

*А. А. Цхай<sup>1</sup>, В. Ю. Агейков<sup>1</sup>, М. А. Романов<sup>1\*</sup>*

## **О моделировании биогенных циклов в экосистеме Телецкого озера**

<sup>1</sup> Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул, Российская Федерация  
\* e-mail: max.rom1@mail.ru

**Аннотация.** Цель работы – создание математической модели циклов биогеохимической трансформации соединений азота и фосфора, а также кислородного режима для экосистемы Телецкого озера. Осуществлен начальный этап разработки и параметризации модели в точечном приближении. Для предварительной верификации использованы данные по показателям, контролируемым Государственной наблюдательной сетью Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, на соответствие установленным значениям предельно-допустимых концентраций для водоемов рыбохозяйственного назначения. Представлены результаты модельных расчетов с использованием набора данных мониторинговых и экспедиционных наблюдений за состоянием экосистемы Телецкого озера. Результаты сценарного расчета по сформулированной модели соответствуют данным натурных наблюдений на объекте исследования по выбранным компонентам и известным внутригодовым трендам их изменчивости в экосистемах пресноводных водоемов.

**Ключевые слова:** Телецкое озеро, математическая модель, трансформация, биогеохимический цикл

*A. A. Tskhai<sup>1</sup>, V. Y. Ageikov<sup>1</sup>, M. A. Romanov<sup>1\*</sup>*

## **On modeling of biogenic cycles in the ecosystem of the Lake Teletskoye**

<sup>1</sup> Institute for Water and Environmental Problems, SB RAS, Barnaul, Russian Federation  
\* e-mail: max.rom1@mail.ru

**Abstract.** The aim of the work is to create a mathematical model of the cycles of biogeochemical transformation of nitrogen and phosphorus compounds, as well as the oxygen regime for the ecosystem of Lake Teletskoye. The initial stage of the development and parameterization of the model in the point approximation has been carried out. For preliminary verification, data on indicators controlled by the State Monitoring Network of Roskomhydromet were used for compliance with the established values of maximum permissible concentrations for fisheries reservoirs. The results of model calculations using a dataset of monitoring and expedition observations of the state of the ecosystem of Lake Teletskoye are presented. The results of the scenario calculation according to the formulated model correspond to the data of field observations at the research object for the selected components and known intra-annual trends of their variability in freshwater ecosystems.

**Keywords:** Teletskoye lake, mathematical model, transformation, biogeochemical cycle

## Введение

Важность использования методов имитационного моделирования для оценки состояния экосистемы Телецкого озера (ТО) - не требует доказательств. В [1] выполнен анализ существующей исходной информации для моделирования круговорота биогенных веществ в экосистеме ТО. В [2] представлена полная запись уравнений модели биогеохимической трансформации азота и фосфора, а также кислородного режима в точечном приближении. Из научных трудов по изучению физико-химических процессов в данном водоеме следует отметить недавнюю публикацию [3], где в рамках одномерного вертикального приближения реализована модифицированная модель Стритера-Фелпса. К названному типу относят модели, в которых из химических веществ, взаимодействующих с растворенным кислородом, учитывается только лабильное органическое вещество (к примеру, потери кислорода в ходе процесса нитрификации соединений азота во внимание не принимаются).

Цель проводимого исследования – создание математической модели биогеохимической трансформации соединений азота и фосфора, а также кислородного режима для вод ТО. Выполняется численное моделирование для каждого компонента круговорота биогенных веществ и растворенного кислорода. Для проведения верификации и модельных расчетов на основе мониторинговых данных Государственной наблюдательной сети Росгидромета и экспедиционных исследований ИВЭП и ИСЭЖ СО РАН использован сценарный вариант исходных данных, усредненных по месяцам. Этот вариант учитывает особенности экосистемы ТО, охарактеризованные в публикациях [4, 5, 6, 7].

## Методы и материалы

Для исследования состояния экосистемы ТО используется модель циклов азота и фосфора, а также кислородного режима в экосистеме ТО [2]. Для моделирования внутригодовой изменчивости компонентов экосистемы использована схема биогеохимической трансформации (рис. 1).

Здесь  $ZON$  – зоопланктонный азот;  $ZOP$  – зоопланктонный фосфор;  $FN$  – фитопланктонный азот;  $FP$  – фитопланктонный фосфор;  $NH_4$  – аммонийный азот;  $NO_2$  – нитритный азот;  $NO_3$  – нитратный азот;  $ND$  – детритный азот;  $PD$  – детритный фосфор;  $DON$  – растворенный органический азот;  $DOP$  – растворенный органический фосфор;  $DIP$  – фосфаты;  $O_2$  – растворенный кислород;  $C_{BN}$  – органический азот, участвующий в обменных процессах в донных отложениях (ДО);  $C_{BP}$  – органический фосфор, участвующий в обменных процессах в ДО;  $P_B$  – интерстициальный фосфор в поровом пространстве ДО;  $N_B$  – интерстициальный азот в поровом пространстве ДО;  $P_S$  – фосфор, сорбированный на твердой фазе ДО;  $N_S$  – азот, сорбированный на твердой фазе ДО;  $C_N$  – органический азот в пассивных формах в составе ДО;  $C_P$  – органический фосфор в пассивных формах в составе ДО.

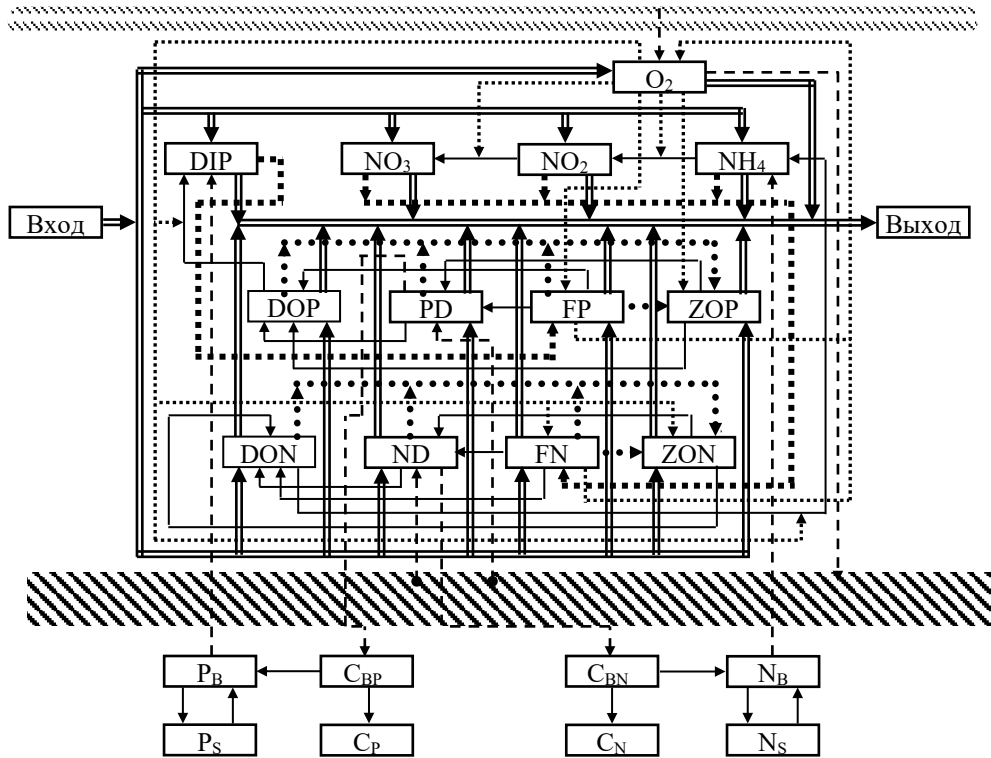


Рис. 1. Схема биогеохимической трансформации азота и фосфора, а также кислородного режима в экосистеме Телецкого озера

Уравнения модели для случая точечного (пространственно-однородного) приближения имеют следующий вид:

Для процессов в водной толще:

$$\frac{d(C_i \times W)}{dt} = W \times R_i + Q^p \times C_i^p - Q_- \times C_i + J_i \times \Omega + G_i \times L \quad (1)$$

где  $i = ZON, FN, NH_4, NO_2, NO_3, ND, DON, ZOP, FP, DIP, PD, DOP, O_2$ .

Для процессов в деятельном слое донных отложений (ДО):

$$\begin{aligned} \frac{dC_{CBN}}{dt} &= -\frac{\alpha \cdot J_{ND}}{s \cdot L_1} - k_m^N \cdot C_{CBN}; & \frac{dC_{CBP}}{dt} &= -\frac{\alpha \cdot J_{PD}}{s \cdot L_1} - k_m^P \cdot C_{CBP}; \\ s \cdot \frac{dC_{NB}}{dt} &= k_m^N \cdot s \cdot C_{CBN} - \frac{K_N \cdot (C_{NB} - C_{NH_4}) + V_f^N \cdot C_{NH_4}}{L_1} - \frac{dC_{NS}}{dt}; & (2) \\ s \cdot \frac{dC_{PB}}{dt} &= k_m^P \cdot s \cdot C_{CBP} - \frac{K_P \cdot (C_{PB} - C_{DIP}) + V_f^P \cdot C_{DIP}}{L_1} - \frac{dC_{PS}}{dt}; \\ C_{NS} &= \gamma_N \times C_{NB}; & C_{PS} &= \gamma_P \times C_{PB}. \end{aligned}$$

Здесь использованы следующие обозначения:  $t$  – время от начала года;  $W$  – объем водоема;  $R_i$  – скорость биохимической трансформации соответствующего соединения  $C_i$ ;  $Q^P$  – расход основного притока;  $C_i^P$  – концентрация компонентов в основном притоке;  $Q_-$  – расход стока из водоема (р. Бия);  $J_i$  – массовые потоки на межфазных поверхностях: «воздух - вода», «вода – донные отложения»;  $\Omega$  – площадь зеркала водохранилища;  $G_i$  – боковая нагрузка, характеризующая поступление с берегов;  $L$  – длина береговой линии водоема;  $T$  – температура воды.

Способ расчета коэффициентов модели приведен в работе [2]. В данном исследовании авторами разработан программный комплекс, реализующий сформулированную выше имитационную модель. Модельные расчеты проводили для периода с 1 января по 31 декабря для сценарных условий гидрологического года (2015-2016 гг.) по среднемноголетним данным, которые приведены в [1]. Шаг по времени равен 0,0625 сут.

Для того, чтобы подготовить файлы входных данных, была использована процедура отсева случайных реализаций по критерию  $3\sigma$  [8], а в соответствии с методикой [9] проведена оценка внутригодовой динамики концентраций растворенных и взвешенных органических соединений в исследуемом объекте.

Начальные значения переменных блоков водной толщи и ДО имитационной модели находили из условия замыкания годовой изменчивости переменных модели при расчете нескольких лет с одним и тем же сценарием входных данных. При этом стартовый набор и диапазоны изменения переменных задавали путем экспертных оценок, а для поиска их уточненных значений, как и для других эмпирических параметров модели, использовали процедуру ее калибровки по имеющимся данным мониторинговых и экспедиционных наблюдений.

Адекватность модельного описания экологических процессов оценивалась с использованием статистического критерия Тейла  $Cr$  для компонентов водной экосистемы:

$$Cr = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2} / \left( \sqrt{\sum_{i=1}^n X_i^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^n Y_i^2} \right) \quad (3)$$

где  $n$  – число наблюдений;  $X_i$  и  $Y_i$  – соответственно расчетные и измеренные величины содержания веществ. При полном совпадении расчетных и наблюдаемых значений  $Cr$  равен нулю, при полном несовпадении – единице [10].

### **Результаты**

Основные результаты сопоставления выполненных модельных расчетов (кривая линия) и измеренных концентраций (пунктирная линия) форм N и P в воде ТО - следующие (рис. 2).

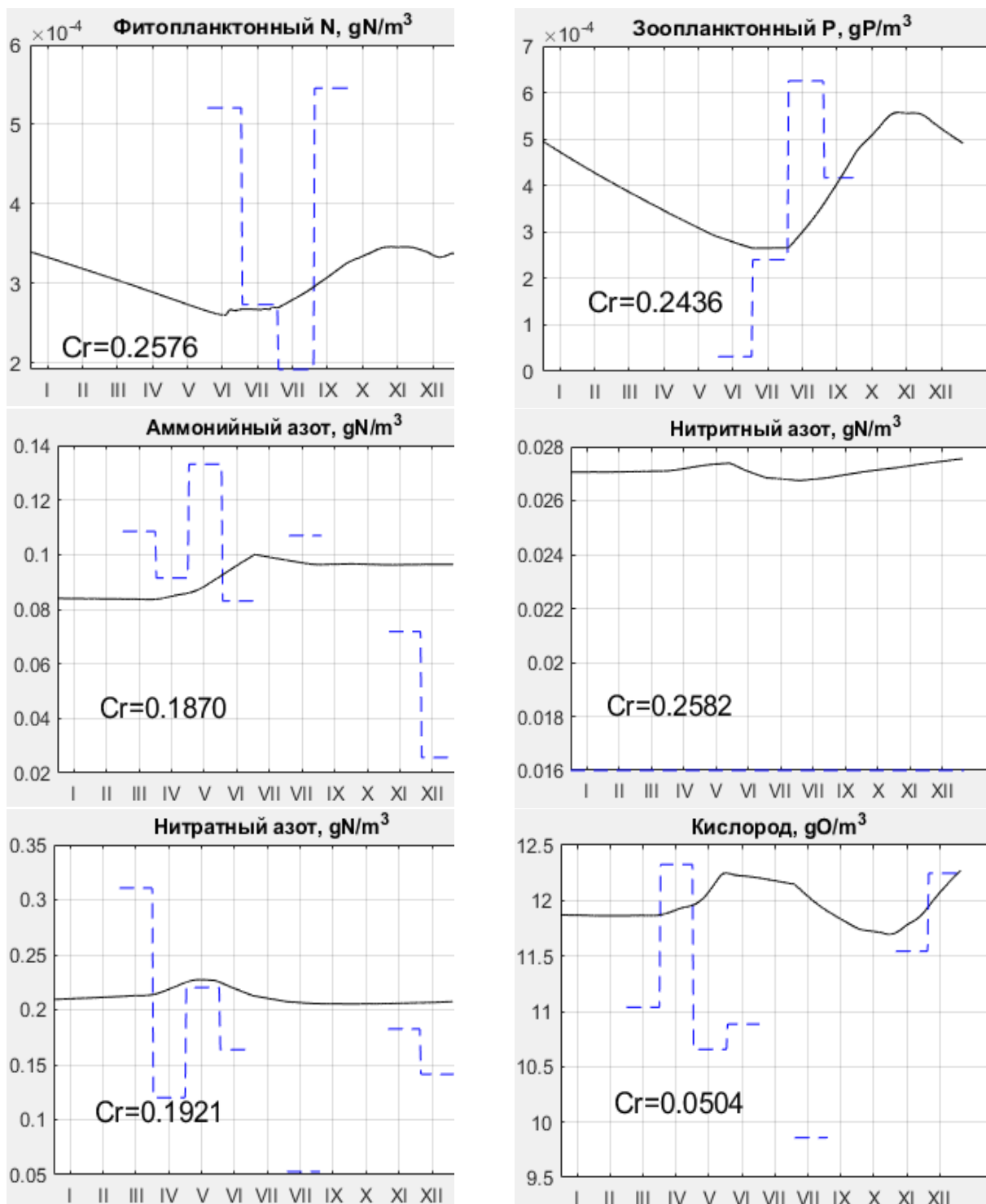


Рис. 2. Сравнение результатов предварительных модельных расчетов и данных наблюдений за изменчивостью содержания форм N и P,  $O_2$  в воде ТО

### Обсуждение

Модельные расчеты показали, что по шести выбранным для предварительной верификации имитационной модели ТО получено достаточно хорошее соответствие результатов моделирования данным наблюдений. Значения критерия Тейла для модельных переменных - менее 0.3 (рис. 2). Это позволяет предпола-

гать, что основные процессы трансформации соединений азота, фосфора и динамики растворенного в воде кислорода воспроизводятся разработанной имитационной моделью вполне корректно.

Расчетная кривая (сплошная линия) агрегированных биомасс гидробионтов выходит на максимальные значения только в сентябре-октябре по мере прогревания воды и активизации жизнедеятельности видов планктона в летний период. Весенний пик содержания водорослей, как он воспроизводится в расчете, практически отсутствует в связи с низкой температурой воды в Телецком озере в течение года вообще.

Содержание растворенного кислорода – выше, а аммонийного, нитритного и нитратного азота в воде ТО - ниже соответствующих предельно-допустимых концентраций, и, в основном, соответствует наблюдаемым внутригодовым трендам изменчивости содержания биогенных соединений в пресноводных экосистемах, связанной с сезонностью природных условий и процессов жизнедеятельности гидробионтов [11].

### ***Заключение***

В проведенных исследованиях осуществлен начальный этап создания и калибровки модели биогеохимической трансформации азота и фосфора, а также кислородного режима в точечном приближении. Результаты сценарного расчета по сформулированной модели соответствуют данным натуральных наблюдений на ТО по выбранным компонентам и известным внутригодовым трендам их изменчивости в экосистемах пресноводных водоемов.

### ***Благодарности***

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (по проекту «Изучение механизмов природных и антропогенных изменений количества и качества водных ресурсов Сибири с использованием гидрологических моделей и информационных технологий»).

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Цхай А.А., Романов М.А. Об условиях протекания циклов биогенных элементов в Телецком озере: анализ данных для моделирования // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. – 2023. – 71(4). – С. 40-60. DOI:10.24412/2410-1192-2023-17104
2. Цхай А.А., Агейков В.Ю., Романов М.А. Модель циклов трансформации биогенных элементов и динамики растворенного кислорода в Телецком озере // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. – 2024. – 72(1). – С. 43-56. DOI: 10.24412/2410-1192-2023-17204
3. Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б., Дьяченко А.А. Анализ результатов моделирования и натуральных данных содержания растворенного кислорода в Телецком озере // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2023. – № 6. – С. 57–69. DOI: 10.35567/19994508\_2023\_6\_5
4. Селегей В.В., Селегей Т.С. Телецкое озеро. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1978. – 143 с.
5. Зуйкова Е.И. Современное состояние зоопланктонного сообщества Телецкого озера: дис. ... кандидата биол. наук. Красноярск, 1998. 124 с.
6. Митрофанова Е.Ю. Фитопланктон Телецкого озера: дис. ... кандидата биол. наук. Москва, 2000. – 200 с.

7. Шевченко Г.А. Геоэкологическое состояние акватории и прибрежной зоны Телецкого озера (Горный Алтай): дис. кандидата геолого-минерал. наук. Томск, 2010. – 149 с.
8. Брандт З. Анализ данных. Статистические и вычислительные методы для научных работников и инженеров. – М.: Мир, 2003. – 686 с.
9. Подгорный К.А. Математическая модель для изучения экосистемы Вислинского залива Балтийского моря. Часть 1. Теоретические основы и структура модели, методология подготовки исходных данных для выполнения расчетов. Калининград: Атлант НИРО, 2018. – 271 с.
10. Theil H. Applied Economic Forecasting. Amsterdam: North-Holland, 1971. – 474 p.
11. Леонов А.В., Пищальник В.М. Моделирование природных процессов в водной среде. Теоретические основы. – Южно-Сахалинск: СГУ, 2012. – 228 с.

© А. А. Цхай, В. Ю. Агейков, М. А. Романов, 2024