ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Численное моделирование ветрового воздействия на перенос примеси загрязняющих веществ в Селенгинском мелководье оз. Байкал в период существования 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 09.09.2019, после доработки 14.10.2019, принята к публикации 14.10.2019.

В работе представлены результаты математического моделирования транспорта примеси загрязняющих веществ в Селенгинском мелководье озера Байкал во время развития осеннего термобара. Проведен анализ пространственных распределений загрязнения при различных ветровых сценариях. Вычислительные эксперименты продемонстрировали, что при охлаждении мелководья структура изолиний концентрации примеси зависит от направления ветра.

Ключевые слова: загрязнение водоема, численное моделирование, осенний термобар, ветровое перемешивание, Селенгинское мелководье, озеро Байкал.
УДК: 519.6, 556.5. PACS: 92.40.Cy.

ВВЕДЕНИЕ

Формирование термобара (природного явления, представляющего собой узкую зону погружения вод при температуре максимальной плотности [1, 2]) в озере Байкал происходит в заливах (Малое Море, Чивыркуйский), мелководьях (Селенгинское) и вблизи относительно приглубых прибрежных участков [3]. На Селенгинском мелководье постоянно наблюдаются температурные контрасты между речными и озерными водами, которые являются причиной возникновения термической конвекции и термобаров [4]. Кроме того, воды р. Селенги по своим гидрооптическим характеристикам резко отличаются от вод оз. Байкал [5].

Ветер играет важнейшую роль в гидродинамике термобара [6–8], особенно в периоды осеннего охлаждения водоема [9, 10]. Воздействие ветра может приводить к смещению зоны конвергенции водных масс относительно изотермы 4 °C на поверхности озера или же полному разрушению фронта термобара [11, 12]. Изменчивым (по направлению и силе) ветровым воздействием на водоем объясняется вариативный режим течения в Селенгинском мелководье оз. Байкал [13].

Известно, что термобар в крупных озерах выполняет функцию барьера, ограничивающего распространение прибрежных вод с высокой концентрацией загрязнений и биоты в центральную часть [14–16]. В то же время вертикальные потоки, образующиеся вследствие термобарической неустойчивости, могут способствовать переносу загрязняющих веществ в глубоководную область водоема [2, 17]. Конвективные и динамические процессы в Селенгинском мелководье в периоды существования термобара приводят к тому, что взвешенные и растворенные вещества природного и антропогенного происхождения попадают в озеро в хорошо смешанном виде [4]. Фронт термобара на Селенгинском мелководье представляет четкую границу между желтоватыми прибрежными и прозрачными озерными водами [13].

Целью настоящей работы является численное изучение влияния ветра на особенность распределения концентрации примеси загрязняющих веществ в Селенгинском мелководье озера Байкал во время существования осеннего термобара.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

1.1. Основные уравнения модели

В работе рассматривается область длиной $L_x = 10$ км и глубиной $L_z = 66$ м, представляющая собой вертикальный разрез в районе впадения р. Селенги в оз. Байкал (рис. 1). Задача решается в системе координат Ox, Oy, Oz (начало отсчета совпадает с устьем речного притока). Ось Ox направлена в центр озера, Oy — вдоль берега, Oz — вертикально вверх (рис. 1).

Негидростатическая 2.5D-модель для воспроизведения процессов распространения загрязняющих веществ в пресноводном озере включает следующие уравнения:

1) уравнение концентрации примеси

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_z \frac{\partial C}{\partial z}\right);$$

2) уравнения количества движения

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

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

[a] E-mail: tsydenov@math.tsu.ru

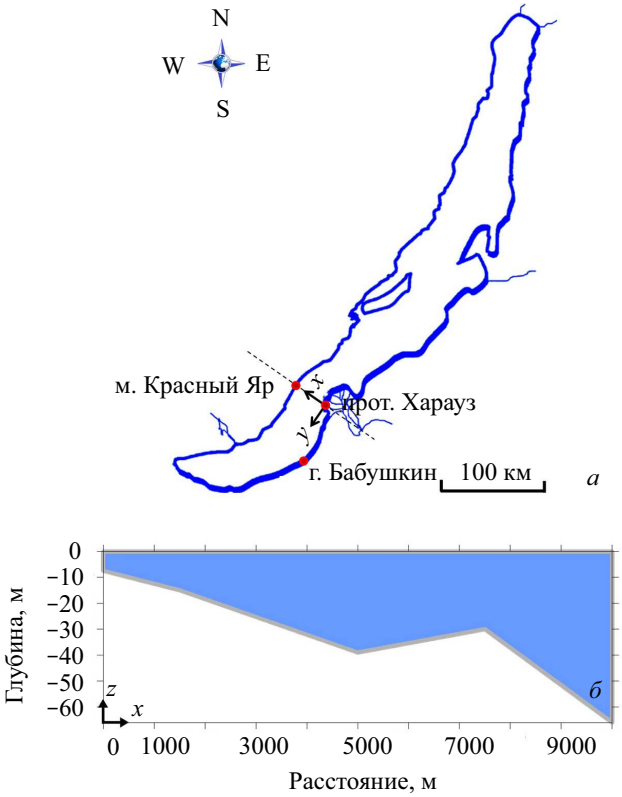

Рис. 1. Разрез прот. Хараузъ — м. Красный Яр: *а* — схема разреза, *б* — вычислительная область

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

3) уравнение неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial z}=0;$$

4) уравнение энергии

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

5) уравнение минерализации

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

где C — концентрация примеси; u, 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 — соленость; p — давление; ρ_0 — максимальная плотность пресной воды (999.975 кг/м^3).

Поглощение солнечной радиации H_{sol} рассчитывается по закону Бугера—Ламберта—Бэра:

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

где $H_{S\text{sol},0}$ — поток коротковолновой (солнечной) радиации на поверхности водоема [17, 18]; $r_s\approx 0.2$ — коэффициент отражения воды; $\epsilon_{\text{abs}}\approx 0.3$ м$^{-1}$ — коэффициент поглощения солнечной радиации в воде; $d=|L_z-z|$ — глубина, м.

Плотность воды вычисляется по формуле Чена—Миллеро [19]. Коэффициенты интенсивности диффузионного переноса импульса и тепла определяются на основе k—ω-модели турбулентности [20].

1.2. Начальные и граничные условия

Начальные условия (при $t=0$) для уравнений модели имеют вид

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

где $T_L(z)$ и S_L — температура и соленость воды в озере соответственно, t — время.

Граничные условия задаются в виде:

1) *на границе раздела вода—воздух* —

$$K_z\frac{\partial u}{\partial z}=\frac{\tau^u_{\text{surf}}}{\rho_0};\quad K_z\frac{\partial v}{\partial z}=\frac{\tau^v_{\text{surf}}}{\rho_0};\quad w=0;$$
$$\frac{\partial C}{\partial z}=0;\quad D_z\frac{\partial T}{\partial z}=\frac{H_{\text{net}}}{\rho_0 c_p};\quad \frac{\partial S}{\partial z}=0,$$

где H_{net} — тепловой поток, включающий компоненты длинноволновой радиации, скрытого и явного тепла; сдвиговое напряжение ветра на поверхности озера описывается законом

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

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

2) *на твердых границах (на дне)* —

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

где n — направление внешней нормали к области;

3) *на границе раздела река—озеро* —

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

где u_R — скорость притока в устье реки; C_R, T_R и S_R — концентрация примеси загрязнения, температура и соленость воды в реке соответственно;

4) *на открытой границе* задаются условия радиационного типа [21] и простые градиентные условия

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

2. ОБЛАСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПАРАМЕТРЫ ЗАДАЧИ

Селенгинское мелководье находится между 51.9°–52.5° с. ш. и 106.1°–106.9° в. д., геометрически представляет собой мощный конус, сформировавшийся в результате аккумуляции наносов [22]. Областью исследования является поперечное сечение в районе впадения р. Селенги в оз. Байкал: прот. Харауз — м. Красный Яр (рис. 1, *а*). Данные о рельефе дна, соответствующие указанному разрезу, взяты из работы [23].

Вычислительная область имеет протяженность 10 км и глубину 66 м (рис. 1, *б*). Глубина открытого участка речного стока (на левой границе) составляет 7.5 м. Расчетная область покрыта равномерной ортогональной сеткой с шагами $h_x = 12.5$ м и $h_z = 1.5$ м. Шаг по времени — 60 с.

Принятое в модели вертикально неоднородное распределение температуры воды приближенно соответствует среднемноголетним значениям в южной котловине озера Байкал в октябре [24]. Температура воды речного притока равномерно уменьшается с 2 до 1°C, что отражает реальный термический режим протоки Харауз в моделируемый период [4]. Минерализация воды в озере составляет 96 мг/кг [24], в реке варьируется от 185 до 200 мг/кг [4]. Скорость впадения протоки Харауз в озеро Байкал принята равной 0.2 см/с [25]. Компоненты тепловых потоков, поступающих на водное зеркало, вычислены по расчетным формулам, приведенным в работе [26], на основе данных по температуре воздуха, относительной влажности, атмосферному давлению, облачности, а также скорости и направлению ветра (рис. 2) из архива погодных условий метеостанции г. Бабушкина в период с 1 по 30 ноября 2015 г. Значение концентрации примеси в устье речного притока задано равным 1 г/м^3.

Разрезу прот. Харауз — м. Красный Яр соответствует географическая широта 52.25°, угол сечения относительно востока равен 150°.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численное исследование динамики термобара на Селенгинском мелководье озера Байкал в ноябре 2015 г. подробно изложено в [27]. В настоящей работе будут представлены результаты по распределению концентрации примеси, полученные при различных ветровых сценариях во время существования осеннего термобара.

В период с 1 по 30 ноября 2015 г. преобладали ветры западного направления, среди которых западо-юго-западные ветры наиболее были продолжительными в первой декаде месяца, западо-северо-западные ветры — во второй, и юго-западные — в третьей (рис. 2, *а*). Эти данные находятся в согласии со сведениями среднемноголетних наблюдений в периоды открытого от льда озера [24], в т. ч. во время существования весеннего термобара в мае 2015 г. [8]. Среднее значение скорости ветра на рассматриваемом интервале времени составило 4.1 м/с, что ниже данных наблюдений над поверхностью Южного Байкала и близлежащих районов за аналогичный месяц (5.2 м/с) и выше среднегодового

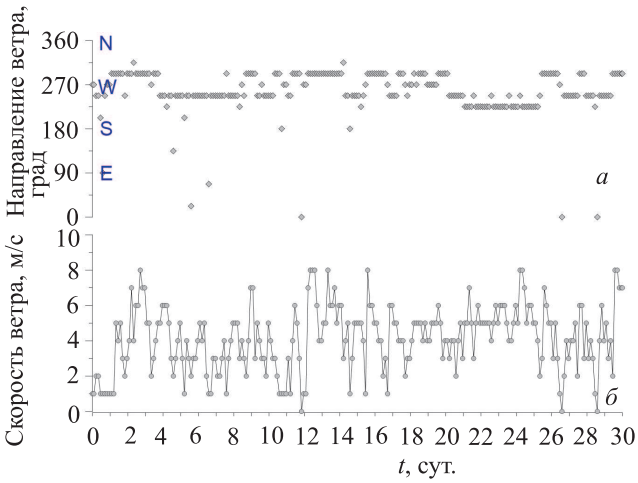

Рис. 2. Направление (*а*) и скорость (*б*) ветра согласно данным метеорологической станции г. Бабушкина с 1 по 30 ноября 2015 г.

значения (4.0 м/с) [13, 24]. Максимальное значение скорости ветра — 8 м/с (рис. 2, *б*). Детальное описание погодных условий и вариации потоков коротко- и длинноволновой радиации, явного и скрытого тепла приведено в [27].

После 16 сут моделирования термобар располагался на расстоянии 3.5 км от устья речного притока [27]. Несмотря на образование в результате ветрового волнения сплошной струи на поверхности водоема (направленной к устью реки), фронт термобара имел ярко выраженную зону с опусканием водных масс (рис. 3, *а*). Максимальная скорость вертикального потока внутри термобарического фронта составила 1.5 см/с, скорость сгенерированных ветром приповерхностных течений достигала 2.0 см/с. За счет ветрового перемешивания концентрация примеси в мелководье имеет достаточно однородное

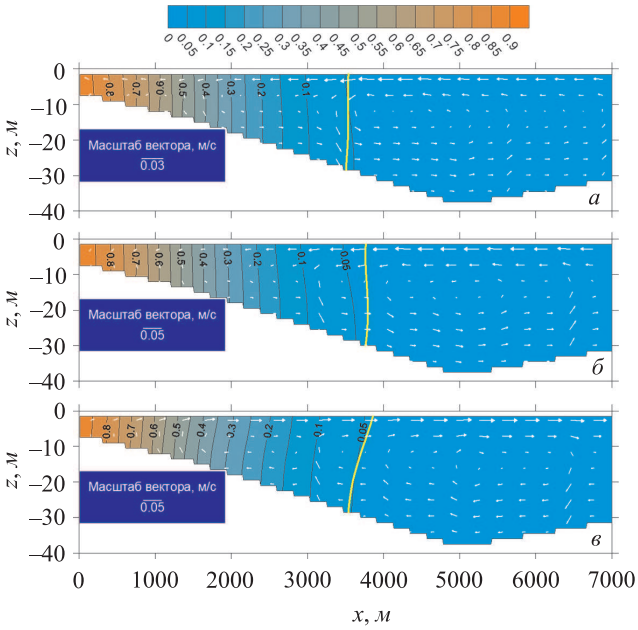

Рис. 3. Распределение концентрации примеси [г/м^3], векторное поле скорости и профиль температуры максимальной плотности (жирная линия) после 16 сут моделирования: *а* — при реальной ветровой обстановке; *б* — при западном ветре, дующем со скоростью 8 м/с; *в* — при восточном ветре, дующем со скоростью 8 м/с

распределение по глубине (изолинии преимущественно вертикальные) (рис. 3, *а*). Аналогичная вертикальная структура изолиний наблюдалась и для поля температуры (рис. 4, *с* в [27]). С увеличением расстояния от берега уменьшается содержание концентрации примеси в мелководье. Результаты моделирования согласуются с описаниями натурных наблюдений: термобар реализует последовательное заполнение Селенгинского мелководья смешанными водами по изобатам в сторону роста глубин [4]. На 16 сут тридцатипроцентная концентрация примеси загрязняющих веществ распространилась до 2 км от устья реки (рис. 3, *а*).

С целью оценки влияния направления ветра на транспорт примеси в условиях мелководья наряду с базовым моделированием (отражающим реальную ветровую обстановку в ноябре 2015 г.) проведены дополнительные расчеты со следующими характеристиками ветра:

1) западный ветер, дующий со скоростью 8 м/с (вычислительный эксперимент № 1);
2) восточный ветер, дующий со скоростью 8 м/с (вычислительный эксперимент № 2).

Распределения, полученные в ходе вычислительного эксперимента № 1 (рис. 3, *б*), существенным образом не отличаются от результатов базового моделирования, поскольку в рассматриваемых случаях ветер направлен против движения термобара. Однако следует заметить, что изолинии концентрации примеси в эксперименте № 1 слабо смещены в сторону берега и имеют больший наклон в приповерхностном слое, причем с ростом расстояния от устья речного притока угол наклона увеличивается (рис. 3, *б*). Это различие связано с силой ветра (в эксперименте № 1 скорость ветра постоянна и совпадает с максимальным значением, зафиксированным в ноябре 2015 г.). Сопоставляя смоделированные распределения (рис. 3, *а* и *б*), можно заключить, что западные ветры задерживают распространение загрязняющих веществ в центральную часть водоема.

При ветре, дующем в направлении развития термобара (эксперимент № 2), наблюдается обратная картина: изолинии концентрации примеси имеют наклон в противоположную сторону (к открытой части озера) (рис. 3, *в*). Это свидетельствует о том, что ветры восточного направления способствуют более быстрому распространению загрязняющих веществ в верхних слоях водоема. В эксперименте № 1 в приповерхностном слое мелководья пятипроцентная концентрация примеси на 16 сут достигла расстояния 3.45 км (рис. 3, *б*), а в эксперименте № 2 — 3.75 км (рис. 3, *в*). В приустьевой части мелководья роль ветра в распределении примеси незначительна по причине доминирующего влияния стокового течения реки.

При непрерывном воздействии ветра на водоем формируется крупномасштабная циркуляция в области $3 < x < 6.5$ км (максимальная скорость движения воды в циркуляционной структуре в горизонтальном направлении вблизи поверхности составила 4 см/с): в эксперименте № 1 она направлена против часовой стрелки, а в эксперименте № 2 — в обратную сторону (рис. 3, *б, в*). При этом зона расположения температуры максимальной плотности в обоих случаях (в отличие от базового сценария) смещена в сторону открытого озера. В экспериментах № 1 и № 2 вертикальные движения водных масс на участках с температурой максимальной плотности не наблюдаются.

Выполненное математическое моделирование продемонстрировало, что из-за ветрового перемешивания концентрация примеси загрязняющих веществ на разрезе прот. Харауз — м. Красный Яр имеет более однородное вертикальное распределение по сравнению с ранее полученными результатами для случая весеннего термобара [17, 28].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного численного моделирования можно сделать следующие выводы о процессах транспорта примеси загрязняющих веществ в Селенгинском мелководье озера Байкал во время существования осеннего термобара:

1. Термический и гидродинамический режим р. Селенги имеет доминирующее влияние на перенос примеси в приустьевой зоне мелководья.
2. С увеличением расстояния от устья речного притока усиливается эффект ветрового трения на пространственное распределение концентрации примеси.
3. При западных ветрах, дующих против движения термобара, происходит задержка переноса примеси в центральную часть водоема.
4. Ветры восточного направления способствуют более быстрому распространению загрязняющих веществ в верхних слоях водной толщи.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-77-00017).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тихомиров А. И.* Термика крупных озер. Л., 1982.
2. *Блохина Н. С., Показеев К. В.* // Земля и Вселенная. 2015. № 6. С. 78.
3. *Шимараев М. Н.* Элементы теплового режима озера Байкал. Новосибирск: Наука, 1977.
4. *Sherstyankin P. P., Ivanov V. G., Kuimova L. N., Sinyukovich V. N.* // Water Resources. 2007. **34**, N 4. P. 408.
5. *Шерстянкин П. П.* // Элементы гидрометеорологического режима озера Байкал. М.-Л., 1964. **5(25)**. С. 29.
6. *Блохина Н. С.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2013. № 4. С. 59. (*Blokhina N. S.* // Moscow Univ. Phys. Bull. 2013. **68**, N 4. P. 324.)
7. *Malm J.* // Nordic Hydrology. 1995. **26**, N 4–5. P. 331.
8. *Tsydenov B. O., Starchenko A. V., Kay A.* // Inland Waters. 2018. **8**, N 3. P. 322.
9. *Ullman D., Brown J., Cornillon P., Mavor T.* // J. Great Lakes Res. 1998. **24**, N 4. P. 753.
10. *Цыденов Б. О.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2019. № 1. С. 64. (*Tsydenov B. O.* // Moscow Univ. Phys. Bull. 2019. **74**, N 1. P. 70.)
11. *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.)
12. *Tsydenov B. O.* // J. Mar. Syst. 2018. **179**. P. 1.
13. *Иванов В. Г.* Формирование и эволюция весеннего термобара за счет стока реки (на примере Селенгинского мелководья озера Байкал): дисс. . . . канд. геогр. наук. Иркутск. 2012.

14. *Moll R. A., Bratkovich A., Chang W. Y. B., Pu P.* // Estuaries. 1993. **16**, N 1. P. 92.
15. *Likhoshway Y. V., Kuzmina A. Ye., Potyemkina T. G.* et al. // J. Great Lakes Res. 1996. **22**, N 1. P. 5.
16. *Tsydenov B. O.* // J. Mar. Syst. 2019. **195**. P. 38.
17. *Tsydenov B. O., Kay A., Starchenko A. V.* // Ocean Modelling. 2016. **104**. P. 73.
18. *Tsydenov B. O., Starchenko A. V.* // Proc. SPIE. 2015. **9680**. 96800H.
19. *Chen C. T., Millero F. G.* // Limnol. Oceanogr. 1986. **31**, N 3. P. 657.
20. *Wilcox D. C.* // AIAA J. 1988. **26**, N 11. P. 1299.
21. *Orlanski I.* // J. Comput. Phys. 1976. **21**, N 3. P. 251.
22. *Синюкович В. Н., Жарикова Н. Г., Жариков В. Д.* // География и природные ресурсы. 2004. № 3. С. 64.
23. *Тарасова Е. Н.* Органическое вещество вод Южного Байкала. Новосибирск: Наука, 1975.
24. *Shimaraev M. N., Verbolov V. I., Granin N. G., Sherstyankin P. P.* Physical Limnology of Lake Baikal: a Review. Irkutsk–Okayama, 1994.
25. *Верболов В. И.* // Проблемы Байкала. Новосибирск: Наука, 1978. С. 87.
26. *Цыденов Б. О.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2018. № 4. С. 94. (*Tsydenov B. O.* // Moscow Univ. Phys. Bull. 2018. **73**, N 4. P. 435.)
27. *Tsydenov B. O.* // J. Great Lakes Res. 2019. **45**, N 4. P. 715.
28. *Цыденов Б. О.* // Вычислительные технологии. 2017. **22**, № S1. С. 113.

Numerical Simulation of the Effect of Wind on the Transport of Contaminants in the Selenga Shallow Waters of Lake Baikal during the Autumnal 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 results of the mathematical simulation of contaminant transport in the Selenga shallow waters of Lake Baikal during the development of the autumnal thermal bar are presented. Spatial distribution of contaminants under different wind scenarios are analyzed. Numerical experiments showed that the structure of the contour lines of the contaminant concentration depends on the wind direction when shallow waters cool.

Keywords: water contamination, numerical simulation, autumnal thermal bar, wind mixing, Selenga shallow waters, Lake Baikal.
PACS: 92.40.Cy.
Received 09 September 2019.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2020. **75**, No. 1. Pp. 81–86.

Сведения об авторе

Цыденов Баир Олегович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (3822) 783-593, e-mail: tsydenov@math.tsu.ru.