

Влияние силы Кориолиса и ветра на динамику осеннего термобара

Б. О. Цыденов^a

Национальный исследовательский Томский государственный университет, механико-математический факультет, научно-исследовательская лаборатория вычислительной геофизики. Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, д. 36.

Поступила в редакцию 24.06.2018, после доработки 30.07.2018, принята к публикации 01.08.2018.

Методами численного моделирования проведено исследование влияния силы Кориолиса и ветрового трения на гидродинамические процессы в озере Камлупс во время развития осеннего термобара с использованием метеорологических данных с 01.12.2017 г. по 30.12.2017 г. Установлено, что кориолисовы силы в сочетании с сильными ветрами, генерирующими крупномасштабные циркуляционные потоки водных масс, оказывают существенное влияние на скорость течения во вдольбереговом направлении. Анализ пространственных распределений физических параметров показал, что усиление западных ветров, направленных против горизонтального движения термического фронта, приводит к смещению индуцированной силой Кориолиса циклонической циркуляции в нижние слои водной толщи.

Ключевые слова: термобар, сила Кориолиса, ветровое трение, математическая модель, температура максимальной плотности, численный эксперимент, озеро Камлупс.

УДК: 519.6, 556.5. PACS: 92.40.Cy.

ВВЕДЕНИЕ

Во время весеннего прогрева и осеннего выхолаживания озер умеренных широт возникает термобар – явление, представляющее собой погружение вод в узкой зоне в окрестности изотермы 4°C, соответствующей температуре максимальной плотности (ТМП) [1–3]. Опускание водных масс внутри термического фронта происходит за счет увеличения плотности при смешении вод [4]. В результате водоем делится на области с температурой выше и ниже ТМП (согласно Тихомирову [2] на теплоактивную и теплоинертную области в прибрежном и глубоководном участках соответственно). Формируя барьер для горизонтального водообмена, термобар оказывает значительное влияние на экологическое функционирование озера [5–7].

Под действием силы Кориолиса возникают течения вдоль фронта термобара. Эти течения состоят из циклонической (в теплоактивной области) и антициклонической (в теплоинертной области) циркуляций [2]. Несмотря на боковое смещение водных масс во вдольбереговом направлении, потоки, сходящиеся на месте расположения термобара, как правило, подавляют межфронтальный водообмен [8]. Роль кориолисовых сил в поведении термобара при отсутствии ветрового трения описана в работах [9–12]. Моделирование конвективных процессов во время эволюции термобара с учетом компонент силы Кориолиса показывает, что для крупных озер вдольбереговое течение является преобладающим [13, 14]. Поэтому при воспроизведении термобара очень важно включать в модель эффект вращения Земли.

Ветер может служить причиной формирования новых циркуляций в озере [15–17]. В связи с этим особый интерес представляет исследование термобара с учетом ветровых течений и вращения Земли. Целью настоящей работы является изучение влияния силы Кориолиса на особенность развития осеннего термобара в озере Камлупс с учётом реальной внутрисуточной изменчивости ветра методами численного моделирования.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

1.1. Основные уравнения модели

Негидростатическая математическая модель для воспроизведения гидродинамических процессов в водоеме, учитывающая влияние силы Кориолиса, включает в себя уравнения количества движения (1)–(3), неразрывности (4), энергии (5), баланса солености (6):

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

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

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

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

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

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

где u и v – горизонтальные компоненты скорости (вдоль осей x и y соответственно); w – вертикальная компонента скорости (вдоль оси z) (рис. 1); T – температура; S – соленость; K_x (D_x) и K_z (D_z) – коэффициенты турбулентной вязкости (диффузии) в соответствующих направлениях; g – ускорение свободного падения; c_p – удельная теплоёмкость; p – давление; ρ_0 – плотность воды при стандартном атмосферном давлении. Компоненты вектора угловой скорости вращения Земли в декартовой системе координат имеют вид:

^a E-mail: tsydenov@math.tsu.ru

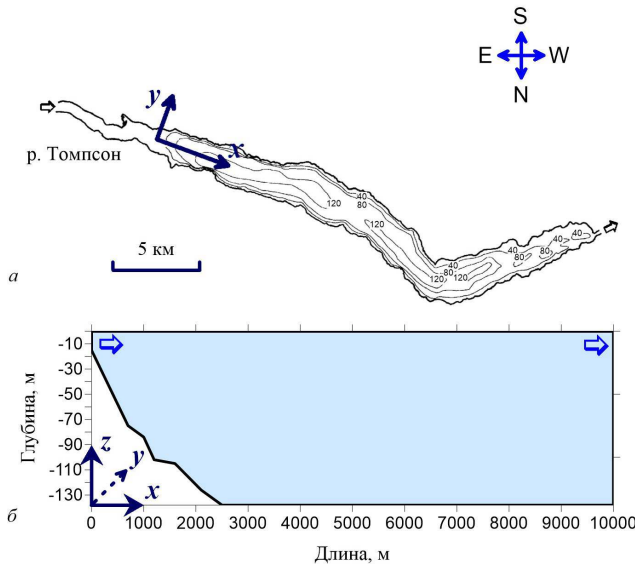


Рис. 1. Озеро Камлупс: а – батиметрия, б – расчетная область

$$\begin{cases} \Omega_x = \Omega_E \cos \varphi \sin \theta; \\ \Omega_y = \Omega_E \cos \varphi \cos \theta; \\ \Omega_z = \Omega_E \sin \varphi, \end{cases}$$

где Ω_E – угловая скорость вращения Земли, φ – географическая широта, θ – угол сечения относительно востока.

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

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

где $r_s \approx 0.2$ – коэффициент отражения воды; $\epsilon_{\text{abs}} \approx 0.3 \text{ м}^{-1}$ – коэффициент поглощения солнечной радиации в воде; $d = |L_z - z|$ – глубина, м (L_z – высота расчетной области). Приток коротковолновой радиации $H_{S_{\text{sol},0}}$ на поверхность озера определяется соотношением

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

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 [18]; ζ – зенитный угол Солнца; эмпирические функции a_g и a_w представляют соответственно молекулярное рассеяние и поглощение перманентных газов и рассчитываются

$$a_g = 0.485 + 0.515 \left(1.014 - 0.16 / \sqrt{\cos \zeta} \right),$$

$$a_w = 0.039 (r_w / \cos \zeta)^{0.3}$$

(r_w – содержание водяного пара в атмосфере, кг/м^3).

Коэффициенты интенсивности диффузионного переноса импульса и тепла определяются на основе k – ω модели турбулентности [19, 20]. Плотность воды рассчитывается по формуле Чена–Миллера [21]. Детальное описание метода численного решения уравнений модели приведено в [22, 23].

1.2. Начальные и граничные условия

Начальные условия ($t = 0$) для уравнений модели задаются в виде

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

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

Граничные условия для уравнений имеют вид:

а) На границе раздела вода–воздух

$$K_z \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau_{\text{surf}}^u}{\rho_0}; \quad K_z \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\tau_{\text{surf}}^v}{\rho_0}; \quad w = 0;$$

$$D_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{H_{\text{net}}}{\rho_0 c_p}; \quad \frac{\partial S}{\partial z} = 0,$$

где H_{net} – тепловой поток, включающий компоненты длинноволновой радиации, скрытого и явного тепла, параметризация которых осуществляется по расчетным формулам модели № 3 из [24]; касательное напряжение трения ветра на поверхности озера описывается законом

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

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

здесь ρ_a – плотность воздуха у поверхности воды; u_{10} , v_{10} – составляющие скорости ветра на высоте 10 м над поверхностью озера; $c_{10} = 1.3 \times 10^{-3}$;

б) На твердых границах (на дне)

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

где n – направление внешней нормали к области;

в) На границе раздела река–озеро

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

где u_R – скорость притока в устье реки; T_R и S_R – температура и соленость воды в реке соответственно;

г) На открытой границе ($x = L_x$, где L_x – длина расчетной области) задаются условия радиационного типа и простые градиентные условия

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

здесь фазовая скорость c_ϕ рассчитывается из пространственных и временных тенденций внутри области [25].

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПАРАМЕТРЫ ЗАДАЧИ

Рассматривается вертикальное сечение озера Камлупс, расположенного на юго-западе Канады (провинция Британская Колумбия) в 340 км северо-восточнее Ванкувера между $50^\circ 26' - 50^\circ 45'$ с.ш. и $120^\circ 03' - 120^\circ 32'$ з.д. по течению реки Томпсон и имеющего вытянутую форму (рис. 1, а). Расчетная область имеет протяженность 10 км и глубину 138 м (рис. 1, б), ось x направлена по течению р. Томпсон, начало системы координат совпадает с устьем реки (рис. 1, а).

Начальная температура воды в озере имеет вертикально неоднородное распределение

$$T_L(z) = 0.00004d^2 - 0.0156d + 279.6,$$

что соответствует термическому режиму водоема в осенний период [22]. Температура поступающей в озеро воды речного притока меняется, согласно данным измерений гидрографических станций, в диапазоне от 2.8 до 0.35°C [26]. Скорость р. Томпсон на границе раздела река–озеро составляет 3×10^{-3} м/с, минерализация воды в озере равна 0.1 г/кг [27]. Вычислительная область (рис. 1, б) покрыта равномерной ортогональной сеткой с шагами $h_x = 25$ м и $h_z = 3$ м. Шаг по времени – 60 с.

Данные о скорости и направлении ветра, температуре воздуха, относительной влажности, атмосферном давлении, облачности взяты из архива погодных условий метеостанции г. Камлупс в период с 01.12.2017 г. по 30.12.2017 г. (<http://climate.weather.gc.ca>).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Анализ данных по ветровому режиму в декабре 2017 г., согласно данным метеорологической станции г. Камлупс (рис. 2, а, б), указывает на преобладание восточных ветров. Ветры западного и северного направлений имеют эпизодический характер (рис. 2, а). Усиление ветра >10 м/с наблюдалось на 19 и 29 сут месяца (рис. 2, б). Среднемесячное значение скорости ветра составило 3.1 м/с.

Для оценки степени влияния силы Кориолиса и ветра на поведение термобара проведены вычислительные эксперименты при наличии и отсутствии ветрового трения на границе раздела вода–воздух. Динамика перемещения области расположения ТМП на поверхности озера (рис. 2, в) показывает, что образование

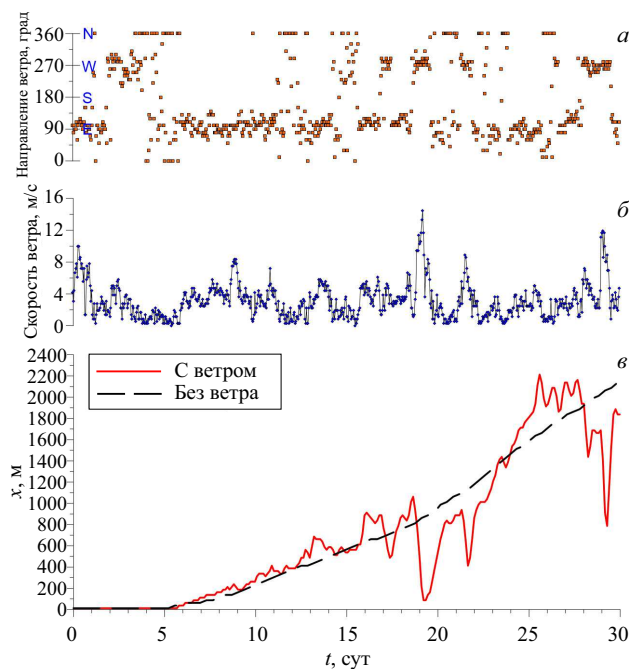


Рис. 2. Направление (а) и скорость (б) ветра согласно данным метеорологической станции г. Камлупс в период с 01.12.2017 г. по 30.12.2017 г. (местное стандартное время); динамика горизонтального перемещения области расположения ТМП на поверхности озера (в)

термобара происходит на 6 сут вблизи устья речного притока. Слабые и умеренные ветры восточного направления на начальной стадии эволюции термобара способствуют переносу более холодных вод мелководья в центральную часть водоема. Следует заметить, что по мере удаления термического фронта от устья реки роль ветра возрастает: умеренные восточные ветры на 14 и 17 сут дают больший вклад в развитие конвективных процессов, чем на интервале 6–11 сут. Видно (рис. 2, в), что усиление ветров западного направления на 19 и 29 сут приводит к смещению водных масс с открытого озера в прибрежную область.

Согласно распределению температуры (рис. 3, а1) и линиям тока (рис. 3, б1) в случае отсутствия ветрового напряжения на поверхности озера термобар на 19 сут достигает расстояния 750 м от устья притока. В теплоинертной области формируется крупное вихревое течение (рис. 3, б1). Сильные западные ветры генерируют интенсивную циркуляцию по всему озеру (рис. 3, б2). Благодаря этим ветрам, направленным против движения термического фронта, в верхней 30-метровой толще происходит перенос более теплых вод из центральной части в прибрежную зону, который замедляет горизонтальное развитие термобара (рис. 3, а2).

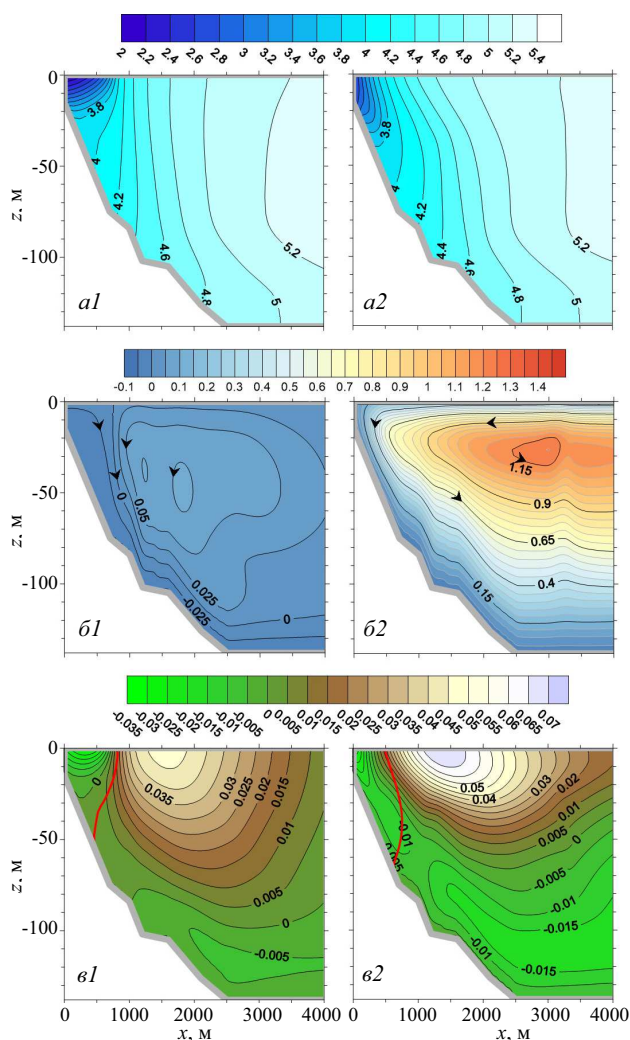


Рис. 3. Изотермы (а) (°C), линии тока (б) (м²/с) и поперечная компонента скорости (в) (м/с) на 19 сут в вычислительных экспериментах при отсутствии (1) и наличии (2) ветра. Жирной линией (в) показана изотерма 4°C

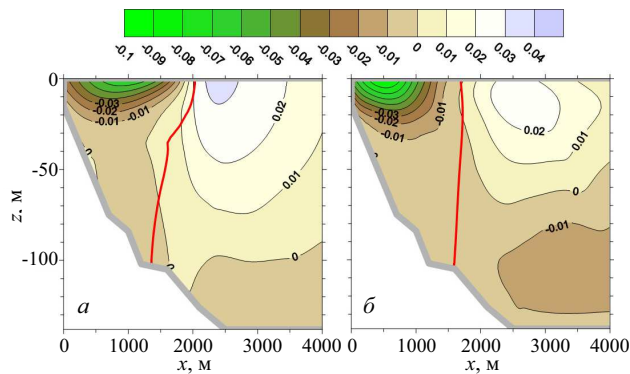


Рис. 4. Поперечная компонента скорости (м/с) на 29 сут в вычислительных экспериментах при отсутствии (а) и наличии (б) ветра. Жирной линией показана изотерма 4 °С

Нисходящие вдольсклоновые потоки, возникающие в приустьевой области, увлекуают более холодные речные воды в нижние слои (рис. 3, а2, б2).

Отрицательное значение поперечной компоненты скорости в теплоактивной области (рис. 3, в1) указывает на то, что сила Кориолиса является причиной возникновения вдольберегового течения, направленного на север (циклонической циркуляции). В процессе эволюции термобара скорость такого течения увеличивается и на 29 сут достигает 7 см/с (рис. 4, а). Методами натуральных наблюдений выявлено, что втекающий в озеро Камлупс речной поток отклоняется вправо [26], что согласуется с полученными результатами моделирования. В теплоинертной области поперечная компонента скорости направлена на юг: развивается антициклоническая циркуляция (рис. 3, в1). С продвижением термобара в центральную часть водоема антициклоническая циркуляция ослабевает (рис. 4, а). При этом термобар расположен на границе раздела этих двух противоположно направленных поперечных потоков.

Ветер, индуцируя крупномасштабные циркуляционные потоки в водоеме, оказывает заметное влияние на скорость течения во вдольбереговом направлении. Активное воздействие ветров западного направления на водную поверхность озера привело к смещению циклонической циркуляции в нижний уровень (рис. 4, б). Так как эти ветры ограничивают горизонтальное перемещение термобара, то система циклонических потоков распространяется в центр озера медленнее. Сравнивая изолинии поперечной компоненты скорости, полученные на 29 сут (рис. 4, а, б), можно заключить, что в результате ветровой нагрузки максимальная скорость поперечного движения водных масс в теплоактивной области увеличилась с 7 до 9 см/с. При этом в теплоинертной области происходит ослабление антициклонической циркуляции и сдвиг ее максимума в нижний слой водной толщи (рис. 4, б). Важно заметить, что благодаря эпизодическому возникновению северо-западных ветров на фоне длительных внутрисуточных ветров западного направления на 19 сут (в отличие от картины на 29 сут) наблюдается изменение максимального значения скорости поперечного течения в теплоинертной области с 5 до 7 см/с (рис. 3, в1, в2). Порядок полученных в результате моделирования скоростей поперечных потоков находится в согласии с известными литературными данными [8, 13, 28].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Математическое моделирование продемонстрировало следующие эффекты учета в модели кориолисовых сил и ветровой активности на особенность формирования циклонической и антициклонической циркуляций в водоеме, влияющих на развитие осеннего термобара.

1. В процессе продвижения термобара в центральную часть озера происходит усиление циклонической циркуляции.
2. Интенсивная ветровая нагрузка является причиной смещения вдольбереговых (параллельных фронту термобара) течений в теплоактивной области к нижней границе водоема.
3. Эпизодическое возникновение северо-западных ветров на фоне длительных внутрисуточных ветров западного направления ведет к увеличению скорости антициклонической циркуляции.

Автор выражает благодарность рецензентам за ценные замечания, позволившие улучшить текст статьи.

Данное научное исследование (№ 8.1.47.2018) выполнено при поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Forel F. A. // L'Écho des Alpes. 1880. N 3. P. 149.
2. Тухомиров А. И. Термика крупных озер. Л., 1982.
3. Чубаренко И. П. Горизонтальная конвекция над подводными склонами. Калининград: Terra Балтика, 2010.
4. Shimaraev M. N., Granin N. G., Zhdanov A. A. // *Limnol. Oceanogr.* 1993. **38**. P. 1068.
5. Moll R. A., Bratkovich A., Chang W. Y. B., Pu P. // *Estuaries.* 1993. **16**, N 1. P. 92.
6. Блохина Н. С., Показеев К. В. // Земля и Вселенная. 2015. № 6. С. 78.
7. Tsydenov B. O., Kay A., Starchenko A. V. // *Ocean Modelling.* 2016. **104**. P. 73.
8. Holland P. R., Kay A. // *Limnologica.* 2003. **33**, N 3. P. 153.
9. Holland P. R., Kay A., Botte V. // *J. Mar. Syst.* 2003. **43**, N 1–2. P. 61.
10. Farrow D. E., McDonald N. R. // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2002. **107**, N 5. P. 1–1.
11. Цветова Е. А. // Прикладная механика и техническая физика. 1998. **39**, № 4. С. 127. (Tsvetova E. A. // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics.* 1998. **39**, N 4. P. 593.)
12. Блохина Н. С., Соловьев Д. А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2010. № 3. С. 44. (Blokhina N. S., Solovov D. A. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2010. **65**, N 3. P. 203.)
13. Bennett J. R. // Proc. 14th Conf. Great Lakes Res. Ann Arbor, 1971. P. 535.
14. Huang J. C. K. // *J. Phys. Oceanogr.* 1971. **1**. P. 105.
15. Блохина Н. С. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2015. № 4. С. 102. (Blokhina N. S. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2015. **70**, N 4. P. 102.)
16. Malm J. // *Nordic Hydrology.* 1995. **26**, N 4–5. P. 331.
17. Tsydenov B. O. // *J. Mar. Syst.* 2018. **179**. P. 1.
18. Александрова М. П., Гулев С. К., Синицын А. В. // Метеорология и гидрология. 2007. № 4. С. 45. (Aleksandrova M. P., Gulev S. K., Sinityn A. V. // *Russian Meteorology and Hydrology.* 2007. **32**, N 4. P. 245.)
19. Wilcox D. C. // *AIAA J.* 1988. **26**, N 11. P. 1299.
20. Цыденов Б. О., Старченко А. В. // Вест. Том. гос. ун-та. Матем. и мех. 2014. № 5(31). С. 104.
21. Chen C. T., Millero F. G. // *Limnol. Oceanogr.* 1986. **31**, N 3. P. 657.

22. Цыденов Б. О. Численное моделирование эффекта весеннего термобара в глубоком озере: дисс. . . . канд. физ.-мат. наук. Томск. 2013.
23. Цыденов Б. О. // Вестник Том. гос. ун-та. Матем. и мех. 2016. № 3(41). С. 86. (Tsydenov B. O. // *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta-Matematika I Mekhanika — Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2016. 3. P. 86.)
24. Tsydenov B. O., Starchenko A. V. // *Proc. SPIE*. 2015. **9680**. 96800H.
25. Orlanski I. // *J. Comput. Phys.* 1976. **21**, N 3. P. 251.
26. John B. E. St., Carmack E. C., Daley R. J. et al. The limnology of Kamloops Lake, B. C. Vancouver, 1976.
27. Holland P. R. Numerical modelling of the riverine thermal bar: Ph.D. Thesis. Loughborough, 2001.
28. Malm J., Zilitinkevich S. // *Boundary-Layer Meteorol.* 1994. **71**, N 3. P. 219.

The Effect of the Coriolis Force and Wind on the Dynamics of the Fall Thermal Bar

B. O. Tsydenov

*Computational Geophysics Laboratory, Faculty of Mechanics and Mathematics, Tomsk State University.
Tomsk 634050, Russia.
E-mail: tsydenov@math.tsu.ru.*

The effect of the Coriolis force and wind stress on hydrodynamic processes in Kamloops Lake during the development of the fall thermal bar is investigated using numerical simulation methods and meteorological data for December 1–30, 2017. It has been found that Coriolis forces in combination with strong winds that generate large scale circulation flows of water masses have a significant impact on the alongshore flow velocity. The analysis of the spatial distributions of physical parameters showed that strong westerly winds directed opposite to the horizontal movement of the thermal front lead to a shift of the cyclonic circulation induced by the Coriolis force into the lower layers of the water column.

Keywords: thermal bar, Coriolis force, wind activity, mathematical model, temperature of maximum density, numerical experiment, Kamloops Lake.

PACS: 92.40.Cy.

Received 24 June 2018.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2019. **74**, No. 1. Pp. 70–76.

Сведения об авторе

Цыденов Баир Олегович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (3822) 78-35-93, e-mail: tsydenov@math.tsu.ru.