

# Features of changes in the concentrations of nutrients and plankton at the thermal bar: A numerical experiment



Tsydenov B.O.\*, Bart A.A., Degi D.V., Churuksaeva V.V., Trunov N.S.

Tomsk State University, Lenin Ave., 36, Tomsk, 634050, Russia

**ABSTRACT.** On the example of Barguzin Bay of Lake Baikal, mathematical modeling of the dynamics of nutrients and plankton during the development of the spring thermal bar was carried out. The meteorological data of the Ust-Barguzin station for June 2023 were set in the calculations. An analysis of the horizontal movement of the area of the maximum density temperature at the lake surface was carried out, the features of changes in the concentration of nitrates, ammonium, phosphates, dissolved oxygen, as well as phyto- and zooplankton in this area are described.

**Keywords:** numerical modeling, thermal bar, nutrients, dissolved oxygen, plankton, Lake Baikal

**For citation:** Tsydenov B.O., Bart A.A., Degi D.V., Churuksaeva V.V., Trunov N.S. Features of changes in the concentrations of nutrients and plankton at the thermal bar: A numerical experiment // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 1115-1120. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-1115

## 1. Introduction

Under the influence of natural and anthropogenic factors, the rate of negative changes occurring in bodies of water has accelerated significantly over the past decades. In Lake Baikal, the deterioration of water quality is mainly observed in the littoral, for example, in the delta of the Selenga River (Tomberg et al., 2014), while in the pelagic region during 1950-2015 the level of nutrients remains relatively stable (Domysheva et al., 2023).

Nutrients like dissolved oxygen, nitrogen and phosphorus serve as key indicators of the well-being of the aquatic ecosystem. Dissolved oxygen in the lake is replenished through photosynthesis, interaction with the atmosphere, is consumed during the respiration of living organisms, oxidation of organic substances, and is also involved in other chemical reactions (Palshin et al., 2021). According to measurements (Domysheva et al., 2023) in Baikal, the concentration of dissolved oxygen has stable daily and seasonal variability, and organic matter is unevenly distributed. During the development of the thermal bar (a natural phenomenon that is a narrow zone of surface water immersion in the vicinity of the temperature of maximum density) in Lake Baikal, spatial heterogeneities in the physical, chemical and biological characteristics of the deep waters of the lake are noted (Shimaraev et al., 1995; Likhoshway et al., 1996; Parfenova et al., 2000).

\*Corresponding author.

E-mail address: [tsydenov@math.tsu.ru](mailto:tsydenov@math.tsu.ru) (B.O. Tsydenov)

**Received:** May 27, 2024; **Accepted:** June 14, 2024;

**Available online:** August 30, 2024

The purpose of this work is mathematical modeling of the dynamics of plankton and nutrients at the front of the thermal bar on the example of Barguzin Bay of Lake Baikal.

## 2. Materials and methods

The vertical section of Barguzin Bay of Lake Baikal is considered, the origin of the coordinate system corresponds to the mouth of the Barguzin River (Fig. 1A). A computational domain having a length of 20 km and a depth of 100 m (Fig. 1B), covered with a uniform orthogonal grid with steps  $h_x = 25$  m and  $h_z = 2.5$  m. The time step is 10 s.

The mathematical model used in the work is based on models of the cycle of nitrogen (Fennel et al., 2006), phosphorus (Gan et al., 2014) and oxygen (Fennel et al., 2013). The circulation of dissolved oxygen in the body of water is carried out through oxygen exchange with the atmosphere, biogeochemical processes and physical transport. The biochemical dynamics of oxygen are described by the processes of photosynthesis ( $+O_2$ ), respiration ( $-O_2$ ), nitrification ( $-O_2$ ) and remineralization ( $-O_2$ ). The physical transport of nutrients and plankton in the lake is implemented on the basis of a thermohydrodynamic model, which includes equations of continuity, momentum, energy, turbulent characteristics, etc. (Tsydenov, 2022).

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



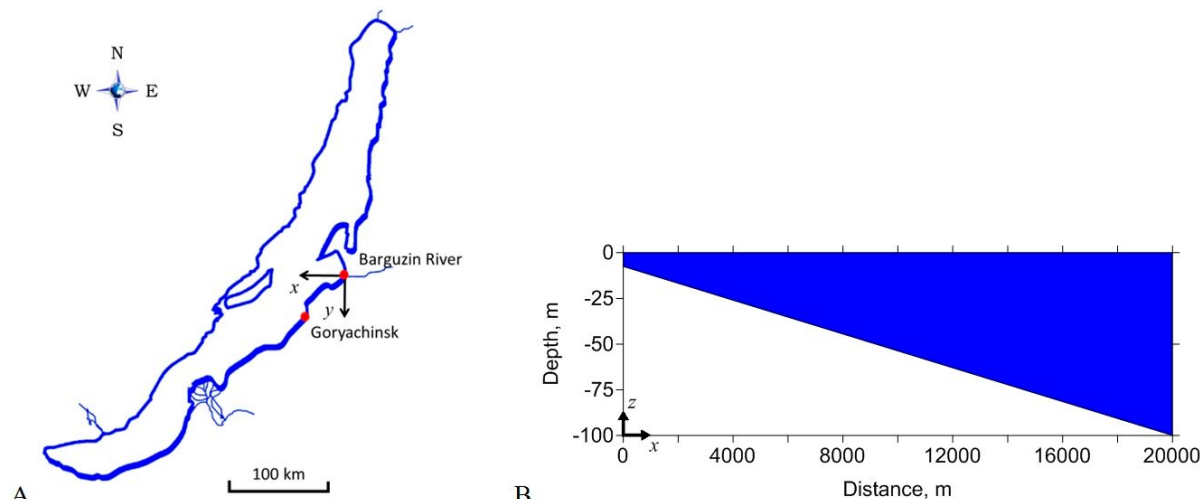


Fig.1. Lake Baikal cross-section (A) and calculation domain (B).

In the calculation experiment, the concentrations of nitrates, ammonium, phosphates and oxygen at the initial moment of time were taken equal to  $1.0 \text{ mmol/m}^3$ ,  $1.0 \text{ mmol/m}^3$ ,  $0.05 \text{ mmol/m}^3$  and  $312 \text{ mmolO}_2/\text{m}^3$ , respectively. The initial concentration distribution for planktonic and detrital components is  $0.2 \text{ mmolN/m}^3$  and  $0.1 \text{ mmolN/m}^3$ , respectively. The amount of chlorophyll a is determined from the ratio of chlorophyll/phytoplankton = 1.59. The boundary conditions at the confluence of the river into the lake for the biogeochemical model variables coincide with their initial values. The shear stress of the wind and the components of heat fluxes at the water surface were calculated according to the data from the weather conditions archive of the weather station in Ust-Barguzin for June 2023 (<https://rp5.ru/>). Values of physical parameters adopted in the model are given in (Tsydenov, 2023).

### 3. Results and discussion

The behavior of horizontal movement of the location of maximum density temperature on the surface of the lake (Fig. 2A) indicates an increase in the influence of intra-day variations in atmospheric parameters when the thermal bar is removed from the mouth of the river tributary. In the first 5 days of the month, the spread of

the thermal bar front either accelerates or slows down and even reverses (toward the mouth of the river) as a result of the joint effect of night cooling and the action of oppositely directed westerly winds. On day 5, the location of the maximum density temperature reached a distance of 3600 m, and on day 10 – 6850 m. The average horizontal velocity of the thermal bar was 685 m/day.

The concentration of dissolved oxygen on the surface of the body of water in the area of the temperature of maximum density increases by days 1-6 to  $341 \text{ mmolO}_2/\text{m}^3$ , after which (for 7-10 days) it fluctuates in a rather narrow range (Fig. 2C). There are jumps of 1, 2 and 6 days. The level of nitrates in this area rises from 1 to  $1.028 \text{ mmol/m}^3$  (Fig. 2B). The ammonium concentration gradually drops from 1 to  $0.972 \text{ mmol/m}^3$  (Fig. 2B). Zooplankton biomass gradually decreases from 0.2 to  $0.172 \text{ mmolN/m}^3$  (Fig. 2C). It is important to note that in the area of maximum density temperature, the change in the listed nutrients and zooplankton (unlike phosphates and phytoplankton) over time is monotonous. The phosphate concentration decreases from 0.05 to  $0.0493 \text{ mmol/m}^3$  on day 4, after which it returns to  $0.05 \text{ mmol/m}^3$  on day 10 (Fig. 2B). Phytoplankton biomass grows from 0.2 to  $0.206 \text{ mmolN/m}^3$  on day 3, and then drops to  $0.1875 \text{ mmolN/m}^3$  on day 10 (Fig. 2C).

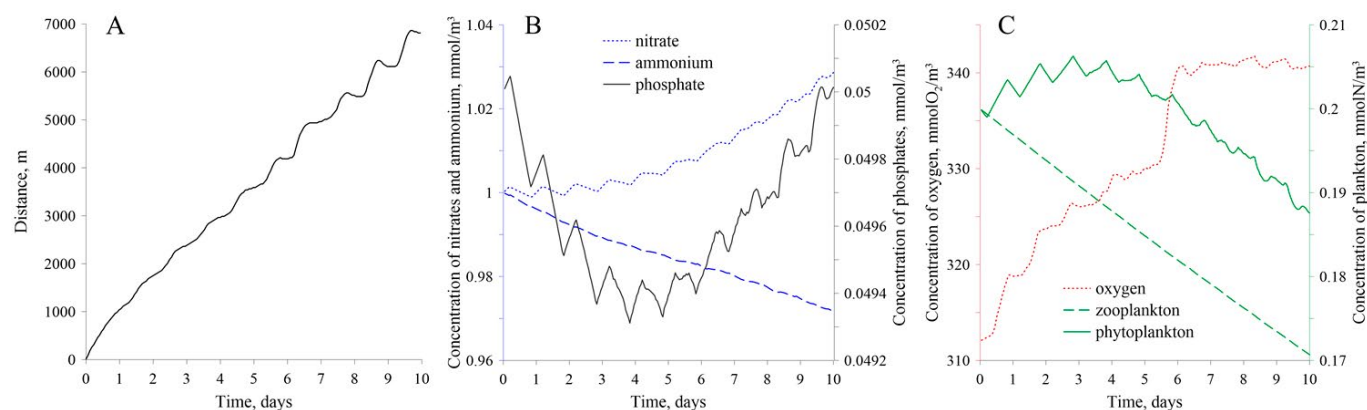


Fig.2. The position of maximum density temperature (A), the concentration of nutrients and plankton at this position (B, C).

## 4. Conclusions

The results of mathematical modeling performed for Barguzin Bay of Lake Baikal indicate an increase in the influence of intra-day variations in atmospheric parameters on the rate of propagation of the thermal bar as it moves away from the coast. In particular, the change in the direction of movement of the thermal front toward the mouth of the Barguzin River can be caused by a combination of two factors: (1) the effect of the west wind and (2) the effect of night cooling. It was found that over time, the content of nitrates and dissolved oxygen increases on the thermal front, and the level of ammonium and zooplankton tends to decrease. Changes in the concentration of phosphates and phytoplankton in the thermal bar area in the spring-summer period are non-monotonic.

## Acknowledgements

This study was funded by the Russian Science Foundation (project No. 23-71-10020, <https://www.rscf.ru/en/project/23-71-10020/>).

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

## References

Domysheva V., Vorobyeva S., Golobokova L. et al. 2023. Assessment of the current trophic status of the Southern Baikal littoral zone. *Water* 15: 1139. DOI: [10.3390/w15061139](https://doi.org/10.3390/w15061139)

Fennel K., Hu J., Laurent A. et al. 2013. Sensitivity of hypoxia predictions for the Northern Gulf of Mexico to sediment oxygen consumption and model nesting. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 118(2): 990–1002. DOI: [10.1002/jgrc.20077](https://doi.org/10.1002/jgrc.20077)

Fennel K., Wilkin J., Levin J. et al. 2006. Nitrogen cycling in the Middle Atlantic Bight: Results from a three-dimen-

sional model and implications for the North Atlantic nitrogen budget. *Global Biogeochemical Cycles* 20(3): GB3007. DOI: [10.1029/2005GB002456](https://doi.org/10.1029/2005GB002456)

Gan J., Lu Z., Cheung A. et al. 2014. Assessing ecosystem response to phosphorus and nitrogen limitation in the Pearl River plume using the Regional Ocean Modeling System (ROMS). *Journal of Geophysical Research: Oceans* 119(12): 8858–8877. DOI: [10.1002/2014JC009951](https://doi.org/10.1002/2014JC009951)

Likhoshway Y.V., Kuzmina A.Ye., Potyemkina T.G. et al. 1996. The distribution of diatoms near a thermal bar in Lake Baikal. *Journal of Great Lakes Research* 22(1): 5–14. DOI: [10.1016/S0380-1330\(96\)70929-2](https://doi.org/10.1016/S0380-1330(96)70929-2)

Palshin N., Zdorovenova G., Efremova T. et al. 2021. Dissolved oxygen stratification in a small lake depending on water temperature and density and wind impact. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 937: 032019. DOI: [10.1088/1755-1315/937/3/032019](https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/3/032019)

Parfenova V.V., Shimaraev M.N., Kostornova T.Y. et al. 2000. On the vertical distribution of microorganisms in Lake Baikal during spring deep-water renewal. *Microbiology* 69: 357–363. DOI: [10.1007/BF02756748](https://doi.org/10.1007/BF02756748)

Shimaraev M.N., Grachev M.A., Imboden D.M. et al. 1995. Mezhdunarodnyj gidrofizicheskij eksperiment na Bajkale: processy obnovleniya glubinnyh vod v vesennij period [International hydrophysical experiment in Lake Baikal: Spring deep-water renewal]. *Doklady Akademii Nauk* 343(6): 824–827. (in Russian)

Tomberg I., Sorokovikova L., Popovskaya G. et al. 2014. Concentration dynamics of biogenic elements and phytoplankton at Selenga R. mouth and in Selenga shallows (Lake Baikal) *Water Resources* 41: 687–695. DOI: [10.1134/S0097807814050157](https://doi.org/10.1134/S0097807814050157)

Tsydenov B.O. 2022. Modeling biogeochemical processes in a freshwater lake during the spring thermal bar. *Ecological Modelling* 465: 109877. DOI: [10.1016/j.ecolmodel.2022.109877](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.109877)

Tsydenov B.O. 2023. A mathematical model of dissolved oxygen transport during the thermal bar evolution. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics* 86: 176–187. DOI: [10.17223/19988621/86/14](https://doi.org/10.17223/19988621/86/14)

# Особенности изменения концентрации планктона и биогенных элементов в области термобара: вычислительный эксперимент

Краткое сообщение

LIMNOLOGY  
FRESHWATER  
BIOLOGY

Цыденов Б.О.\*, Барт А.А., Деги Д.В., Чуруксаева В.В., Трунов Н.С.

Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, г. Томск, 634050, Россия

**АННОТАЦИЯ.** На примере Баргузинского залива оз. Байкал проведено математическое моделирование динамики биогенных элементов и планктона во время развития весеннего термобара. В расчетах задавались метеорологические данные станции п. Усть-Баргузин за июнь 2023 г. Проведен анализ горизонтального движения области расположения температуры максимальной плотности на поверхности озера, описаны особенности изменения концентрации нитратов, аммония, фосфатов, растворенного кислорода, а также фито- и зоопланктона в этой области.

**Ключевые слова:** численное моделирование, термобар, биогенные элементы, растворенный кислород, планктон, озеро Байкал

**Для цитирования:** Цыденов Б.О., Барт А.А., Деги Д.В., Чуруксаева В.В., Трунов Н.С. Особенности изменения концентрации планктона и биогенных элементов в области термобара: вычислительный эксперимент // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 1115-1120. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-1115

## 1. Введение

Под действием природных и антропогенных факторов темпы негативных изменений, происходящих в водоемах, за последние десятилетия существенно ускорились. В озере Байкал ухудшение качества воды главным образом наблюдается в литорали, например, в дельте р. Селенги (Tomberg et al., 2014), в то время как в пелагиали на протяжении 1950–2015 гг. уровень питательных веществ остается относительно стабильным (Domysheva et al., 2023).

Биогенные элементы, как растворенный кислород, азот и фосфор, служат ключевыми индикаторами благополучия водной экосистемы. Растворенный кислород в озере пополняется за счет фотосинтеза, взаимодействия с атмосферой, расходуется при дыхании живых организмов, окислении органических веществ, а также участвует в других химических реакциях (Palshin et al., 2021). Согласно данным измерений (Domysheva et al., 2023) в Байкале концентрация растворенного кислорода имеет устойчивую суточную и сезонную изменчивость, а органическое вещество распределено неравномерно. Во время развития термобара (природного явления, представляющего собой узкую зону погружения поверхностных вод в окрестности температуры максимальной плотности) в Байкале

отмечаются пространственные неоднородности физических, химических и биологических характеристик глубинных вод озера (Шимараев и др., 1995; Likhoshway et al., 1996; Parfenova et al., 2000).

Целью настоящей работы является математическое моделирование динамики планктона и биогенных элементов в области расположения фронта термобара на примере Баргузинского залива оз. Байкал.

## 2. Материалы и методы

Рассматривается вертикальное сечение Баргузинского залива оз. Байкал, начало системы координат соответствует устью р. Баргузин (Рис. 1, а). Вычислительная область, имеющая длину 20 км и глубину 100 м (Рис. 1, б), покрыта равномерной ортогональной сеткой с шагами  $h_x = 25$  м и  $h_z = 2.5$  м. Шаг по времени составляет 10 с.

Используемая в работе математическая модель основана на моделях цикла азота (Fennel et al., 2006), фосфора (Gan et al., 2014) и кислорода (Fennel et al., 2013). Циркуляция растворенного кислорода в водоеме осуществляется через природный обмен с атмосферой, биогеохимические процессы и физический транспорт. Биохимическая динамика кислорода описывается процессами

\*Автор для переписки.

Адрес e-mail: [tsydenov@math.tsu.ru](mailto:tsydenov@math.tsu.ru) (Б.О. Цыденов)

Поступила: 27 мая 2024; Принята: 14 июня 2024;

Опубликована online: 30 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.





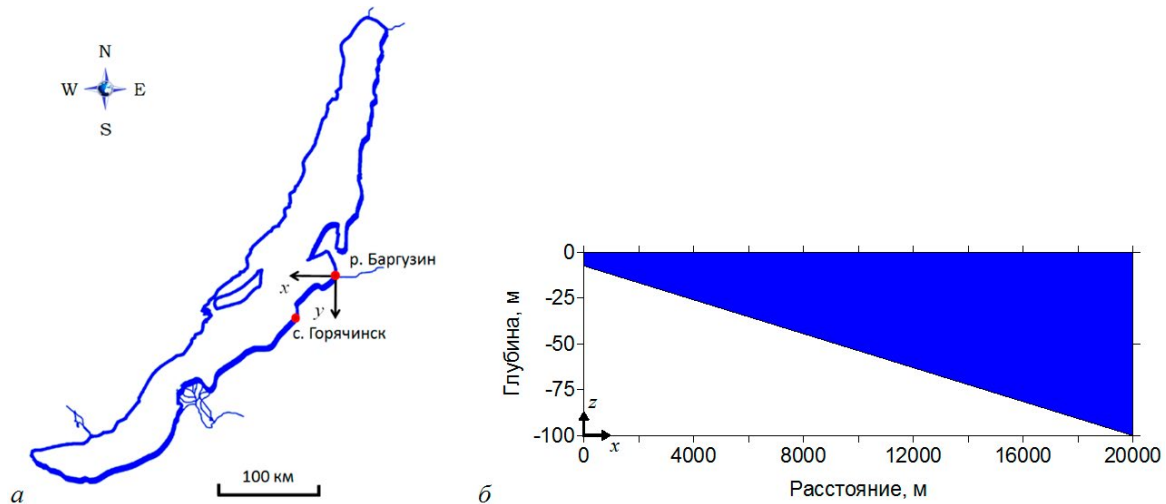


Рис.1. Схема разреза (а) и вычислительная область (б).

фотосинтеза (+O<sub>2</sub>), дыхания (-O<sub>2</sub>), нитрификации (-O<sub>2</sub>) и реминерализации (-O<sub>2</sub>). Физический транспорт биогенных элементов и планктона в озере реализован на основе термогидродинамической модели, включающей в себя уравнения неразрывности, количества движения, энергии, турбулентных характеристик и др. (Tsydenov, 2022).

В вычислительном эксперименте значения концентрации нитратов, аммония, фосфатов и кислорода в начальный момент времени приняты равными 1.0 ммоль/м<sup>3</sup>, 1.0 ммоль/м<sup>3</sup>, 0.05 ммоль/м<sup>3</sup> и 312 ммольО<sub>2</sub>/м<sup>3</sup> соответственно. Начальное распределение концентрации для планктонных и детритных компонентов составляет 0.2 ммольN/м<sup>3</sup> и 0.1 ммольN/м<sup>3</sup> соответственно. Количество хлорофилла а задано исходя из соотношения хлорофилл/фитопланктон = 1.59. Граничные условия на месте впадения реки в озеро для переменных биогеохимической модели совпадают с их начальными значениями. Касательное напряжение ветра и компоненты тепловых потоков, контактирующих с водной поверхностью, вычислены согласно данным из архива погодных условий метеостанции п. Усть-Баргузин за июнь 2023 г. (<https://rp5.ru/>). Значения физических параметров, принятых в модели, приведены в работе (Цыденов, 2023).

### 3. Результаты и обсуждение

Поведение горизонтального движения области расположения температуры максимальной плотности на поверхности озера (Рис. 2, а) свидетельствует об усилении влияния внутрисуточных вариаций атмосферных параметров при удалении термобара от устья речного притока. Во второй половине первой декады месяца распространение фронта термобара то ускоряется, то замедляется и даже наблюдается обратное движение (в сторону устья реки) в результате совместного эффекта ночного выхолаживания и действия противоположно направленных западных ветров. На 5 сут местоположение температуры максимальной плотности достигло расстояния 3600 м, а на 10 сут – 6850 м. Средняя скорость горизонтального движения термобара составила 685 м/сут.

Концентрация растворенного кислорода на поверхности водоема в области расположения температуры максимальной плотности на 1–6 сут возрастает до отметки в 341 ммольО<sub>2</sub>/м<sup>3</sup>, после чего (на 7–10 сут) колеблется в достаточно узком диапазоне (Рис. 2, в). Наблюдаются скачки на 1, 2 и 6 сут. Уровень нитратов в этой области повышается с 1 до 1.028 ммоль/м<sup>3</sup> (Рис. 2, б). Концентрация аммония

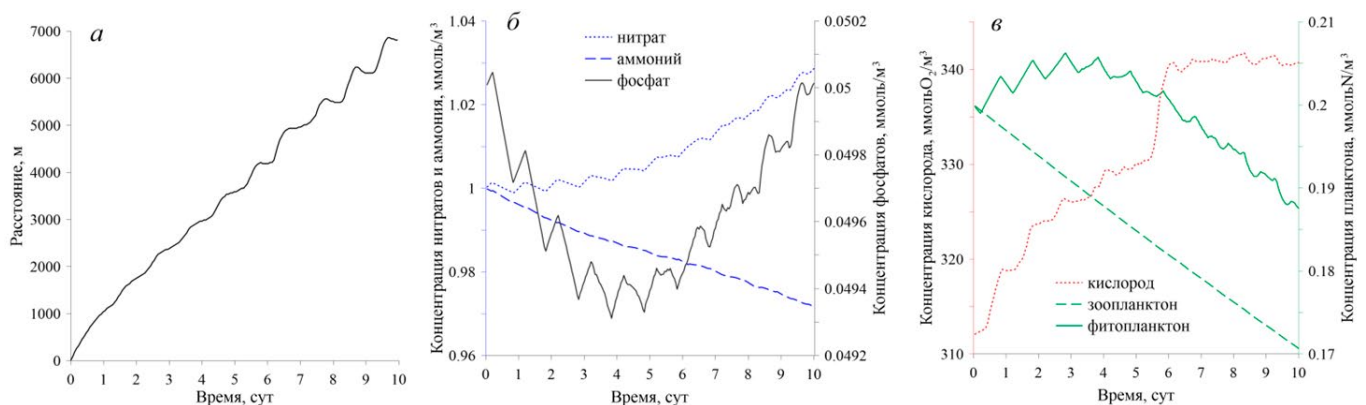


Рис.2. Область расположения температуры максимальной плотности на поверхности озера (а), концентрация биогенных элементов и планктона в этой области (б, в).

постепенно падает с 1 до 0.972 ммоль/м<sup>3</sup> (Рис. 2, б). Биомасса зоопланктона постепенно уменьшается с 0.2 до 0.172 ммольN/м<sup>3</sup> (Рис. 2, в). Важно заметить, что в области температуры максимальной плотности изменение перечисленных биогенных элементов и зоопланктона (в отличие от фосфатов и фитопланктона) с течением времени имеет монотонный характер. Концентрация фосфатов со значения 0.05 ммоль/м<sup>3</sup> сокращается до 0.0493 ммоль/м<sup>3</sup> на 4 сут, после чего возвращается к значению 0.05 ммоль/м<sup>3</sup> на 10 сут (рис. 2, б). Биомасса фитопланктона растет с 0.2 до 0.206 ммольN/м<sup>3</sup> на 3 сут, а затем падает до 0.1875 ммольN/м<sup>3</sup> на 10 сут (Рис. 2, в).

#### 4. Выводы

Результаты математического моделирования, выполненного для условий Баргузинского залива оз. Байкал, свидетельствуют об усилении влияния внутрисуточных вариаций атмосферных параметров на скорость распространения термобара по мере его удаления от берега. В частности, смена направления движения термического фронта в сторону устья р. Баргузин может быть вызвана комбинацией двух факторов: (1) воздействие западного ветра и (2) эффект ночного выхолаживания. Выявлено, что с течением времени содержание нитратов и растворенного кислорода повышается на термическом фронте, а уровень аммония и зоопланктона имеет тенденцию к снижению. Изменение концентрации фосфатов и фитопланктона в области термобара в весенне-летний период носит немонотонный характер.

#### Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-71-10020, <https://www.rscf.ru/project/23-71-10020/>.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Список литературы

- Domyшева V., Vorobyeva S., Golobokova L. et al. 2023. Assessment of the current trophic status of the Southern Baikal littoral zone. *Water* 15: 1139. DOI: [10.3390/w15061139](https://doi.org/10.3390/w15061139)
- Fennel K., Hu J., Laurent A. et al. 2013. Sensitivity of hypoxia predictions for the Northern Gulf of Mexico to sediment oxygen consumption and model nesting. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 118(2): 990–1002. DOI: [10.1002/jgrc.20077](https://doi.org/10.1002/jgrc.20077)
- Fennel K., Wilkin J., Levin J. et al. 2006. Nitrogen cycling in the Middle Atlantic Bight: Results from a three-dimensional model and implications for the North Atlantic nitrogen budget. *Global Biogeochemical Cycles* 20(3): GB3007. DOI: [10.1029/2005GB002456](https://doi.org/10.1029/2005GB002456)
- Gan J., Lu Z., Cheung A. et al. 2014. Assessing ecosystem response to phosphorus and nitrogen limitation in the Pearl River plume using the Regional Ocean Modeling System (ROMS). *Journal of Geophysical Research: Oceans* 119(12): 8858–8877. DOI: [10.1002/2014JC009951](https://doi.org/10.1002/2014JC009951)
- Likhoshvay Y.V., Kuzmina A.Ye., Potyemkina T.G. et al. 1996. The distribution of diatoms near a thermal bar in Lake Baikal. *Journal of Great Lakes Research* 22(1): 5–14. DOI: [10.1016/S0380-1330\(96\)70929-2](https://doi.org/10.1016/S0380-1330(96)70929-2)
- Palshin N., Zdorovenova G., Efremova T. et al. 2021. Dissolved oxygen stratification in a small lake depending on water temperature and density and wind impact. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 937: 032019. DOI: [10.1088/1755-1315/937/3/032019](https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/3/032019)
- Parfenova V.V., Shimaraev M.N., Kostornova T.Y. et al. 2000. On the vertical distribution of microorganisms in Lake Baikal during spring deep-water renewal. *Microbiology* 69: 357–363. DOI: [10.1007/BF02756748](https://doi.org/10.1007/BF02756748)
- Шимараев М.Н., Грачев М.А., Имбоден Д.М. и др. 1995. Международный гидрофизический эксперимент на Байкале: процессы обновления глубинных вод в весенний период. *Докл. РАН* 343(6): 824–827.
- Tomberg I., Sorokovikova L., Popovskaya G. et al. 2014. Concentration dynamics of biogenic elements and phytoplankton at Selenga R. mouth and in Selenga shallows (Lake Baikal). *Water Resources* 41: 687–695. DOI: [10.1134/S0097807814050157](https://doi.org/10.1134/S0097807814050157)
- Tsydenov B.O. 2022. Modeling biogeochemical processes in a freshwater lake during the spring thermal bar. *Ecological Modelling* 465: 109877. DOI: [10.1016/j.ecolmodel.2022.109877](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.109877)
- Цыденов Б.О. 2023. Математическая модель транспорта растворенного кислорода при развитии термобара. *Вестник Томского Государственного университета. Математика и механика* 86: 176–187. DOI: [10.17223/19988621/86/14](https://doi.org/10.17223/19988621/86/14)