км — в эксперименте № 3 и 4,3 км — в эксперименте № 4 (рис. 4). Важно заметить, что ветер сильно влияет на распределение температуры в теплоактивной области водоема: изотермы имеют больший наклон при восточном ветре, дующем с берега. Распространение термобара и охлаждение прибрежных вод в мелководье происходит быстрее, чем в приглубых участках озера. Средняя скорость перемещения фронта термобара на поверхности

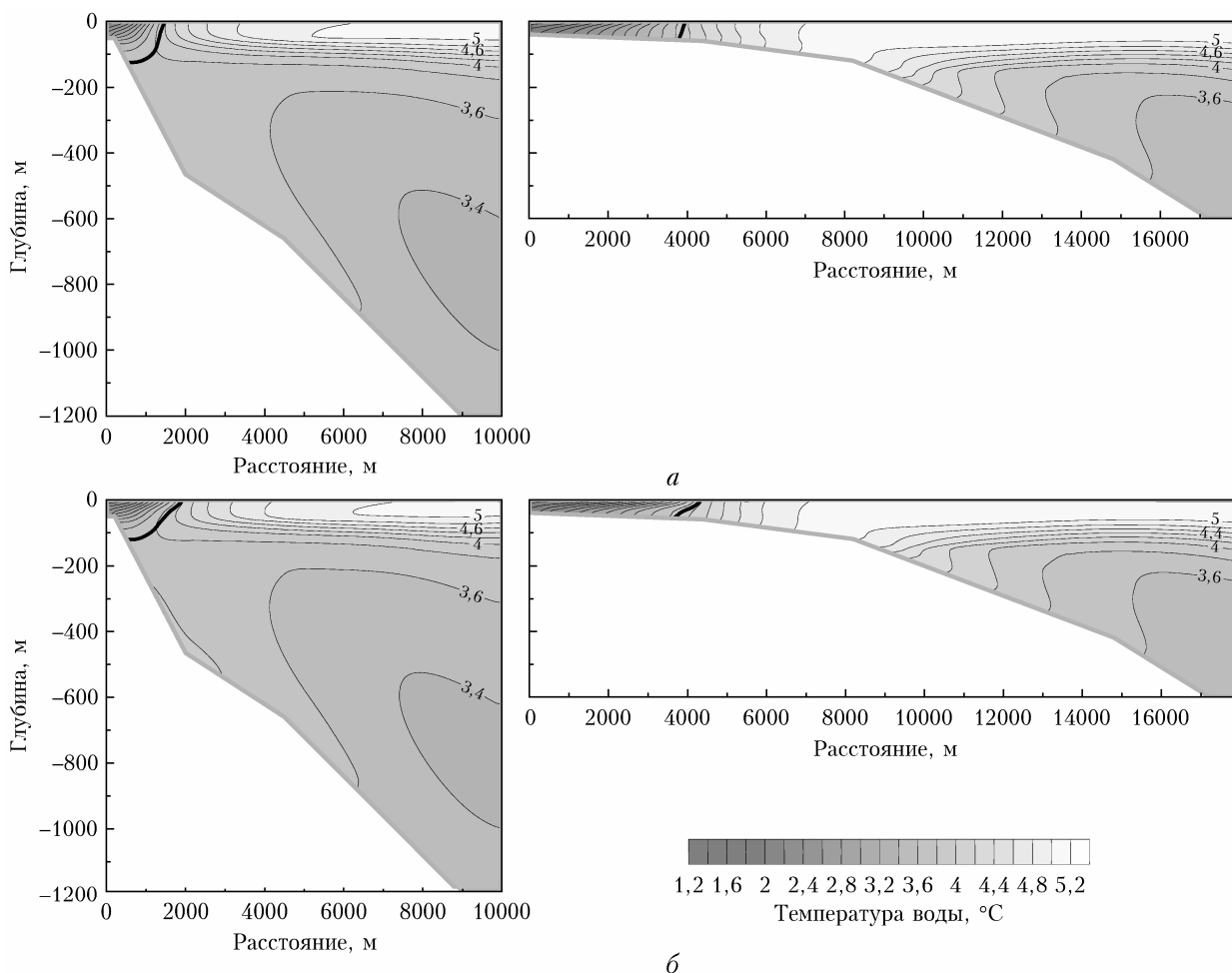


Рис. 4. Распределение температуры (полуширной линией показан профиль температуры максимальной плотности) на 9-е сут для разрезов р. Болдакова – прол. Малое Море (слева) и прот. Средняя – р. Бугульдейка (справа) при отсутствии (а) и наличии (б) ветра

водоема составила 0,24 км/сут для разреза р. Болдакова – прол. Малое Море и 0,42 км/сут – для разреза прот. Средняя – р. Бугульдейка.

Заключение

Результаты численного моделирования показали следующие особенности развития осеннего термобара для батиметрии оз. Байкал.

1. При одинаковых начальных и граничных (за исключением твердых границ) условиях осенний термобар на разрезе р. Болдакова – прол. Малое Море формируется позже, чем на разрезе прот. Средняя – р. Бугульдейка.

2. В приглубых участках оз. Байкал из-за влияния более холодных вод – речных и глубинных озерных – влияние ветра сильнее: в начальной стадии развития термобара усиление ветра, направленного к берегу, ведет к разрушению (а его ослабление – к повторному формированию) термического фронта.

3. Ветровое перемешивание в открытой части оз. Байкал при метеорологических условиях с 1 по 30 ноября 2015 г. охватывает лишь верхний

100-метровый слой в связи с невысокой ветровой активностью (среднемесячная скорость ветра 2,7 м/с).

4. Горизонтальное перемещение фронта термобара и охлаждение прибрежных вод на разрезе прот. Средняя – р. Бугульдейка происходит быстрее, чем на разрезе р. Болдакова – прол. Малое Море.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (грант № 21-71-00013).

Список литературы

1. Bouffard D., Wüest A. Convection in lakes // Annu. Rev. Fluid Mech. 2019. V. 51. P. 189–215.
2. Верболов В.И., Сокольников В.М., Шимараев М.Н. Гидрометеорологический режим и тепловой баланс озера Байкал / под ред. Г.И. Галазий, В.М. Сокольников. М.; Л.: Наука, 1965. 373 с.
3. Шерстянкин П.П. Пространственное распределение прозрачности в Малом море и его связь с динамикой вод // Продуктивность Байкала и антропогенные изменения его природы. Иркутск: ИГУ, 1974. С. 54–62.
4. Шимараев М.Н. Элементы теплового режима озера Байкал / под ред. А.Н. Афанасьева. Новосибирск: Наука, 1977. 149 с.

5. Likhoshvay Y.V., Kuzmina A.Ye., Potyemkina T.G., Potyemkin V.L., Shimaraev M.N. The distribution of diatoms near a thermal bar in Lake Baikal // J. Great Lakes Res. 1996. V. 22, N 1. P. 5–14.
6. Sherstyankin P.P., Ivanov V.G., Kuimova L.N., Sinyukovich V.N. Formation of waters of the Selenga Shallow Waters taking account of the seasonal variations in river runoff, thermal convection, and thermobars // Water Res. 2007. V. 34. P. 408–414.
7. Hohmann R., Kipfer R., Peeters F., Piepke G., Imboden D.M., Shimaraev M.N. Processes of deep-water renewal in Lake Baikal // Limnol. Oceanogr. 1997. V. 42, N 5. P. 841–855.
8. Иванов В.Г. Формирование и эволюция весеннего термобара за счет стока реки (на примере Селенгинского мелководья озера Байкал): автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Иркутск: Лимнологический институт СО РАН, 2012. 24 с.
9. Blokhina N.S. The influence of wind on the development of a thermal bar and currents in a small reservoir during melting of its ice cover // Moscow Univ. Phys. Bull. 2013. V. 68, N 4. P. 324–329.
10. Malm J. Spring circulation associated with the thermal bar in large temperate lakes // Nordic Hydrology. 1995. V. 26, N 4–5. P. 331–358.
11. Tsydenov B.O. Numerical modeling of the autumnal thermal bar // J. Mar. Syst. 2018. V. 179. P. 1–9.
12. Вережагин Г.Ю. Методы сравнительно-морфометрического изучения озер // Тр. II Всесоюзного гидрологического съезда в Ленинграде, 20–27 апреля 1928 г. Л., 1929. Т. 2. С. 275–277.
13. Тухомиров А.И. Термика крупных озер. Л.: Наука, 1982. 232 с.
14. Tsydenov B.O. A numerical study of the thermal bar in shallow water during the autumn cooling // J. Great Lakes Res. 2019. V. 45, N 3. P. 715–725.
15. Orlanski I. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows // J. Comput. Phys. 1976. V. 21, N 3. P. 251–269.
16. Wilcox D.C. Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models // AIAA J. 1988. V. 26, N 11. P. 1299–1310.
17. Цыденов Б.О., Старченко А.В. Применение двухпараметрической $k-\omega$ -модели турбулентности для исследования явления термобара // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2014. № 5. С. 104–113.
18. Flood B., Wells M., Midwood J.D., Brooks J., Kuai Y., Li J. Intense variability of dissolved oxygen and temperature in the internal swash zone of Hamilton Harbour, Lake Ontario // Inland Waters. 2021. V. 11, N 2. P. 162–179.
19. De Carvalho Bueno R., Bleninger T., Lorke A. Internal wave analyzer for thermally stratified lakes // Environ. Model. Softw. 2021. V. 136. 104950.
20. Wu Y., Huang A., Lazhu, Yang X., Qiu B., Wen L., Zhang Z., Fu Z., Zhu X., Zhang X., Cai S., Tang Y. Improvements of the coupled WRF-Lake model over Lake Nam Co, Central Tibetan Plateau // Clim. Dyn. 2020. V. 55. P. 2703–2724.
21. Chen C.T., Millero F.G. Precise thermodynamic properties for natural waters covering only limnologies range // Limnol. Oceanogr. 1986. V. 31, N 3. P. 657–662.
22. Гранин Н.Г. Устойчивость стратификации и некоторые механизмы генерации конвекции в Байкале: дис. ... канд. геогр. наук. Иркутск: Лимнологический институт СО РАН, 1999. 124 с.
23. Goudsmit G.-H., Burchard H., Peeters F., Wüest A. Application of $k-\epsilon$ turbulence models to enclosed basin: The role of internal seiches // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N 12. P. 23–1–13.
24. Tsydenov B.O., Kay A., Starchenko A.V. Numerical modeling of the spring thermal bar and pollutant transport in a large lake // Ocean Modelling. 2016. V. 104. P. 73–83.
25. Шерстянкин П.П., Алексеев С.П., Абрамов А.М., Ставров К.Г., Де Батист М., Хус Р., Канальс М., Касамор Х.Л. Батиметрическая электронная карта озера Байкал // Докл. РАН. 2006. Т. 408, № 1. С. 102–107.
26. Shimaraev M.N., Verbovov V.I., Granin N.G., Sherstyankin P.P. Physical Limnology of Lake Baikal: A Review. BICER: Irkutsk–Okayama, 1994. 81 p.
27. Вотинцев К.К. Гидрохимия // Проблемы Байкала. Новосибирск, 1978. Т. 16, № 36. С. 124–146.
28. Синукович В.Н., Жарикова Н.Г., Жариков В.Д. Сток реки Селенги в ее дельте // География и природные ресурсы. 2004. № 3. С. 64–69.
29. Holland P.R., Kay A., Botte V. A numerical study of the dynamics of the riverine thermal bar in a deep lake // J. Environ. Fluid Mech. 2001. V. 1, N 3. P. 311–332.
30. Цыденов Б.О. Влияние тепловых потоков на распределение фитопланктона в пресноводном озере // Оптика атмосф. и океана. 2021. Т. 34, № 8. С. 591–598; Tsydenov B.O. Effects of heat fluxes on the phytoplankton distribution in a freshwater lake // Atmos. Ocean. Opt. 2021. V. 34, N 6. P. 603–610.
31. Расписание погоды [Электронный ресурс]. URL: <https://gr5.ru/> (дата обращения: 21.07.2022).
32. Цыденов Б.О. Динамика осеннего термобара при дифференцированной ветровой нагрузке // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3: Физика. Астрономия. 2022. № 1. С. 105–110.
33. Scavia D., Bennett J.R. Spring transition period in Lake Ontario – a numerical study of the causes of the large biological and chemical gradients // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1980. V. 37, N 5. P. 823–833.
34. Цыденов Б.О. Влияние силы ветра восточного направления на термическое состояние озера Байкал в осенний период (на примере разреза р. Болдакова – прол. Малое Море) // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: Материалы IV Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Барнаул: Изд-во «Пять плюс», 2022. Т. 1. С. 257–262.
35. Шимараев М.Н., Гранин Н.Г. К вопросу о стратификации и механизме конвекции в Байкале // Докл. АН СССР. 1991. Т. 321, № 2. С. 381–385.

B.O. Tsydenov. Effects of wind and topography on the dynamics of the autumnal thermal bar in Lake Baikal.

The combined effect of wind and lake topographic characteristics on the temperature distribution and autumnal thermal bar evolution on an example of Lake Baikal was studied by numerical modeling. It was determined that under meteorological conditions in November 1–30, 2015, the thermal bar behavior at an initial stage of its development on the Boldakov River – Maloye More Strait cross-section was more sensitive to the wind action than that on the Srednyaya arm (Selenga River Delta) – the Buguldeika River cross-section. However, faster water cooling and thermal front propagation take place in the Selenga shallow water basin.