

УДК 556.013+551.52

Влияние ветра на распределение планктона и биогенных элементов в период осеннего охлаждения оз. Байкал

Б.О. Цыденов✉*

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

Поступила в редакцию 25.01.2022 г.;
после доработки 22.03.2022 г.;
принята к печати 1.04.2022 г.

Представлены результаты численного моделирования биогеохимических процессов в период осеннего охлаждения оз. Байкал. Исследовано воздействие ветра на распределение фито-, зоопланктона, нитратов, аммония и фосфатов при развитии осеннего термобара в Баргузинском заливе оз. Байкал. Расчеты показали, что осенний термобар в сочетании с эффектом западных ветров, направленных против движения термического фронта, существенно замедляет распространение вод с высоким содержанием планктона в центральную часть залива.

Ключевые слова: осенний термобар, численное моделирование, планктон, фосфат, озеро Байкал; wind, autumnal thermal bar, numerical simulation, plankton, phosphate, Lake Baikal.

Введение

При осеннем охлаждении (как и при весеннем прогреве) озер умеренных широт формируется *термобар* – природное явление, представляющее собой узкую зону опускания плотных водных масс (температура воды внутри фронта термобара составляет ~ 4 °С). Он делит водоем на две обособленные области: *теплоактивную* (в прибрежной части) и *теплоинертную* (в пелагиальной части) [2], отличающиеся друг от друга по физическим, химическим и биологическим характеристикам [3, 4]. Препятствуя горизонтальному водообмену и создавая специфические термогидродинамические условия, термобар играет ключевую роль в экологическом функционировании водного объекта весной и осенью [5–7].

Возникновение байкальского термобара происходит в заливах (Малое Море, Чивыркуйский), на мелководьях (Селенгинское) и вблизи относительно приглубых прибрежных участков [8, 9]. Речные притоки имеют важнейшее значение в формировании термобара в оз. Байкал [10]. Вертикальные циркуляции, генерируемые термобаром, рассматриваются в качестве одного из главных механизмов обновления глубинных вод Байкала [11–13].

На формирование, особенность развития и время жизни термобара влияют скорость и направление ветра [14–17]. Более того, ветер может служить причиной разрушения термического фронта [18]. В различных частях Байкала в зависимости от ветровых

и батиметрических особенностей сгенерированное ветром перемешивание достигает различной глубины [19]. Поэтому изучение влияния ветра и термобарической неустойчивости на динамику планктона и биогенных элементов в оз. Байкал (особенно в его заливах и на мелководьях, где ветер является одним из главных факторов возникновения волн) представляет особый научный и практический интерес.

В [1] представлена математическая модель для воспроизведения физико-биологических процессов в пресноводном озере с учетом фосфорного и азотного лимитирования. В настоящей работе приведены результаты вычислительных экспериментов, демонстрирующие влияние ветра на распределение фито-, зоопланктона, нитратов, аммония и фосфатов в период осеннего выхолаживания водоема. Область исследования – Баргузинский залив озера Байкал.

Цель настоящей работы – численное исследование ветрового воздействия на распределение фито-, зоопланктона, нитратов, аммония и фосфатов во время развития осеннего термобара в Баргузинском заливе оз. Байкал.

Описание модели и параметры задачи

Математическая модель для воспроизведения физико-биологических процессов в пресноводном озере состоит из термогидродинамического и экосистемного блоков [1]. Термогидродинамический блок включает в себя уравнения количества движения, энергии, неразрывности, турбулентных характеристик и др. [18]. Экосистемный блок основан на моделях Fasham M.J.R. et al. [20], Fennel K. et al. [21],

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

Hofmann E. et al. [22], Gan J. et al. [23] и включает в себя 10 прогностических переменных: концентрация нитрата (NO_3), фосфата (PO_4), аммония (NH_4), хлорофилла a (Chl), фитопланктона (Phyto), зоопланктона (Zoo), мелкого (SDN) и крупного (LDN) нитратного детрита, а также мелкого (SDP) и крупного (LDP) фосфатного детрита.

Поглощение солнечной радиации рассчитывается по закону Бугера–Ламберта–Бэра:

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

где $H_{S_{\text{sol},0}}$ – поток солнечной радиации на поверхности водоема, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $r_s \approx 0,2$ – коэффициент отражения воды; $\epsilon_{\text{abs}} \approx 0,3 \text{ м}^{-1}$ – коэффициент поглощения солнечной радиации в воде; d – глубина, м. Коэффициенты горизонтальной турбулентной вязкости и диффузии приняты равными $K_x = D_x = 5,0 \text{ м}^2/\text{с}$ [24].

Сдвиговое напряжение ветра на поверхности озера описывается законом

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

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

Здесь ρ_a – плотность воздуха у поверхности воды; $c_{10} = 1,3 \cdot 10^{-3}$ [25]; u_{10}, v_{10} – составляющие скорости ветра на высоте 10 м над поверхностью озера. Математическая модель подробно описана в [1].

Рассматривается вертикальное сечение Баргузинского залива оз. Байкал, начало системы координат совпадает с устьем р. Баргузин $53^\circ 25' 30''$ с.ш., $108^\circ 59' 50''$ в.д. (рис. 1, а). Длина и глубина расчетной области составляют 20 км и 100 м соответственно (рис. 1, б). Вычислительная область покрыта равномерной ортогональной сеткой с шагами $h_x = 25$ и $h_z = 2,5$ м. Шаг по времени – 5 с.

Начальное значение температуры воды задано 7°C согласно данным космических съемок температуры воды на поверхности Баргузинского залива в последней декаде октября 2015 г. [26]. Температура воды в устье р. Баргузин в начальный момент времени равна $1,5^\circ\text{C}$ и понижается на $0,017^\circ\text{C}$ в сутки. Минерализация воды в озере составляет $96 \text{ мг}/\text{л}$ [27], в реке – $149 \text{ мг}/\text{л}$ [28]. Скорость течения реки при впадении в озеро – $0,5 \text{ м}/\text{с}$. Компоненты поступающих на поверхность водоема тепловых потоков рассчитаны по формулам, приведенным в [29], с использованием сведений из архива погодных условий метеостанции пос. Усть-Баргузин за ноябрь 2015 г.

Выбор начальных и граничных условий для экосистемного блока модели достаточно проблематичен в связи с отсутствием данных наблюдений, целостно описывающих гидробиологическое и биохимическое состояние Баргузинского залива оз. Байкал в период развития осеннего термобара. Кроме того, известно, что концентрация фитопланктона в оз. Байкал может сильно варьироваться в зависимости от года [30, 31]. В этой ситуации важнее получить качественную картину влияния термобара

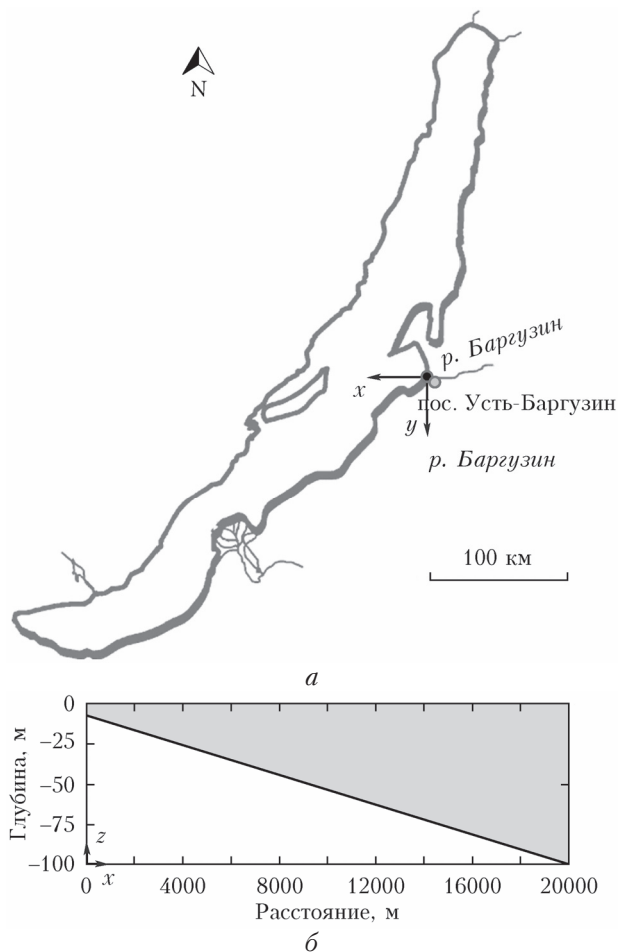


Рис. 1. Схема разреза оз. Байкал (а); вычислительная область (б)

на биогеохимические процессы в водоеме. В настоящей работе начальные и граничные условия для экосистемного блока модели заданы на основе данных проб воды, отобранных 24–31 августа 2002 г. в Баргузинском заливе [31, 32], и опыта численного моделирования биологических процессов в водной среде [21, 33].

Концентрация нитратов, фосфатов, аммония, хлорофилла a , фито- и зоопланктона в начальный момент времени приняты равными $1,0 \text{ ммоль}/\text{м}^3$; $0,05 \text{ ммоль}/\text{м}^3$; $1,0 \text{ ммоль}/\text{м}^3$; $0,3 \text{ мг}/\text{м}^3$; $0,3 \text{ ммоль N}/\text{м}^3$ и $0,3 \text{ ммоль N}/\text{м}^3$ соответственно. Начальное распределение концентрации для всех детритных компонентов составляет $0,1 \text{ ммоль N}/\text{м}^3$ (такой подход задания небольших значений, как показал опыт моделирования гидробиологических процессов в Срединно-Атлантическом заливе [21], обеспечивает быструю корректировку этих переменных). На границе раздела река – озеро для биологических переменных модели заданы следующие условия: $[\text{NO}_3]_R = 1,0 \text{ ммоль}/\text{м}^3$, $[\text{PO}_4]_R = 0,2 \text{ ммоль}/\text{м}^3$, $[\text{NH}_4]_R = 1,0 \text{ ммоль}/\text{м}^3$, $[\text{Chl}]_R = 1,0 \text{ мг}/\text{м}^3$, $[\text{Phyto}]_R = 0,3 \text{ ммоль N}/\text{м}^3$, $[\text{Zoo}]_R = 0,3 \text{ ммоль N}/\text{м}^3$, $[\text{SDN}]_R = 0,1 \text{ ммоль N}/\text{м}^3$, $[\text{LDN}]_R = 0,1 \text{ ммоль N}/\text{м}^3$, $[\text{SDP}]_R = 0,1 \text{ ммоль N}/\text{м}^3$ и $[\text{LDP}]_R = 0,1 \text{ ммоль N}/\text{м}^3$ (R – river).

Результаты и обсуждение

1. Анализ погодных условий и расчет тепловых потоков

Диапазон изменения температуры воздуха в первой декаде ноября 2015 г. составил $-14...+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 2, *a*). Температура воздуха на рассматриваемом интервале времени преимущественно отрицательная, положительные значения принимала на 1-е, 2-е и 10-е сутки месяца.

Первая декада ноября 2015 г. характеризовалась высокой степенью покрытия неба облаками и доми-

нированием ветров восточного направления. Сплошная облачность наблюдалась на 1-е, 3-е, 4-е и 10-е сутки (рис. 2, *b*). Максимальная и средняя скорости ветра на рассматриваемом интервале времени составили 8 и 2,8 м/с соответственно (рис. 2, *в*). Преобладание западных ветров отмечается на 1-е и 4, 5-е сутки, северных ветров – на 3-е сутки, восточных ветров – на 6–9-е сутки (рис. 2, *г*).

Графики вычисленных на основе метеорологических наблюдений потоков коротковолновой и длинноволновой радиации и скрытого и явного тепла представлены на рис. 2, *д*. Превышающие 200 Вт/м^2 пиковые значения (вследствие низкой облачности)

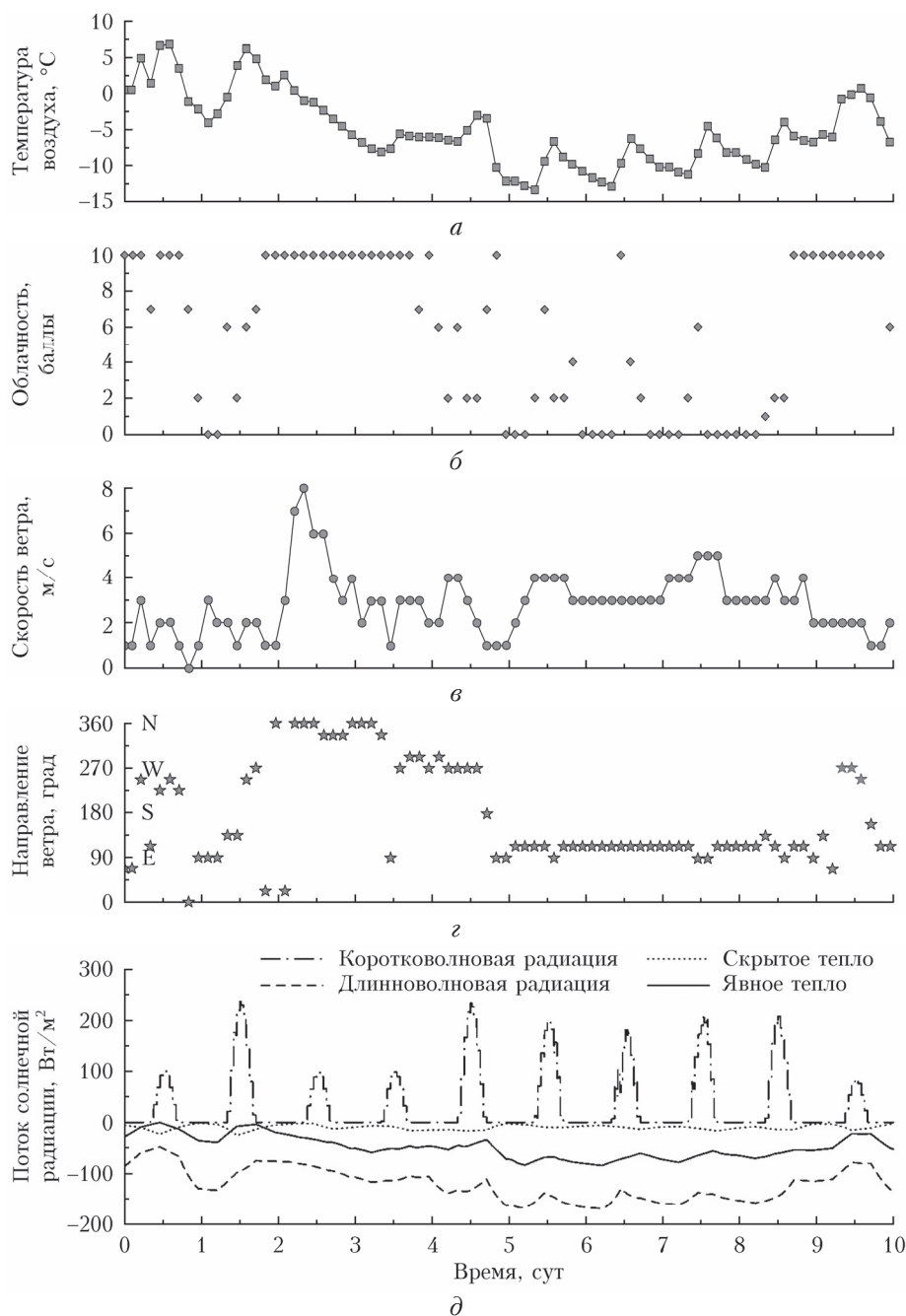


Рис. 2. Температура воздуха (*a*), облачность (*б*), скорость ветра (*в*), направление ветра (*г*) и поток солнечной радиации (*д*) с 1 по 10 ноября 2015 г.

потока коротковолновой радиации (максимум – 239 Вт/м²) приходится на 2-е, 5-е, 8-е и 9-е сутки. Остальные компоненты тепловых потоков направлены на охлаждение водоема. Значения потоков явного и скрытого тепла и длинноволновой радиации варьировались от 0 до –85, от –49 до –170 и от –1 до –26 Вт/м² соответственно. Заметна корреляция динамики последних двух компонентов тепловых потоков с суточным ходом температуры воздуха (рис. 2, а, д).

2. Распределение температуры воды, планктона и биогенных элементов

Численное моделирование показало, что особенность распределения температуры воды в Баргузинском заливе оз. Байкал существенно зависит от ветрового режима. Согласно положению изотермы 4 °С на 6-е сутки, при наличии ветра фронт термобара располагался на расстоянии 2,5 км (рис. 3, а, слева, цв. вкладка), а при его отсутствии – на расстоянии 4,7 км (рис. 3, а, справа) от устья р. Баргузин. Характер наклона изотерм (в теплоактивной области), смоделированных для рельефа Баргузинского залива оз. Байкал (рис. 3, а), аналогичен структуре изотерм, полученных методом натуральных измерений во время существования весеннего термобара в оз. Ладожское (30 мая 1959 г.) [2], Онтарио (29 мая 1972 г.) [34], Байкал (5 июня 1993 г.) [10] и др. Однако в заключительной стадии развития термобара (10-е сутки) при реальной ветровой обстановке наблюдаются значительные качественные изменения в поле температуры (рис. 4). Анализ результатов ранее проведенных расчетов [18] указывает, что такой нетипичный профиль температурного распределения связан с формированием индуцированных ветром циркуляционных течений. В этой ситуации за счет ветрового перемещения поверхностные воды проникают в нижние уровни.

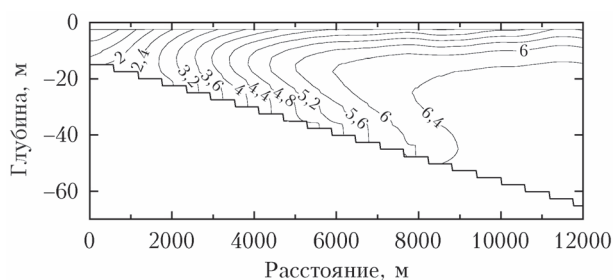


Рис. 4. Распределение температуры (°C) на 10-е сутки моделирования при наличии ветра

В вычислительном эксперименте с реальным ветровым режимом скорость горизонтального перемещения термобара ниже по сравнению со сценарием без ветра по причине достаточно длительного непрерывного воздействия западных ветров (направленных противоположно движению термического фронта) на 4, 5-е сутки. Охлаждение водоема ведет к уменьшению биомассы планктонных сообществ.

Максимальная концентрация фито- и зоопланктона сосредоточена в устье реки (рис. 3, б, в). Важно заметить, что, несмотря на низкую температуру воды, концентрация планктона в приустьевой области водоема остается высокой благодаря двум факторам – постоянному поступлению планктонной биомассы из реки и барьерной функции термобара. В водах залива, где происходит сокращение популяций фитопланктона, наблюдается увеличение количества нитратов (рис. 3, з). Ветер способствует активному перемешиванию фитопланктонных организмов в теплоинертной области водоема (рис. 3, б, справа). В случае отсутствия ветра градиенты температуры (рис. 3, а, справа), концентрации фитопланктона (рис. 3, б, справа) и биогенных элементов (рис. 3, з, д, е, справа) выражены сильнее. Заметна корреляция изолиний концентрации фитопланктона со структурой изотерм. Повышенное содержание аммония (> 0,997 ммоль · м⁻³) локализовано в приустьевой части залива на глубине 5–20 м (наблюдается формирование «языка») (рис. 3, д). Нисходящие потоки, возникающие на месте термобара и продолжающие свое движение по склону, способствуют перемещению зоопланктона (рис. 3, в) и фосфатов (рис. 3, е) в нижние слои. При безветренной погоде фитопланктон и нитраты в теплоинертной области имеют тенденцию к более однородному горизонтальному распределению.

Материалы комплексных экспедиционных работ, отражающие содержание органических веществ и биогенных элементов в Баргузинском заливе во время развития осеннего термобара, в литературе отсутствуют. Однако результаты расчетов, реализованных для условий весенне-летнего прогрессивания водоема [35], согласуются с данными натуральных наблюдений [10, 36]. Математическое моделирование продемонстрировало, что осенний термобар в Баргузинском заливе оз. Байкал выполняет барьерную функцию, ограничивая распространение планктона и фосфатов в открытые воды. При этом западные ветры, противодействуя перемещению термического фронта, ингибируют перенос фито- и зоопланктона в центральную часть залива.

Заключение

На основе результатов численного моделирования биогеохимических процессов в период развития осеннего термобара в Баргузинском заливе оз. Байкал можно сделать следующие выводы.

1. Распределение температуры воды, фито-, зоопланктона, нитратов, аммония и фосфатов в заливе существенно зависит от ветрового режима.

2. За счет барьерной функции термобара и постоянного поступления планктонной биомассы из р. Баргузин максимальная концентрация планктона сосредоточена в приустьевой области залива. Содержание планктона в теплоинертной области снижается по мере охлаждения водоема.

3. Формирующиеся на месте термобара нисходящие потоки увлекают зоопланктон и фосфаты в нижние слои водного пространства.

4. В открытой части залива при наличии ветра наблюдается активное перемешивание фитопланктонных организмов, а при его отсутствии фитопланктон и нитраты имеют тенденцию к более однородному горизонтальному распределению.

Стоит отметить, что представленные результаты получены с помощью гидродинамической 2,5D-модели. Для более точного описания ветровых эффектов следует рассматривать задачу в трехмерной постановке.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-31-60003).

Список литературы

1. 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.
2. Тихомиров А.И. Термика крупных озер. Л.: Наука, 1982. 232 с.
3. Блохина Н.С., Показеев К.В. Уникальное природное явление – термобар // Земля и Вселенная. 2015. № 6. С. 78–88.
4. Holland P.R., Kay A. A review of the physics and ecological implications of the thermal bar circulation // Limnologia. 2003. V. 33, N 3. P. 153–162.
5. Moll R., Brahe M. Seasonal and spatial-distribution of bacteria, chlorophyll, and nutrients in nearshore Lake Michigan // J. Great Lakes Res. 1986. V. 12, N 1. P. 52–62.
6. Goldman C.R., Elser J.J., Richards R.C., Reuter J.E., Priscu J.C., Levin A.L. Thermal stratification, nutrient dynamics, and phytoplankton productivity during the onset of spring phytoplankton growth in Lake Baikal, Russia // Hydrobiologia. 1996. V. 331, N 1–3. P. 9–24.
7. Ullman D., Brown J., Cornillon P., Mavor T. Surface temperature fronts in the Great Lakes // J. Great Lakes Res. 1998. V. 24, N 4. P. 753–775.
8. Шимараев М.Н. Элементы теплового режима озера Байкал / под ред. А.Н. Афанасьева. Новосибирск: Наука, 1977. 149 с.
9. Шерстянкин П.П., Иванов В.Г., Куимова Л.Н., Сидюкович В.Н. Формирование вод Селенгинского мелководья с учетом сезонного хода речного стока, термической конвекции и термобаров // Вод. ресурсы. 2007. Т. 34, № 4. С. 439–445.
10. 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.
11. Weiss R.F., Carmack E.C., Koropalov V.M. Deep-water renewal and biological production in Lake Baikal // Nature. 1991. V. 349, N 6311. P. 665–669.
12. Shimaraev M., Granin N., Zhdanov A. Deep ventilation of Lake Baikal waters due to spring thermal bars // Limnol. Oceanogr. 1993. V. 38, N 5. P. 1068–1072.
13. 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.
14. 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.
15. Malm J. Spring circulation associated with the thermal bar in large temperate lakes // Nordic Hydrology. 1995. V. 26, N 4–5. P. 331–358.
16. 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.
17. Цыденов Б.О. Динамика осеннего термобара при дифференцированной ветровой нагрузке // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3: Физ. Астрономия. 2022. № 1. С. 105–110.
18. Tsydenov B.O. Numerical modeling of the autumnal thermal bar // J. Mar. Syst. 2018. V. 179. P. 1–9.
19. Верещагин Г.Ю. О некоторых проблемах, связанных с изучением Байкала // Природа. 1939. № 12. С. 33–43.
20. Fasham M.J.R., Ducklow H.W., McKelvie S.M. A nitrogen-based model of plankton dynamics in the oceanic mixed layer // J. Mar. Res. 1990. V. 48, N 3. P. 591–639.
21. Fennel K., Wilkin J., Levin J., Moisan J., O'Reilly J., Haidvogel D. Nitrogen cycling in the Middle Atlantic Bight: Results from a three-dimensional model and implications for the North Atlantic nitrogen budget // Global Biogeochem. Cycl. 2006. V. 20, N 3. GB3007.
22. Hofmann E., Druon J.-N., Fennel K., Friedrichs M., Haidvogel D., Lee C., Mannino A., McClain C., Najjar R., O'Reilly J., Pollard D., Previdi M., Seitzinger S., Siewert J., Signorini S., Wilkin J. Eastern US continental shelf carbon budget: Integrating models, data assimilation, and analysis // Oceanography. 2008. V. 21, N 1. P. 86–104.
23. Gan J., Lu Z., Cheung A., Dai M., Liang L., Harrison P.J., Zhao X. Assessing ecosystem response to phosphorus and nitrogen limitation in the Pearl River plume using the Regional Ocean Modeling System (ROMS) // J. Geophys. Res. C: Oceans. 2014. V. 119, N 12. P. 8858–8877.
24. 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.
25. Goudsmit G.-H., Burchard H., Peeters F., Wüest A. Application of k - ϵ turbulence models to enclosed basin: The role of internal seiches // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N 12. P. 23–13.
26. URL: <http://geol.irk.ru/baikal/law/mlawecmon/mlawecmmon> (last access: 20.10.2021).
27. Shimaraev M.N., Verbov V.I., Granin N.G., Shershtyan P.P. Physical Limnology of Lake Baikal: A Review. Irkutsk–Okayama: Bicer, 1994. 81 p.
28. Вотинцев К.К. Гидрохимия // Проблемы Байкала / под ред. Г.И. Галазний, К.К. Вотинцев. Новосибирск: Наука, 1978. С. 124–146.
29. Tsydenov B.O. Simulating phytoplankton growth during the spring thermal bar in a deep lake // J. Mar. Syst. 2019. N 195. P. 38–49.
30. Evstafyev V.K., Bondarenko N.A. An intriguing enigma of Lake Baikal // Biol. Rhythm Res. 2007. V. 38, N 2. P. 107–117.
31. Satoh Y., Katano T., Satoh T., Mitamura O., Anbut-su K., Nakano S.-I., Ueno H., Kihira M., Drucker V., Tanaka Y., Mimura T., Watanabe Y., Sugiyama M. Nutrient limitation of the primary production of phytoplankton in Lake Baikal // Limnology. 2006. V. 7, N 3. P. 225–229.

32. *Katano T., Nakano S.-I., Ueno H., Mitamura O., Anbutsu K., Kihira M., Satoh Y., Satoh T., Drucker V.V., Tanaka Y., Akagashi Y., Sugiyama M.* Abundance and composition of the summer phytoplankton community along a transect from the Barguzin River to the central basin of Lake Baikal // *Limnology*. 2008. V. 9, N 3. P. 243–250.
33. *Holland P.R., Kay A., Botte V.* Numerical modelling of the thermal bar and its ecological consequences in a river-dominated lake // *J. Mar. Syst.* 2003. V. 43, N 1–2. P. 61–81.
34. *Csanady G.T.* Spring thermocline behavior in Lake Ontario during IFYGL // *J. Phys. Oceanogr.* 1974. N 4. P. 425–445.
35. *Tsydenov B.O.* Modeling biogeochemical processes in a freshwater lake during the spring thermal bar // *Ecol. Model.* 2022. V. 465. 109877.
36. *Parfenova V.V., Shimaraev M.N., Kostornova T.Y., Domyshcheva V.M., Levin L.A., Dryukker V.V., Zhdanov A.A., Gnatovskii R.Yu., Tsekhanovskii V.V., Logacheva N.F.* On the vertical distribution of microorganisms in lake Baikal during spring deep-water renewal // *Microbiology*. 2000. V. 69, N 3. P. 433–440.

B.O. Tsydenov. Wind effects on the distribution of plankton and nutrients during the autumn cooling of Lake Baikal.

The results of mathematical simulation of biogeochemical processes during the autumn cooling of the lake are presented. The influence of wind on the distribution of phyto- and zooplankton, nitrate, ammonium, and phosphate nutrients is studied during the existence of the autumnal thermal bar in Barguzin Bay of Lake Baikal. Numerical simulations show the autumnal thermal bar in combination with the effect of western winds, which act opposite to the thermal front direction, to significantly slow down the transport of plankton biomass toward the central part of the bay.

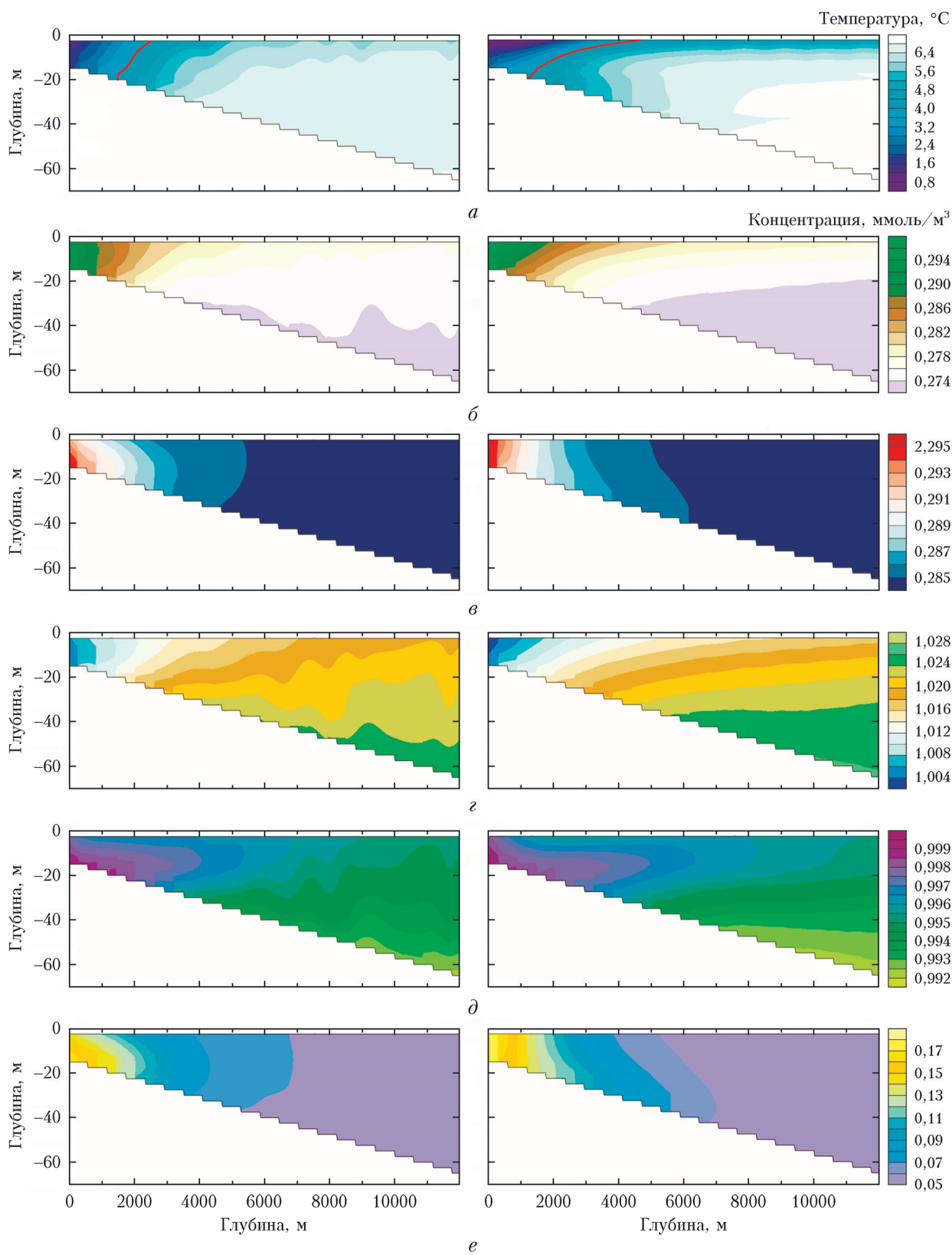


Рис. 3. Распределение температуры (красной линией показана изотерма 4 °C) (*a*), фитопланктона (*б*), зоопланктона (*в*), нитратов (*г*), аммония (*д*) и фосфатов (*е*) на 6-е сутки моделирования при наличии (слева) и отсутствии (справа) ветра