

Особенности развития осеннего термобара при различных профилях подводного склона

Б. О. Цыденов^{1, *}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского
отделения РАН, лаборатория прогнозирования состояния атмосферы
Россия, 634055, Томск, пл. Академика Зуева, д. 1

(Поступила в редакцию 11.03.2023; после доработки 23.05.2023; принята к публикации 29.06.2023)

Методами численного моделирования получены данные о влиянии подводного склона на динамику термобара и связанных с ним циркуляций при осеннем охлаждении водоема. Рассмотрены варианты геометрии рельефа дна, соответствующие конфигурациям «пологий склон», «ступенчатый профиль», «желоб» и «крутой склон». Установлено, что в осенний период структура течений, сроки формирования и скорость распространения термобара существенно зависят от морфологических характеристик озерной котловины.

PACS: 92.40.Cy. УДК: 556.5, 519.6.

Ключевые слова: осенний термобар, температура максимальной плотности, подводный рельеф, математическая модель, численный эксперимент.

[10.55959/MSU0579-9392.78.2350901](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2350901)

ВВЕДЕНИЕ

Весной и осенью на поверхности димиктического озера, характеризующегося полной циркуляцией вод по вертикали при переходе воды через температуру максимальной плотности [1], можно обнаружить полосу пены, органических веществ, мелких частиц мусора и прочих загрязнителей антропогенного происхождения. Это связано с *термобаром* — природным явлением, представляющим собой узкую зону (разделяющую водоем на теплоактивную и теплоинертную области с разными типами термической стратификации) погружения водных масс при температуре максимальной плотности. Также его фронт может служить границей резкого контраста цветности и мутности воды [2]. Термобар, выполняя функцию, с одной стороны, барьера для горизонтального водообмена, с другой — канала для вертикального транспорта поверхностных вод в придонные области, играет ключевую роль в экологии водоема в весенний и осенний периоды.

подавляющее большинство работ по исследованию эффекта термобара методами математического моделирования [3–9] посвящено весеннему варианту. Однако натурные наблюдения свидетельствуют, что осенний термобар (который менее выражен и трудно изучаем из-за характерных для этого сезона сильных ветров [10]) по причине слабого температурного градиента имеет отличную от весеннего термобара динамику развития [11, 12]. К тому же весной установление прямой термической стратификации обусловлено объемным поглощением солнечной радиации и контактным тепло-

обменом, а осенью переход к обратной термической стратификации вызван лишь потерями тепла с поверхности [10].

При моделировании термобара очень важно учитывать силу Кориолиса, поскольку за счет этой силы и градиента давления возникают параллельные термическому фронту геострофические течения, состоящие из циклонической (в теплоактивной области) и антициклонической (в теплоинертной области) циркуляций [1]. Несмотря на боковое смещение вод во вдольбереговом направлении, потоки, сходящиеся на месте термобара, как правило, подавляют межфронтальный водообмен [11]. Исследования гидродинамических процессов показывают, что для крупных озер вдольбереговое течение является преобладающим при развитии термобара [12, 28]. В частности, в озере Байкал наблюдается так называемая кругобайкальская циклоническая циркуляция [29, 30].

Морфология озерной котловины не только отражает происхождение озера и процессы, протекавшие в озере во время его жизни, но и влияет на свойства самих озер [13]. В водоемах одного и того же климатического района формирование термобара, прямой и обратной термической стратификации проявляется с разной интенсивностью и наступает неодновременно вследствие морфологических и морфометрических особенностей котловин [1]. Как показывают натурные исследования, к основным факторам, влияющим на поведение термобара, наряду с эффектами ветра и тепловых потоков, относится и батиметрия озера [11].

Среди важных сведений, полученных с помощью математического моделирования весеннего варианта термобара, необходимо отметить следующие. Первое — плотностные циркуляции в крупных озерах сильно зависят от рельефа дна даже

* E-mail: tsydenov@iao.ru

при отсутствии ветра [4]. Второе — глубина водоема имеет важное значение в продолжительности жизни термобара [14]. И третье — расхождение области конвергенции водных масс на поверхности в районе расположения температуры максимальной плотности существенно в мелких водоемах даже при небольших по силе ветрах [15].

Целью настоящей работы является исследование влияния геометрии подводного склона на особенность развития термобара и течений в период осеннего охлаждения водоема методами численного моделирования (на примере термического режима оз. Байкал).

По условиям образования принято выделять два типа термобара: классический и речной [3]. Если классический термобар формируется только благодаря радиационным эффектам (при прогреве/охлаждении прибрежных вод весной/осенью),

то речной — за счет различия в физических свойствах речных и озерных вод. В настоящей работе будет рассмотрен речной вариант, так как ключевую роль в возникновении термобаров в озере Байкал играют его притоки [31].

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

1.1. Основные уравнения модели

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):

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

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

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

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

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

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

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

Натурные наблюдения показывают, что из-за формирования циклонической и антициклонической циркуляций под влиянием силы Кориолиса основные изменения при развитии термобара происходят от берега к центру озера, даже при условиях, когда речной поток попадает в озеро. При этом характеристики в направлении, параллельном берегу,

достаточно однородны. На этом основании полагают [32], что модель, в которой исключены все градиенты в направлении, параллельном берегу, должна качественно и правильно описывать физический процесс развития термобара. По этой причине для исследования динамики термобара достаточно применять 2.5D-модель [3, 4, 33], в которой используется такое приближение, переводящее задачу в двумерную, но учитывающую три компоненты вектора скорости (1–3), причем компонента скорости вдоль однородного направления в результате эффекта силы Кориолиса может в некоторых областях доминировать над другими компонентами.

Поглощение коротковолновой радиации H_{sol} рассчитывается по закону Бугера–Ламберта–Бэра:

$$H_{\text{sol}} = H_{S_{\text{sol}},0} (1 - r_s) \exp(-\varepsilon_{\text{abs}} d), \quad (7)$$

где $r_s \approx 0.2$ — коэффициент отражения воды; $\varepsilon_{\text{abs}} \approx 0.3 \text{ м}^{-1}$ — коэффициент поглощения солнеч-

ной радиации в воде; $d = |L_z - z|$ — глубина, м. Приток коротковолновой радиации $H_{Ssol,0}$ на поверхность озера определяется соотношением:

$$H_{Ssol,0} = \begin{cases} S_0 (a_g - a_w) \cos \zeta [a(C) + b(C) \ln(\cos \zeta)], & \cos(\zeta) > 0; \\ 0, & \cos(\zeta) \leq 0, \end{cases} \quad (8)$$

где $S_0 = 1367 \text{ Вт/м}^2$ — солнечная постоянная; $a(C)$ и $b(C)$ — эмпирические коэффициенты, зависящие от степени покрытия небесного свода облачностью C [37]; ζ — зенитный угол Солнца; эмпирические функции a_g и a_w представляют соответственно молекулярное рассеяние и поглощение перманентных газов.

Начальные условия для уравнений модели имеют вид

$$u = 0, \quad v = 0, \quad w = 0, \quad T = T_L, \quad S = S_L, \quad (9)$$

где T_L и S_L — температура и соленость воды в озере соответственно.

Граничные условия задаются следующим образом:

а) на поверхности озера

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad w = 0, \quad D_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{H_{net}}{\rho_0 c_p}, \quad \frac{\partial S}{\partial z} = 0, \quad (10)$$

где H_{net} — тепловой поток, состоящий из потоков длинноволновой радиации (H_{lw}), явного (H_S) и скрытого (H_L) тепла, параметризация которых осуществляется согласно расчетным формулам [16]:

$$1. \quad H_{lw} = \varepsilon_w \varepsilon_a \sigma (1 + 0.17C^2) T_A^4 - \varepsilon_w \sigma T^4, \quad (11)$$

где ε_w и ε_a — коэффициенты излучения воды и атмосферы соответственно, σ — коэффициент Стефана–Больцмана, T_A — температура воздуха, T — температура воды;

$$2. \quad \begin{aligned} H_L &= f_u (e_A - e_w), \quad f_u = 6.9 + 0.345 U^2, \\ e_w &= 6.112 \exp\left(\frac{17.67 (T_A - 273.15)}{T_A - 29.65}\right), \end{aligned} \quad (12)$$

где e_A — давление водяного пара в атмосфере, e_w — давление насыщенного водяного пара вблизи подстилающей поверхности, f_u — коэффициент массоотдачи, U — скорость ветра,

$$3. \quad H_S = 0.62 \frac{p_a}{p_0} f_u (T_A - T), \quad (13)$$

где p_a — атмосферное давление, $p_0 = 1013 \text{ гПа}$ — нормальное атмосферное давление;

б) на твердых границах

$$u = 0, \quad v = 0, \quad w = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial n} = 0, \quad (14)$$

где n — направление внешней нормали к области (на дне задаются условия прилипания, что общепринято в практике моделирования термобара [3, 4, 38]);

в) на границе раздела река–озеро

$$u = u_R, \quad v = 0, \quad w = 0, \quad T = T_R, \quad S = S_R, \quad (15)$$

где u_R — скорость речного притока, T_R и S_R — температура и соленость воды в устье реки соответственно;

г) на открытой границе задаются условия радиационного типа [17]

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + c_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (\phi = u, v, T, S) \quad (16)$$

и простые градиентные условия

$$\frac{\partial w}{\partial x} = 0. \quad (17)$$

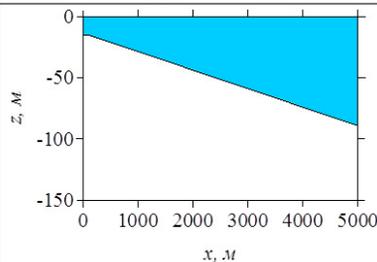
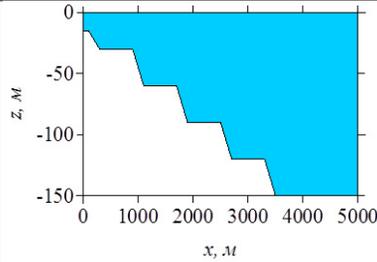
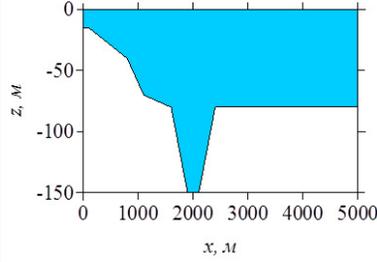
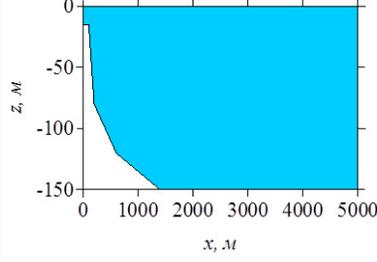
Замыкание системы уравнений осуществляется при помощи двухпараметрической $k - \omega$ -модели турбулентности [18] и алгебраических соотношений для определения турбулентной вязкости и диффузии [19]. Принятое в модели уравнение состояния $\rho = \rho(T, S, p)$ [20] справедливо в диапазоне $0 \leq T \leq 30^\circ\text{C}$, $0 \leq S \leq 0.6 \text{ г/кг}$, $0 \leq p \leq 180 \text{ бар}$.

Задача решается численно методом конечного объема, согласно которому скалярные величины (температура, соленость, турбулентные характеристики) определяются в центре сеточных ячеек, а компоненты вектора скорости — в середине грани ячеек. Для приближения вычислительной области к геометрии профиля дна водоема используется метод блокировки фиктивных областей [34]: путем задания больших значений коэффициента вязкости устанавливаются равными нулю компоненты вектора скорости в выключенной зоне. Численный алгоритм нахождения поля течения и скалярных величин базируется на разностной схеме Кранка–Николсон. Для аппроксимации конвективных слагаемых в уравнениях применяется противопотоковая схема QUICK [35]. Согласование рассчитываемых полей скорости и давления осуществляется с помощью оригинальной процедуры SIMPLED для течений с плавучестью, которая представляет собой модификацию известного метода SIMPLE [34]. Алгоритм SIMPLED корректирует поля скорости и давления с учетом вариации плотности в гравитационном члене уравнения (3). Решение системы разностных уравнений проводится методом Н.И. Булеева [36] и релаксации на каждом шаге по времени. Более детальное описание модели и метода численного решения уравнений (1)–(6) с начальными и граничными условиями (9)–(17) приведено в [21].

2. ПАРАМЕТРЫ ЗАДАЧИ

Для оценки влияния геометрии подводного рельефа на особенность развития термобара выполнена

Таблица. Геометрия профиля дна в вычислительных экспериментах

№ эксперимента	Словесное описание рельефа	Графическое представление
1	Пологий склон	
2	Ступенчатый профиль	
3	Желоб	
4	Крутой склон	

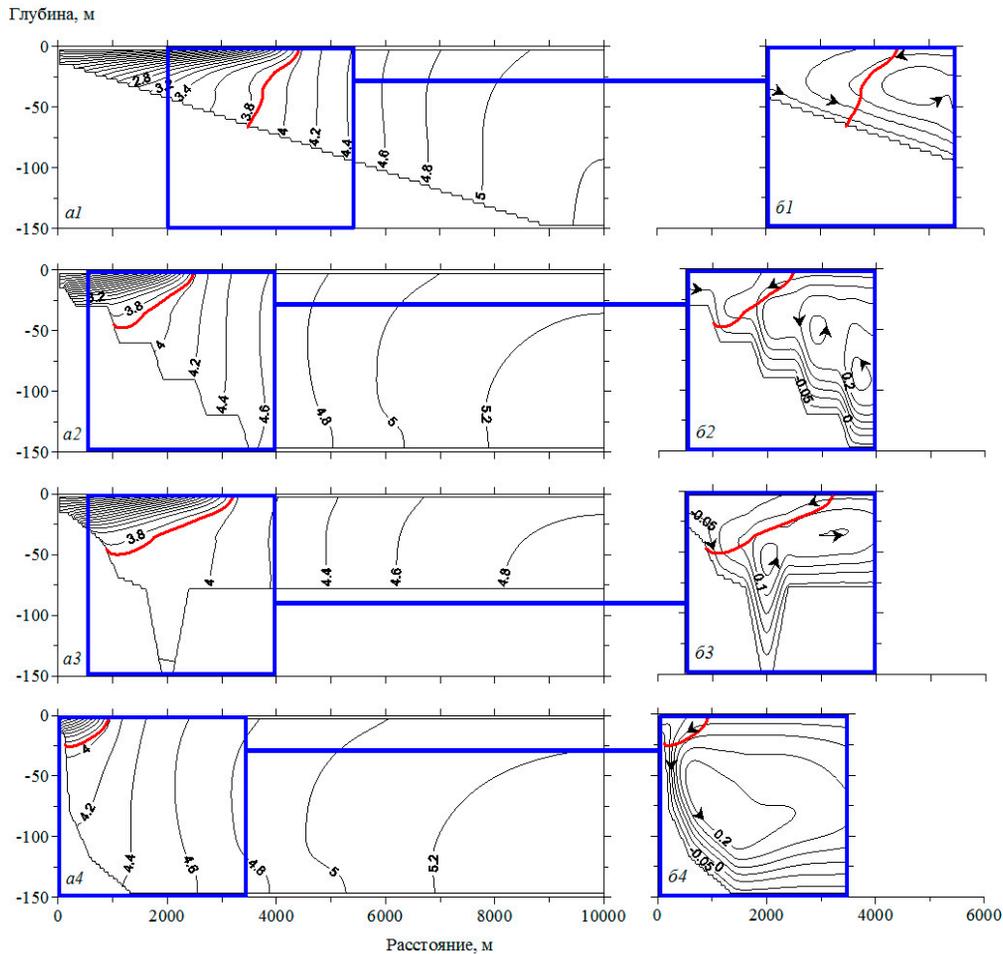
область (прибрежную часть водоема) по причине более высокой минерализации речного притока. Ранее проведенные исследования указывают на то, что в период развития осеннего термобара более минерализованные воды под действием силы тяжести имеют тенденцию интенсивно опускаться по склону, инициируя придонные течения [26].

В теплоинертной области (открытой части водоема) формируются циркуляционные потоки. Наблюдается следующая закономерность: чем круче склон, тем сильнее интенсивность циркуляции. Максимальная скорость движения вод на 10 сут в эксперименте № 1 составила 7 мм/с, в эксперименте № 2 — 10 мм/с, в эксперименте № 3 — 9 мм/с и в эксперименте № 4 — 15 мм/с. По мере развития термобара центр циркуляционных ячеек дислоцируется в нижний уровень.

В эксперименте № 1 интенсивность циркуляции самая низкая, а ширина зоны смешения вод наи-

большая. В этом случае течения, направленные ко дну водоема (рис. 1, б1), возникают от устья речного притока до зоны смешения теплоинертной области (часть речных вод непрерывно стекает по склону, а часть — погружается в результате перемешивания с озерными водами). С распространением термобара в центральную часть озера нисходящие вдольсклоновые потоки сохраняются (рис. 2, б1).

Отличительной особенностью эксперимента № 2 является формирование мелких вихрей над террасами (горизонтальными участками) ступенчатого склона (рис. 1, б2). Аналогичная закономерность, связанная с возникновением компенсационного подъемного течения на границе равнинного участка и глубоководного склона, наблюдалась для батиметрии озера Камлупс при легком, слабом и умеренном ветре [27]. Дальнейшее охлаждение водоема приводит к более четкой фрагментации этих вихревых структур (рис. 2, б2).



бина водоема: после прохождения термобара зоны глубоководного желоба его скорость существенно возрастает (рис. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов численного моделирования динамики осеннего термобара, выполненного для различных конфигураций подводного рельефа, можно сделать следующие выводы.

1. При *пологом склоне* движение водных масс в глубинную часть водоема осуществляется за счет нисходящих вдольсклоновых потоков и плотностной неустойчивости, инициируемой термобаром.

2. Особенность развития течений в случае *ступенчатого профиля* состоит в образовании мелких вихрей над террасами (горизонтальными участками) подводного склона.
3. Над *желобом* формируется достаточно устойчивое циркуляционное течение, которое может сохраняться даже при удалении фронта термобара от зоны желоба.
4. В условиях *крутого склона* вдольсклоновые потоки способны генерировать крупномасштабный вихрь, препятствующий развитию термобара.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-71-00013, <https://rscf.ru/project/21-71-00013/>.

- [1] Тихомиров А.И. Термика крупных озер. Л., 1982.
- [2] Блохина Н., Показеев К.В. // Земля и Вселенная. № 6. 78. (2015).
- [3] Holland P.R., Kay A., Botte V. // J. Mar. Syst. **43**, N 1-2. 61. (2003).
- [4] Malm J. // Nordic Hydrology. **26**, N 4-5. 331. (1995).
- [5] Demchenko N.Yu., Chubarenko I.P. // Water Quality Res. J. Can. **47**, N 3-4. 436. (2012).
- [6] Farrow D.E. // EJAM. **24**, N 2. 161. (2003).
- [7] Tsvetova E.A. // Hydrobiologia. **407**. 37. (1999).
- [8] Блохина Н., Орданович А.Е., Савельева О. // Вод. ресурсы. **28**, № 2. 224. (2001). (Blokhina N.S., Ordanovich A.E., Savel'eva O.S. // Water Resources. **28**, N 2. 201. (2001)).
- [9] Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б., Дьяченко А.В., Марусин К.В. // Метеорология и гидрология. **5**. 86. (2021).
- [10] Чубаренко И.П. Горизонтальная конвекция над подводными склонами. Калининград: Терра Балтика, 2010.
- [11] Holland P.R., Kay A. // Limnologia. **33**, N 3. 153. (2003).
- [12] Huang J.S.K. // Geophys. Fluid Dyn. **3**. 1. (1972).
- [13] Верещагин Г.Ю. Труды 2-го Всесоюзного гидрологического съезда в Ленинграде. **2**. 275. (1929).
- [14] Блохина Н., Селин Д.И. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. № 1. 58. (2019). (Blokhina N.S., Selin D.I. // Moscow Univ. Phys. Bull. **74**, N 1. 64. (2019)).
- [15] Блохина Н.С. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. № 4. 102. (2015). (Blokhina N.S. // Moscow Univ. Phys. Bull. **70**, N 4. 102. (2015)).
- [16] Tsydenov B.O., Starchenko A.V. // Proc. SPIE. **9680**. 96800H. (2015).
- [17] Orlanski I. // J. Comput. Phys. **21**, N 3. 251. (1976).
- [18] Wilcox D.C. // AIAA J. **26**, N 11. 1299. (1988).
- [19] Цыденов Б.О., Старченко А.В. // Вест. Том. гос. ун-та. Матем. и мех. № 5(31). 104. (2014).
- [20] Chen C.T., Millero F.G. // Limnol. Oceanogr. **31**, N 3. 657. (1986).
- [21] Tsydenov B.O., Kay A., Starchenko A.V. // Ocean Modelling. **104**. 73. (2016).
- [22] Shimaraev M.N., Verbolov V.I., Granin N.G., Sherstyankin P.P. Physical Limnology of Lake Baikal: a Review. Irkutsk–Okayama, 1994.
- [23] Вотинцев К.К. В кн.: Проблемы Байкала. **16**, № 36. 124. (1978).
- [24] Tsydenov B.O. // Atmos. Ocean. Opt. **34**, N 6. 603. (2021).
- [25] Расписание Погоды [Электронный ресурс]. URL: <https://gr5.ru/> (дата обращения: 21.07.2022).
- [26] Цыденов Б.О. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. № 4. 94. (2018). (Tsydenov B.O. // Moscow Univ. Phys. Bull. **73**, N 4. 435. (2018)).
- [27] Цыденов Б.О. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. № 1. 105. (2022). (Tsydenov B.O. // Moscow Univ. Phys. Bull. **77**, N 1. 61. (2022)).
- [28] Bennett J.R. // Proc. 14th Conf. Great Lakes Res. Ann Arbor, 1971. 535.
- [29] Верболов В.И., Сокольников В.М., Шимараев М.Н. Гидрометеорологический режим и тепловой баланс озера Байкал. М.–Л.: Наука, 1965.
- [30] Сокольников В.М. // Труды Лимнол. ин-та СО АН СССР. **5**(25). 5. (1964).
- [31] Likhoshvay Y.V., Kuzmina A.Ye., Potyemkina T.G. et al. // J. Great Lakes Res. **22**, N 1. 5. (1996).
- [32] Цветова Е.А. // Вычисл. технологии. № 2(2). 102. (1997).
- [33] Цветова Е.А. // Прикладная механика и техническая физика. **39**, № 4. 127. (1998). (Tsvetova E.A. // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. **39**, N 4. 593. (1998)).
- [34] Patankar S. Numerical heat transfer and fluid flow. CRC Press, 1980.
- [35] Leonard B. // Comput. Meth. Appl. Mech. Engineer. **19**, N 1. 59. (1979).
- [36] Ильин В.П. Методы неполной факторизации для решения алгебраических систем. М.: Физматлит, 1995.
- [37] Александрова М.П., Гулев К., Синицын А.В. // Метеорология и гидрология. № 4. 45. (2007). (Aleksandrova M.P., Gulev S.K., Sinitsyn A.V. // Russian Meteorology and Hydrology. **32**, N 4. 245. (2007)).
- [38] Блохина Н., Борзык В.А. // Известия РАН. Серия физическая. **86**, № 1. 142. (2022). (Blokhina N.S., Borzykh V.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **86**. 100. (2022)).

Effect of underwater relief on the dynamics of the autumnal thermal bar

В. О. Тsydenov

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Laboratory for Atmospheric Prediction

Tomsk 634055, Russia

E-mail: tsydenov@iao.ru

Through numerical modelling techniques, data were obtained on how underwater slopes influence the dynamics of a thermal bar and the related circulations during the water body's autumn cooling. Different geometries of the bottom topography were analyzed, aligning with configurations such as «gentle slope», «stepped profile», «trench», and «steep slope». It was determined that in the autumn, the flow structure, the formation timeframes, and the thermal bar propagation speed are significantly influenced by the morphological features of the lake bottom.

PACS: 92.40.Cy

Keywords: autumnal thermal bar, temperature of maximum density, underwater relief, mathematical model, numerical experiment.

Received 2023.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2023. **78**, No. 5, pp. 689–696.

Сведения об авторе

Цыденов Баир Олегович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (3822) 492-404, e-mail: tsydenov@iao.ru.