

УДК 51–76:574.583

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕСЕННЕЙ ДИНАМИКИ ПЛАНКТОНА НА ПРИМЕРЕ СЕЛЕНГИНСКОГО МЕЛКОВОДЬЯ ОЗ. БАЙКАЛ\*

**Б. О. Цыденов**

*Научно-исследовательская лаборатория вычислительной геофизики Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия*

Представлены результаты численного моделирования динамики фито- и зоопланктона в период развития весеннего термобара на Селенгинском мелководье озера Байкал. На основе расчетов выявлено, что с повышением температуры воды в мелководье увеличивается концентрация фитопланктона, причем локальный максимум имеет смещение в сторону прибрежной части относительно фронта термобара. Моделирование показало, что нисходящие вдольсклоновые течения, возникающие в результате термобарической неустойчивости, способствуют распространению фитопланктона в глубоководную область водоема. Полученные в ходе вычислительных экспериментов распределения зоопланктона имеют направленный к берегу пространственный профиль монотонного роста, что связано с термическими условиями водной среды: чем выше температура воды, тем выше биомасса зоопланктона. Одним из важных результатов настоящей работы является оценка влияния ветра на пространственно-временную структуру концентрации планктона в условиях батиметрии Селенгинского мелководья озера Байкал. Математическое моделирование продемонстрировало, что индуцированные ветром течения приводят к перемешиванию и оседанию биомассы фитопланктона. Установлено, что ветры западного направления, дующие против движения термобара, имеют тенденцию замедлять горизонтальное распространение фито- и зоопланктона в центральную часть Байкала.

**Ключевые слова:** математическая модель; фитопланктон; зоопланктон; весенний термобар; гидробиология озера.

### **B. O. Tsydenov. NUMERICAL MODELING OF SPRING PLANKTON DYNAMICS IN THE SELENGA SHALLOW WATERS OF LAKE BAIKAL**

This paper presents the results of numerical modeling of plankton dynamics during the thermal bar event in the Selenga shallow-water area of Lake Baikal. It has been discovered that phytoplankton concentrations in the shallow waters increase with the temperature rise, and the local maximum is shifted shoreward relative to the thermal bar front. Simulations have shown that the downslope flows caused by thermobaric instability facilitate phytoplankton expansion to the deeper part of the lake. The zooplankton distributions simulated by numerical experiments had a spatially monotonic growth profile directed towards the shore. This is due to the temperature conditions of the water environment: the higher the water temperature, the higher the zooplankton biomass. An important find-

\* Редакционная коллегия серии считает, что статья является дискуссионной относительно авторского обобщения об азоте как лимитирующем факторе в пресноводных экосистемах.

ing of this work is an assessment of effect of wind on the space-time structure of plankton concentrations for the bottom topography of the Selenga shallow waters of Lake Baikal. Modeling has demonstrated that wind-induced currents lead to mixing and settlement of phytoplankton biomass. This study revealed that the westerly winds acting oppositely to the movement of the thermal bar tend to slow down the horizontal expansion of phytoplankton and zooplankton to the central part of Lake Baikal.

**Key words:** mathematical model; phytoplankton; zooplankton; spring thermal bar; lake hydrobiology.

## Введение

Высокий уровень биогенных элементов и усиление солнечной радиации весной обеспечивают благоприятные условия для роста планктонных сообществ в водных объектах умеренных широт [Ullman et al., 1998; Holland, Kay, 2003]. На весеннее развитие гидробиологических процессов в димиктических водоемах оказывают влияние гидрофизические механизмы [Moll et al., 1993], связанные с плотностным перемешиванием и образованием термобара – природного явления, представляющего собой погружение вод в окрестности температуры максимальной плотности.

Весенний термобар на Селенгинском мелководье озера Байкал возникает в начале мая и может существовать два месяца [Иванов, 2012]. Отмечается, что байкальский термобар имеет сильно выраженную зону конвергенции водных масс [Шимараев и др., 1995]. Ключевую роль в формировании термобара в Байкале [Likhoshway et al., 1996], а также в других крупных озерах [Ullman et al., 1998; Budd et al., 1999] играют речные притоки. Термобар на Селенгинском мелководье формируется под влиянием водного стока р. Селенги с более высокой температурой, особенностью рельефа дна, во время его существования происходит образование прибрежной полосы вод с высокой концентрацией биогенных веществ [Иванов, 2012].

Ветер играет важную роль в озерной гидродинамике в периоды развития термобара [Blokhtina, 2015; Tsydenov, 2018a]. В различных районах Байкала, в зависимости от особенностей ветрового режима и рельефа дна, вызванное ветром перемешивание достигает различной глубины [Верещагин, 1939]. В связи с этим большой интерес вызывает вопрос о совместном эффекте поверхностных течений, генерируемых ветром, и вертикальных движений водных масс, связанных с термобаром, на распределение фито- и зоопланктона в озере Байкал, особенно в мелководных участках, где ветровое трение является доминирующим фактором возникновения волн.

В пресноводных экосистемах фосфор традиционно рассматривается как основной лимитирующий элемент, однако эта концепция на основании ряда исследований недавно была оспорена в пользу азота [Верхозина и др., 2011; Rizhinashvili, Maksimova, 2018]. Азот, подобно фосфору, встречается в водоеме как в органической, так и в неорганической форме [Henderson-Sellers, 1984]. Процессы азотфиксации и денитрификации играют существенную роль в балансе азота экосистемы озера Байкал, хотя ранее предполагалось, что они незначительны [Верхозина и др., 2011]. Кроме того, известно, что в приустьевых участках притоков крупных водоемов первичная продукция лимитируется доступом света (например, из-за мутности воды или затенения прибрежной растительностью) и гидрофизическими условиями [Hilton et al., 2006; Larson et al., 2019]. Важно заметить, что конвективные процессы, возникающие в период развития термобара на Селенгинском мелководье озера Байкал, приводят к тому, что взвешенные и растворенные вещества природного и антропогенного происхождения попадают в озеро в хорошо смешанном виде [Sherstyankin et al., 2007]. Натурные исследования показывают, что в весенний период распределение концентраций биогенных элементов в авандельте р. Селенги зависит от объемов их поступления с водным стоком, сроков возникновения термобара и скорости продвижения его фронта [Tomberg et al., 2014].

В настоящей работе в качестве лимитирующего элемента рассматривается азот, поскольку именно он является основным элементом, лимитирующим продуктивность органического вещества в пелагиали озера Байкал [Verkhozina et al., 2000; Верхозина, Верхозина, 2012].

Целью работы является численное воспроизведение динамики биомасс планктона и анализ ветровых эффектов на его пространственное распределение на месте впадения реки Селенги в озеро Байкал на основе модели «биогенный элемент – фитопланктон – зоопланктон – детрит» в период развития весеннего термобара.

## Материалы и методы

### Математическая модель

Численное моделирование динамики биомасс планктона в озере Байкал осуществлено посредством сопряжения термогидродинамического [Tsydenov et al., 2016] и биологического [Цыденов, 2017] модулей. Связи между компонентами биологической системы описываются моделью Паркера [Parker, 1991]. За перенос биомасс фито-, зоопланктона, биогенных элементов и детрита в математической модели ответственны конвективно-диффузионные уравнения вида

$$\begin{aligned} & \frac{\partial [Phyto]}{\partial t} + \frac{\partial u [Phyto]}{\partial x} + \frac{\partial w [Phyto]}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial [Phyto]}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial [Phyto]}{\partial z} \right) + \\ & + [Phyto] (G - m_{[Phyto]} - I [Zoo]) q; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial [Zoo]}{\partial t} + \frac{\partial u [Zoo]}{\partial x} + \frac{\partial w [Zoo]}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial [Zoo]}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial [Zoo]}{\partial z} \right) + \\ & + [Zoo] \left( (1 - Y_{[Nutr]} - Y_{[Detr]}) I [Phyto] - m_z \right) q; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial [Nutr]}{\partial t} + \frac{\partial u [Nutr]}{\partial x} + \frac{\partial w [Nutr]}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial [Nutr]}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial [Nutr]}{\partial z} \right) + \\ & + (-G [Phyto] - Y_{[Nutr]} I [Phyto] [Zoo] + C_0 [Detr]) q; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial [Detr]}{\partial t} + \frac{\partial u [Detr]}{\partial x} + \frac{\partial w [Detr]}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial [Detr]}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial [Detr]}{\partial z} \right) + \\ & + (m_{[Phyto]} [Phyto] + Y_{[Detr]} I [Phyto] [Zoo] - \\ & - C_0 [Detr] + m_{[Zoo]} [Zoo]) q, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $[Nutr]$ ,  $[Phyto]$ ,  $[Zoo]$  и  $[Detr]$  – концентрация биогенных элементов, фитопланктона, зоопланктона и детрита соответственно;  $D_x$  и  $D_z$  – коэффициенты турбулентной диффузии в соответствующих направлениях.

В качестве биогенных элементов выбраны нитраты [Parker, 1991], поскольку экскреция зоопланктона, замыкая малый круговорот, сразу переходит в фонд нитратов. Кроме того, продукты деградации детрита также дополняют

фонд нитратов и растворенного органического азота [Jackson, Williams, 1985; Ward et al., 1989].

Скорость первичной продукции фитопланктона  $G$  определяется по формуле

$$G = V_m [(L_d/s_c) \exp\{1 - (L_d/s_c)\}] \{[Nutr]/([Nutr]+k_s)\}. \quad (5)$$

Свет, проникающий на глубину  $z = d$ , рассчитывается по экспоненциальной зависимости с учетом затенения планктоном и детритом в водной толще между поверхностью ( $z = L_z$ ) и глубиной:

$$L_d = L_0 \cdot par \cdot \exp \left\{ -\eta d - S_s \int_d^{L_z} ([Phyto] + [Zoo] + [Detr]) dz \right\}, \quad (6)$$

где  $L_0$  – приходящий на поверхность воды свет;  $par$  – доля света для фотосинтеза ( $=0,43$ ) [Fennel et al., 2006]. Параметру  $L_0$  в модели соответствует коротковолновая радиация [Fennel et al., 2006], которая вычисляется по формуле

$$H_{Ssol,0} = \begin{cases} S_0 \cdot (a_g - a_w) \cdot \cos \zeta [a(C) + b(C) \ln(\cos \zeta)], & \text{if } \cos \zeta > 0; \\ 0, & \text{if } \cos \zeta \leq 0, \end{cases} \quad (7)$$

здесь  $S_0 \approx 1367$  Вт/м<sup>2</sup> – солнечная постоянная,  $a(C)$  и  $b(C)$  – эмпирические коэффициенты [Aleksandrova et al., 2007], зависящие от степени покрытия небесного свода облачностью  $C$ ,  $\zeta$  – зенитный угол Солнца, эмпирические функции  $a_g$  и  $a_w$  представляют соответственно молекулярное рассеяние и поглощение излучения парами воды и оксидами углерода.

Смертность фитопланктона и множитель температурного ограничения вычисляются соответственно:

$$m_p = M \exp \{-(n_1 N)^2\}; \\ q = 2.5^{(T-15)/10}.$$

Остальные параметры, входящие в расчетные формулы модели «биогенный элемент – фитопланктон – зоопланктон – детрит» [Parker, 1991; Holland et al., 2003; Цыденов, 2017], приведены в таблице.

Начальная концентрация фито-, зоопланктона, биогенных элементов и детрита в модели принята равной 0,1; 0,1; 7,0 и 0,1 ммольN/м<sup>3</sup> соответственно (следует заметить, что размерность биологических компонентов указана в единицах азота, т. е. символ N обозначает химический элемент азот). Заданное в начальный момент времени вертикально неоднородное распределение

$$T_L(z) = -3 \times 10^{-6} |L_z - z|^2 + 4 \times 10^{-4} |L_z - z| + 3,02$$

Параметры модели «биогенный элемент – фитопланктон – зоопланктон – детрит»

Parameters of a biogenic element-phytoplankton-zooplankton-detritus model

Параметр Parameter	Наименование Description	Значение Value
$V_m$	Максимальная скорость роста фитопланктона, сут <sup>-1</sup> Maximum phytoplankton growth rate, day <sup>-1</sup>	2,8
$\eta$	Коэффициент ослабления света, м <sup>-1</sup> Light extinction coefficient, m <sup>-1</sup>	0,15
$k_s$	Константа полунасыщения поглощения биогенных элементов, ммольN/м <sup>3</sup> Biogenic elements uptake half-saturation constant, mmolN/m <sup>3</sup>	0,6
$m_{[Zoo]}$	Смертность зоопланктона, сут <sup>-1</sup> Zooplankton death rate, day <sup>-1</sup>	0,1
$I$	Интенсивность питания зоопланктона, сут <sup>-1</sup> Ingestion rate of zooplankton, day <sup>-1</sup>	0,2
$M$	Максимальная скорость смертности фитопланктона, сут <sup>-1</sup> Maximum phytoplankton death rate, day <sup>-1</sup>	0,5
$n_1$	Коэффициент скорости смертности фитопланктона, (ммольN/м <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> Phytoplankton death rate coefficient, (mmolN/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>	1
$Y_{[Nutr]}$	Доля неусвоенного питания зоопланктона под биогенные элементы Unassimilated zooplankton grazing to biogenic elements	0,4
$Y_{[Detr]}$	Доля неусвоенного питания зоопланктона под детрит Unassimilated zooplankton grazing to detritus	0,3
$C_0$	Скорость превращения детрита в биогенный элемент, сут <sup>-1</sup> Detritus to biogenic element conversion rate, day <sup>-1</sup>	0,02
$S_s$	Коэффициент самозатенения, (ммольN/м <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> м <sup>-1</sup> Self-shading coefficient, (mmolN/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	0,02
$S_c$	Коэффициент светового насыщения, Э м <sup>2</sup> сут <sup>-1</sup> Light saturation coefficient, E m <sup>2</sup> day <sup>-1</sup>	60

приблизительно соответствует многолетним средним значениям температуры воды в южной котловине озера Байкал в июне [Shimaraev et al., 1994]. Температура воды речного притока равномерно повышается с 5 до 17 °С, что отражает реальный термический режим р. Селенги в моделируемый период [Иванов, 2012]. Минерализация воды в озере составляет 96 мг/кг, в реке линейно растет от 140 до 150 мг/кг. Скорость впадения р. Селенги в оз. Байкал принята равной 0,015 м/с [Иванов, 2012]. Компоненты тепловых потоков, поступающих на водное зеркало, вычислены по расчетным формулам, приведенным в работе [Tsydenov, 2018b], на основе данных по температуре воздуха, относительной влажности, атмосферному давлению, облачности, скорости и направлению ветра из архива погодных условий метеостанции г. Бабушкин в период с 1 по 30 мая 2015 г. Сдвиговое напряжение ветра на поверхности водоема описывается законом

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

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

где  $\rho_a$  – плотность воздуха у поверхности воды;  $c_{10} = 1,3 \times 10^{-3}$ ;  $u_{10}$  и  $v_{10}$  – составляющие скорости ветра на высоте 10 м.

Задача решается численно на основе метода конечного объема, согласно которому скалярные величины (температура, соленость, концентрация биологических компонентов, характеристики турбулентности и т. д.) определяются в центре сеточной ячейки, а составляющие вектора скорости – в средних точках на границах ячеек [Цыденов, 2013].

#### Морфометрия области исследования

Область исследования представляет собой поперечное сечение на границе южной и средней котловин озера Байкал: устье р. Селенги (протока Средняя) – Бугульдейка (рис. 1, а). Данные о рельефе дна, соответствующие указанному сечению, взяты из батиметрической электронной карты озера Байкал [Sherstyankin et al., 2006] (рис. 1, б). Селенгинское мелководье расположено в районе 51.9–52.5° с. ш. и 106.1–106.9° в. д., представляет собой отмель в виде мощного конуса, сформировавшуюся в результате аккумуляции наносов на придельтовом пространстве Байкала [Синюкович и др., 2004]. Его площадь (если считать по авандельте) составляет примерно 500 км<sup>2</sup> [Иванов, 2012]. Через разрывы цепи узких длинных кос селенгинские воды попадают в озеро Байкал [Синюкович и др., 2004].

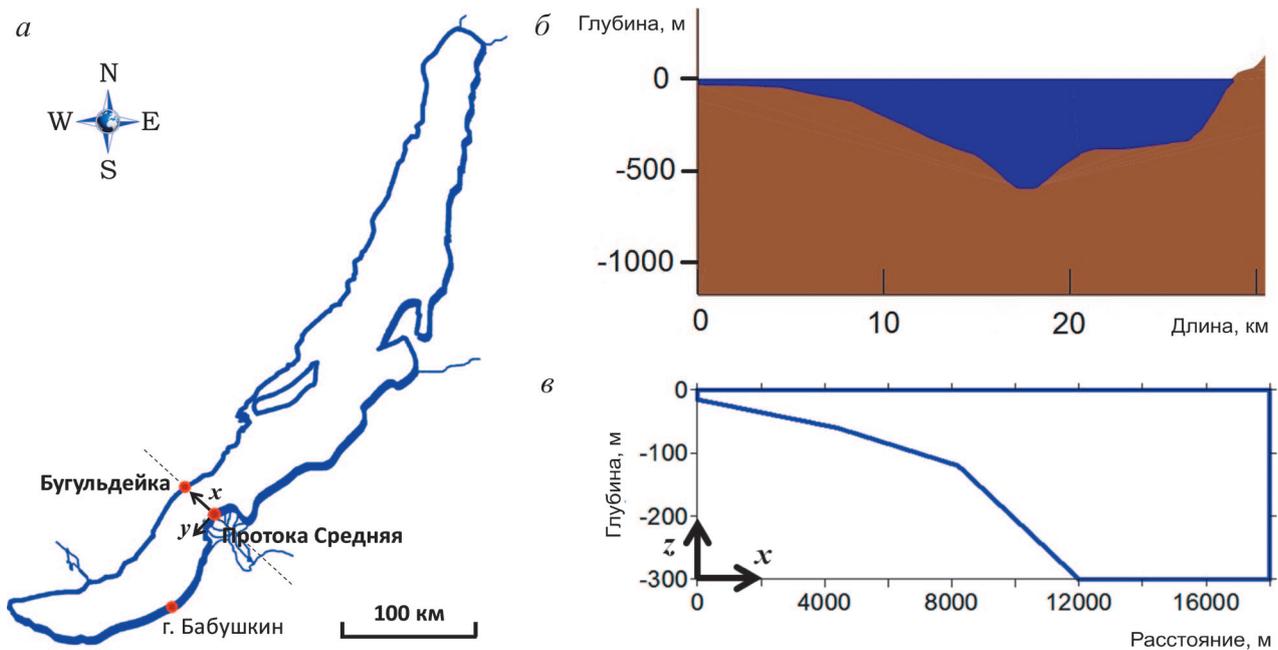


Рис. 1. Сечение протока Средняя – Бугульдейка: а – схема разреза оз. Байкал; б – рельеф дна для рассматриваемого разреза; в – геометрия расчетной области

Fig. 1. Srednyaya arm – Buguldeika cross-section: а – Lake Baikal cross-section scheme, б – bottom topography, в – calculation domain

Вычислительная область имеет протяженность 18 км и глубину 300 м (рис. 1, в). Глубина открытого участка речного стока (на левой границе) составляет 15 м. Расчетная область покрыта равномерной ортогональной сеткой с шагами  $h_x = 50$  м и  $h_z = 5$  м. Шаг по времени – 60 с.

## Результаты и обсуждение

Особенность развития гидродинамических процессов, связанных с эволюцией весеннего термобара на рассматриваемом разрезе протока Средняя – Бугульдейка в мае 2015 г., описана в [Tsydenov et al., 2018]. В настоящей работе будут представлены результаты, отражающие гидробиологический аспект моделирования.

Сведения о направлении ветра с 1 по 30 мая 2015 г. указывают на преобладание ветров западного направления. Ветры, дующие с севера, юга и востока, носят эпизодический характер. Максимальная скорость ветра 9 м/с наблюдалась на 23-й день. Условия, характеризующие ветровую обстановку в мае 2015 года, находятся в согласии с данными многолетних наблюдений в периоды свободного от льда озера. Подробный анализ соответствующих интервалу времени моделирования вариаций тепловых потоков, падающих на поверхность озера, приведен в [Tsydenov et al., 2018]. Среднемесячные значения потоков коротко- и длинноволновой

радиации, скрытого и чувствительного тепла составили 211,6; –43,8; –35,7 и 19,9 Вт/м<sup>2</sup> соответственно.

Смоделированное без учета ветрового трения пространственное распределение фитопланктона на 12-й день показывает, что наибольшая концентрация фитопланктонных сообществ сосредоточена в поверхностном слое мелководья на расстоянии 4 км от устья реки (рис. 2, Phyto\_a1). На месте расположения термобара (6–6,5 км от устья р. Селенги), где происходит погружение вод, фитопланктон имеет вертикально однородное распределение (рис. 2, Phyto\_a1). Необходимо добавить, что в открытом участке озера благодаря прогреву поверхности воды за счет солнечной радиации также отмечается увеличение популяций фитопланктона, которые достигают глубины более 100 м (рис. 2, Phyto\_a1). По мере повышения температуры воды в мелководье наблюдается активный рост биомассы фитопланктона. На 17-й день концентрация фитопланктона увеличивается до 0,14 ммольN/м<sup>3</sup> (рис. 2, Phyto\_b1). Нисходящие вдольсклоновые течения, сгенерированные термобаром, способствуют распространению фитопланктона в глубоководную область озера.

Расчеты с учетом ветрового трения на границе раздела вода-воздух выявили влияние ветра на пространственное распределение планктона. Западные ветры, направленные проти-

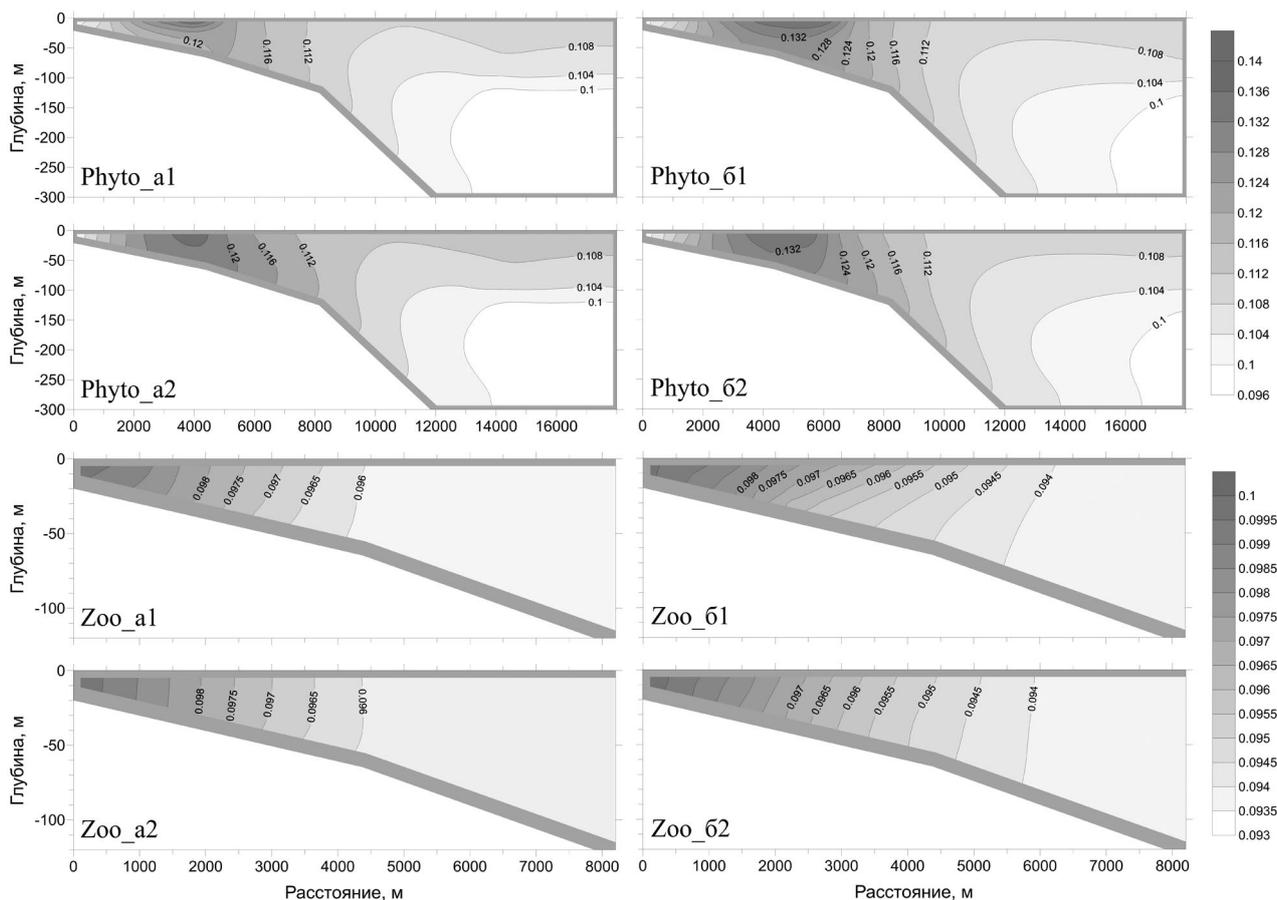


Рис. 2. Концентрация (ммольN/м<sup>3</sup>) фитопланктона (Phyto) и зоопланктона (Zoo) на 12-е (а) и 17-е (б) сутки моделирования при отсутствии (1) и наличии (2) ветра

Fig. 2. Concentration (mmolN/m<sup>3</sup>) of phytoplankton (Phyto) and zooplankton (Zoo) on the 12<sup>th</sup> (a) and 17<sup>th</sup> (b) days without wind stress (1) and with wind stress (2)

воположно перемещению термобара, замедляют его горизонтальное движение [Tsydenov et al., 2018]. Ветер способствует перемешиванию фитопланктонной биомассы в мелководье (рис. 2, Phyto\_a2, Phyto\_b2). Вследствие этого происходит оседание фитопланктона в нижние уровни. Максимальное значение концентрации фитопланктона (на 17-й день составляет 0,126 ммольN/м<sup>3</sup>) ниже, чем при безветренной погоде. Изолинии в зоне существования термобара (рис. 2, Phyto\_a2, Phyto\_b2) наклонены влево, заметна их корреляция со структурой изотерм (см. рис. 5, a2, b2 в [Tsydenov et al., 2018]).

Согласно результатам моделирования зоопланктон на Селенгинском мелководье оз. Байкал имеет отличное от фитопланктона распределение по пространственным координатам (рис. 2, Zoo). С увеличением расстояния от устья притока концентрация зоопланктона уменьшается. Это связано с термическими условиями водной среды: чем выше температура воды, тем выше биомасса зоопланктона. Аналогичная корреляция поля температуры с распре-

лением микробиологических сообществ на Селенгинском мелководье выявлена в ходе натуральных наблюдений [Maksimenko et al., 2008].

Задержка эволюции термобара, связанная с воздействием ветра противоположного направления, является причиной замедления поверхностного распространения популяций зоопланктона в центральную часть озера (рис. 2, Zoo\_a2, Zoo\_b2). При наличии западных ветров изолинии концентрации зоопланктона, полученные на 12-й день моделирования, имеют строго вертикальную структуру в верхнем 30-метровом слое (рис. 2, Zoo\_a2).

Важно заметить, что весенний термобар в условиях Селенгинского мелководья озера Байкал действует как барьер, который препятствует горизонтальному распространению планктона в открытые воды. Локальный максимум концентрации фитопланктона смещен в сторону прибрежной части, а распределение зоопланктона имеет направленный к берегу пространственный профиль монотонного роста. В литературе встречаются примеры подобных типов распределения,

полученных в ходе натуральных наблюдений в периоды прогревания водоема [Scavia, Bennett, 1980; Moll et al., 1993; Holland, Kay, 2003]. Отборы проб воды в авандельте р. Селенги также показывают высокие концентрации биогенных элементов и взвешенных органических веществ в теплоактивной области (от устья реки до фронта термобара) и низкие концентрации в теплоинертной области (за фронтом термобара) [Тарасова, 1975; Tomberg et al., 2014].

## Заключение

Средствами математического моделирования воспроизведены гидробиологические процессы на примере Селенгинского мелководья озера Байкал в период развития весеннего термобара. Анализ полученных результатов выявил влияние температурного режима и гидрофизических условий, связанных с эволюцией термобара, на особенность распределения фито- и зоопланктона. Вычислительные эксперименты показали, что ветер, направленный против движения термобара, может выполнять барьерную функцию, замедляя перенос биомасс планктона в центральную часть водоема.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-31-60041 мол\_а\_дк).*

## Литература

Верещагин Г. Ю. О некоторых проблемах, связанных с изучением Байкала // Природа. 1939. № 12. С. 33–43.

Верхозина В. А., Верхозина Е. В. Биогеохимические процессы круговорота азота в экосистеме озера Байкал и их роль в процессах формирования качества воды // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Материалы V Всеросс. симп. с междунар. участием (Петрозаводск, 10–14 сент. 2012 г.). Петрозаводск, 2012. С. 27–30.

Верхозина В. А., Верхозина Е. В., Чудненко К. В. Роль биогеохимических процессов в балансе азота экосистемы озера Байкал // Вода: химия и экология. 2011. Т. 12, № 42. С. 3–7.

Иванов В. Г. Формирование и эволюция весеннего термобара за счет стока реки (на примере Селенгинского мелководья озера Байкал): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Иркутск, 2012. 24 с.

Синюкович В. Н., Жарикова Н. Г., Жариков В. Д. Сток реки Селенги в ее дельте // География и природные ресурсы. 2004. № 3. С. 64–69.

Тарасова Е. Н. Органическое вещество вод Южного Байкала. Новосибирск: Наука, 1975. 147 с.

Цыденов Б. О. Численное моделирование взаимодействия компонентов системы «нутри-

ент – фитопланктон – зоопланктон – детрит» во время эволюции весеннего термобара // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2017. № 50. С. 112–121. doi: 10.17223/19988621/50/10

Цыденов Б. О. Численное моделирование эффекта весеннего термобара в глубоком озере: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2013. 145 с.

Шимараев М. Н., Грачев М. А., Имбоден Д. М., Окуда С., Гранин Н. Г., Кипфер Р., Левин Л. А., Эндо Ш. Международный гидрофизический эксперимент на Байкале: процессы обновления глубинных вод в весенний период // ДАН. 1995. Т. 343, № 6. С. 824–827.

Aleksandrova M. P., Gulev S. K., Sinitsyn A. V. An improvement of parametrization of short-wave radiation at the sea surface on the basis of direct measurements in the Atlantic // Russ. Meteorology and Hydrology. 2007. Vol. 32, no. 4. P. 245–251. doi: 10.3103/S1068373907040048

Blokhina N. S. The influence of wind on the development of a thermal bar and currents in reservoirs of different depths during ice cover melting // Moscow Univ. Phys. Bull. 2015. Vol. 70, no. 4. P. 319–325. doi: 10.3103/S0027134915040050

Budd J., Kerfoot W. C., Pilant A., Jipping L. M. The Keweenaw Current and ice rafting: Use of satellite imagery to investigate copper-rich particle dispersal // J. Great Lakes Res. 1999. Vol. 25, no. 4. P. 642–662. doi: 10.1016/S0380-1330(99)70768-9

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. Cycles. 2006. Vol. 20, no. 3. GB3007. doi: 10.1029/2005GB002456

Henderson-Sellers B. Engineering Limnology. Boston: Pitman Advanced Publishing Program, 1984. 288 p.

Hilton J., O'Hare M., Bowes M. J., Jones J. I. How green is my river? A new paradigm of eutrophication in rivers // Sci. Total Environ. 2006. Vol. 365, no. 1–3. P. 66–83. doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.02.055

Holland P. R., Kay A. A review of the physics and ecological implications of the thermal bar circulation // Limnologica. 2003. Vol. 33, no. 3. P. 153–162. doi: 10.1016/S0075-9511(03)80011-7

Holland P. R., Kay A., Botte V. Numerical modeling of the thermal bar and its ecological consequences in a river-dominated lake // J. Mar. Syst. 2003. Vol. 43, no. 1–2. P. 61–81. doi: 10.1016/S0924-7963(03)00089-7

Jackson G. A., Williams P. M. Importance of dissolved organic nitrogen and phosphorus to biological nutrient cycling // Deep Sea Res. 1985. Vol. 32, no. 2. P. 223–235. doi: 10.1016/0198-0149(85)90030-5

Larson J. H., Evans M. A., Fitzpatrick F. A., Frost P. C., Bailey S., Kennedy R., James W. F., Richardson W. B., Reneau P. C. Water column nutrient processing rates in rivermouths of Green Bay (Lake Michigan) // Biogeochemistry. 2019. Vol. 142, no. 1. P. 73–93. doi: 10.1007/s10533-018-0517-z

Likhoshway 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. Vol. 22, no. 1. P. 5–14. doi: 10.1016/S0380-1330(96)70929-2

Maksimenko S. Y., Zemskaya T. I., Pavlova O. N., Ivanov V. G., Buryukhaev S. P. Microbial community of the water column of the Selenga River-Lake Baikal biogeochemical barrier // *Microbiology*. 2008. Vol. 77, no. 5. P. 587–594. doi: 10.1134/S0026261708050123

Moll R. A., Bratkovich A., Chang W. Y. B., Pu P. Physical, chemical, and biological conditions associated with the early stages of the Lake Michigan vernal thermal front // *Estuaries*. 1993. Vol. 16, no. 1. P. 92–103. doi: 10.2307/1352767

Parker R. A. Eddy diffusion of phytoplankton and nutrients: Estimating coefficients from simulated and observed vertical distributions // *J. Plankt. Res.* 1991. Vol. 13, no. 4. P. 815–830. doi: 10.1093/plankt/13.4.815

Rizhinashvili A. L., Maksimova O. B. Is nitrate a driver for pigments of phytoplankton (a case study from a small shallow European lake)? // *Ann. Limnol. – Int. J. Limnol.* 2018. Vol. 54. P. 1–9. doi: 10.1051/limn/2018029

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. Vol. 37, no. 5. P. 823–833. doi: 10.1139/f80-111

Sherstyankin P. P., Alekseev S. P., Abramov A. M., Stavrov K. G., De Batist M., Hus R., Canals M., Casamor J. L. Computer-based bathymetric map of Lake Baikal // *Dokl. Earth Sci.* 2006. Vol. 408, no. 4. P. 564–569. doi: 10.1134/S1028334X06040131

Shimaraev M. N., Verbolov V. I., Granin N. G., Sherstyankin P. P. Physical limnology of Lake Baikal: a Review. Irkutsk: Okayama, 1994.

## References

Ivanov V. G. Formirovanie i evolyutsiya vesennego termobara za schet stoka reki (na primere Selenginskogo melkovod'ya ozera Baikal) [Formation and evolution of the spring thermal bar due to river runoff (Selenga shallow of Lake Baikal)]. Summary of PhD (Cand. of Geogr.) thesis. Irkutsk, 2012. 24 p.

Shimaraev M. N., Grachev M. A., Imboden D. M., Okuda S., Granin N. G., Kipter R., Levin L. A., Endo S. Mezhdunarodnyi gidrofizicheskii eksperiment na Baikale: protsessy obnovleniya glubinnykh vod v vesennii period [International hydrophysical experiment in Lake Baikal: Spring deep water renewal]. *DAN [Dokl. Earth Sci.]*. 1995. Vol. 343, no. 6. P. 824–827.

Sinyukovich V. N., Zharikova N. G., Zharikov V. D. Stok reki Selengi v ee del'te [Selenga River runoff in its delta]. *Geografiya i prirod. resursy [Geography and natural resources]*. 2004. No. 3. P. 64–69.

Tarasova E. N. Organicheskoe veshchestvo vod Yuzhnogo Baikala [Organic matter in the waters of Southern Baikal]. Novosibirsk: Nauka, 1975. 147 p.

Tsydenov B. O. Chislennoe modelirovanie vzaimodeistviya komponentov sistemy «nutrient – fitoplankton – zooplankton – detrit» vo vremya evolyutsii vesennego termobara [Numerical modeling of the interaction between nutrient-phytoplankton-zooplankton-detritus system components during the spring thermal bar].

Tomberg I. V., Sorokovikova L. M., Popovskaya G. I., Bashenkhaeva N. V., Sinyukovich V. N., Ivanov V. G. Concentration dynamics of biogenic elements and phytoplankton at Selenga R. Mouth and in Selenga shallows (Lake Baikal) // *Water Resources*. 2014. Vol. 41, no. 6. P. 687–695. doi: 10.1134/S0097807814050157

Tsydenov B. O. Numerical modeling of the autumnal thermal bar // *J. Mar. Syst.* 2018a. Vol. 179. P. 1–9. doi: 10.1016/j.jmarsys.2017.11.004

Tsydenov B. O. Numerical modeling of the effect of inflow water mineralization in the dynamics of the autumnal thermal bar in Kamloops Lake // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2018b. Vol. 73, no. 4. P. 435–440. doi: 10.3103/S0027134918040148

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. Vol. 104. P. 73–83. doi: 10.1016/j.ocemod.2016.05.009

Tsydenov B. O., Starchenko A. V., Kay A. The effects of wind and diurnal variability of surface heat fluxes on riverine thermal bar dynamics: a numerical experiment // *Inland Waters*. 2018. Vol. 8, no. 3. P. 322–328. doi: 10.1080/20442041.2018.1481667

Ullman D., Brown J., Cornillon P., Mavor T. Surface temperature fronts in the Great Lakes // *J. Great Lakes Res.* 1998. Vol. 24, no. 4. P. 753–775. doi: 10.1016/S0380-1330(98)70860-3

Ward B. B., Kilpatrick R. A., Renger E. H., Eppley R. W. Biological nitrogen cycling in the nitracline // *Limnol. Oceanogr.* 1989. Vol. 34, no. 3. P. 493–513. doi: 10.4319/lo.1989.34.3.0493

Поступила в редакцию 13.12.2018

*Vestnik Tomskogo gos. univ. Matematika i mekhanika [Tomsk St. Univ. J. Mathematics and Mechanics]*. 2017. No. 50. P. 112–121. doi: 10.17223/19988621/50/10

Tsydenov B. O. Chislennoe modelirovanie efekta vesennego termobara v glubokom ozere [Numerical modeling of the effect of the spring thermal bar in a deep lake]. PhD (Cand. of Phys.-Math.) thesis. Tomsk, 2013. 145 p.

Verkhozina V. A., Verkhozina E. V. Biogeokhimicheskie protsessy krugovorota azota v ekosisteme ozera Baikal i ikh rol' v protsessakh formirovaniya kachestva vody [Biogeochemical processes of nitrogen cycle in the ecosystem of Lake Baikal and their role in water quality formation]. *Organicheskoe veshchestvo i biogennyye elementy vo vnutrennikh vodoemakh i morskikh vodakh: Materialy V Vseross. simp. s mezhdunar. uchastiem (Petrozavodsk, 10–14 sent. 2012 g.) [Organic matter and biogenic elements in inland water bodies and sea waters: Proceed. V All-Russ. symp. with int. part. (Petrozavodsk, Sept. 10–14, 2012)]*. Petrozavodsk, 2012. P. 27–30.

Verkhozina V. A., Verkhozina E. V., Chudnenko K. V. Rol' biogeokhimicheskikh protsessov v balanse azota ekosistemy ozera Baikal [Biogeochemical processes role in nitrogen balance of Lake Baikal ecosystem]. *Voda: khimiya i ekol. [Water: Chemistry and Ecol.]*. 2011. Vol. 12, no. 42. P. 3–7.

Vereshchagin G. Yu. O nekotorykh problemakh, svyazannykh s izucheniem Baikala [On some problems associated with the study of Baikal]. *Priroda* [Nature]. 1939. No. 12. P. 33–43.

Aleksandrova M. P., Gulev S. K., Sinitsyn A. V. An improvement of parametrization of short-wave radiation at the sea surface on the basis of direct measurements in the Atlantic. *Russ. Meteorology and Hydrology*. 2007. Vol. 32, no. 4. P. 245–251. doi: 10.3103/S1068373907040048

Blokhina N. S. The influence of wind on the development of a thermal bar and currents in reservoirs of different depths during ice cover melting. *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2015. Vol. 70, no. 4. P. 319–325. doi: 10.3103/S0027134915040050

Budd J., Kerfoot W. C., Pilant A., Jipping L. M. The Keweenaw Current and ice rafting: Use of satellite imagery to investigate copper-rich particle dispersal. *J. Great Lakes Res.* 1999. Vol. 25, no. 4. P. 642–662. doi: 10.1016/S0380-1330(99)70768-9

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. Cycles*. 2006. Vol. 20, no. 3. GB3007. doi: 10.1029/2005GB002456

Henderson-Sellers B. *Engineering Limnology*. Boston: Pitman Advanced Publishing Program, 1984. 288 p.

Hilton J., O'Hare M., Bowes M. J., Jones J. I. How green is my river? A new paradigm of eutrophication in rivers. *Sci. Total Environ.* 2006. Vol. 365, no. 1–3. P. 66–83. doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.02.055

Holland P. R., Kay A. A review of the physics and ecological implications of the thermal bar circulation. *Limnologia*. 2003. Vol. 33, no. 3. P. 153–162. doi: 10.1016/S0075-9511(03)80011-7

Holland P. R., Kay A., Botte V. Numerical modeling of the thermal bar and its ecological consequences in a river-dominated lake. *J. Mar. Syst.* 2003. Vol. 43, no. 1–2. P. 61–81. doi: 10.1016/S0924-7963(03)00089-7

Jackson G. A., Williams P. M. Importance of dissolved organic nitrogen and phosphorus to biological nutrient cycling. *Deep Sea Res.* 1985. Vol. 32, no. 2. P. 223–235. doi: 10.1016/0198-0149(85)90030-5

Larson J. H., Evans M. A., Fitzpatrick F. A., Frost P. C., Bailey S., Kennedy R., James W. F., Richardson W. B., Reneau P. C. Water column nutrient processing rates in rivermouths of Green Bay (Lake Michigan). *Biogeochemistry*. 2019. Vol. 142, no. 1. P. 73–93. doi: 10.1007/s10533-018-0517-z

Likhoshway 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. Vol. 22, no. 1. P. 5–14. doi: 10.1016/S0380-1330(96)70929-2

Maksimenko S. Y., Zemskaya T. I., Pavlova O. N., Ivanov V. G., Buryukhaev S. P. Microbial community of the water column of the Selenga River-Lake Baikal biogeochemical barrier. *Microbiology*. 2008. Vol. 77, no. 5. P. 587–594. doi: 10.1134/S0026261708050123

Moll R. A., Bratkovich A., Chang W. Y. B., Pu P. Physical, chemical, and biological conditions associated with the early stages of the Lake Michigan vernal thermal front. *Estuaries*. 1993. Vol. 16, no. 1. P. 92–103. doi: 10.2307/1352767

Parker R. A. Eddy diffusion of phytoplankton and nutrients: Estimating coefficients from simulated and observed vertical distributions. *J. Plankt. Res.* 1991. Vol. 13, no. 4. P. 815–830. doi: 10.1093/plankt/13.4.815

Rizhinashvili A. L., Maksimova O. B. Is nitrate a driver for pigments of phytoplankton (a case study from a small shallow European lake)? *Ann. Limnol. – Int. J. Lim.* 2018. Vol. 54. P. 1–9. doi: 10.1051/limn/2018029

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. Vol. 37, no. 5. P. 823–833. doi: 10.1139/f80-111

Sherstyankin P. P., Alekseev S. P., Abramov A. M., Stavrov K. G., De Batist M., Hus R., Canals M., Casamor J. L. Computer-based bathymetric map of Lake Baikal. *Dokl. Earth Sci.* 2006. Vol. 408, no. 4. P. 564–569. doi: 10.1134/S1028334X06040131

Shimaraev M. N., Verbolov V. I., Granin N. G., Sherstyankin P. P. *Physical limnology of Lake Baikal: a Review*. Irkutsk: Okayama, 1994.

Tomberg I. V., Sorokovikova L. M., Popovskaya G. I., Bashenkhaeva N. V., Sinyukovich V. N., Ivanov V. G. Concentration dynamics of biogenic elements and phytoplankton at Selenga R. Mouth and in Selenga shallows (Lake Baikal). *Water Resources*. 2014. Vol. 41, no. 6. P. 687–695. doi: 10.1134/S0097807814050157

Tsydenov B. O. Numerical modeling of the autumnal thermal bar. *J. Mar. Syst.* 2018. Vol. 179. P. 1–9. doi: 10.1016/j.jmarsys.2017.11.004

Tsydenov B. O. Numerical modeling of the effect of inflow water mineralization in the dynamics of the autumnal thermal bar in Kamloops Lake. *Moscow Univ. Phys. Bull.* Vol. 73, no. 4. P. 435–440. doi: 10.3103/S0027134918040148

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. Vol. 104. P. 73–83. doi: 10.1016/j.ocemod.2016.05.009

Tsydenov B. O., Starchenko A. V., Kay A. The effects of wind and diurnal variability of surface heat fluxes on riverine thermal bar dynamics: a numerical experiment. *Inland Waters*. 2018. Vol. 8, no. 3. P. 322–328. doi: 10.1080/20442041.2018.1481667

Ullman D., Brown J., Cornillon P., Mavor T. Surface temperature fronts in the Great Lakes. *J. Great Lakes Res.* 1998. Vol. 24, no. 4. P. 753–775. doi: 10.1016/S0380-1330(98)70860-3

Ward B. B., Kilpatrick R. A., Renger E. H., Eppley R. W. Biological nitrogen cycling in the nitracline. *Limnol. Oceanogr.* 1989. Vol. 34, no. 3. P. 493–513. doi: 10.4319/lo.1989.34.3.0493

Received December 13, 2018

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:****Цыденов Баир Олегович**

старший научный сотрудник научно-исследовательской  
лаборатории вычислительной геофизики, к. ф.-м. н.  
Национальный исследовательский  
Томский государственный университет  
пр. Ленина, 36, Томск, Россия, 634050  
эл. почта: tsydenov@math.tsu.ru  
тел.: (3822) 783593

**CONTRIBUTOR:****Tsydenov, Bair**

Tomsk State University  
36 Lenin Ave, 634050 Tomsk, Russia  
e-mail: tsydenov@math.tsu.ru  
tel.: (3822) 783593