

УДК 502.7+577.4

МОДЕЛЬ ЦИКЛОВ ТРАНСФОРМАЦИИ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ДИНАМИКИ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА В ТЕЛЕЦКОМ ОЗЕРЕ

А.А. Цхай^{1,2}, В.Ю. Агейков¹, М.А. Романов³¹ Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, E-mail: tskhai@iwep.ru,² Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул,³ Алтайский государственный университет, г. Барнаул

Объектом исследования является Телецкое озеро. Цель работы – разработка математической модели биогеохимической трансформации соединений азота и фосфора, а также кислородного режима для объекта исследования. Сформулированная в этой работе модель прошла предварительную верификацию на наборе данных наблюдений за состоянием экосистемы Телецкого озера. В соответствующих модельных расчетах воспроизведены особенности внутригодовой изменчивости биомассы фитопланктона и известные тренды годовой динамики концентраций выбранных компонентов модели.

Ключевые слова: Телецкое озеро; математическая модель; лимнология; метеорология; гидрология; гидрохимия; гидробиология; трансформация; биогеохимический цикл.

DOI: 10.24412/2410-1192-2023-17204

Дата поступления: 17.01.2024. Принята к печати: 21.02.2024

Телецкое озеро (ТО) – уникальный водный объект для России и мира. Актуальность применения методов математического моделирования для оценки и прогнозирования состояния его экосистемы не нуждается в доказательствах. В статье прошлого выпуска [Цхай, Романов, 2023] выполнен анализ существующей исходной информации для моделирования круговорота биогенных веществ в экосистеме ТО. Из работ по изучению физико-химических процессов в данном природном объекте следует отметить недавнюю публикацию [Зиновьев и др., 2023], где в рамках одномерного вертикального приближения реализована модифицированная модель Стритера-Фелпса. К названному типу относят модели, в которых из химических веществ, взаимодействую-

щих с растворенным кислородом, учитывается только лабильное органическое вещество (к примеру, потери кислорода в связи с процессом нитрификации соединений азота во внимание не берутся).

Цель данной работы – создание математической модели биогеохимической трансформации соединений азота и фосфора, а также кислородного режима для вод ТО.

Далее формулируется математическая задача, полученная из законов сохранения массы для каждого компонента круговорота биогенных веществ и растворенного кислорода в рассматриваемых конкретных природных условиях. В ходе решения этой задачи авторами создан программный комплекс, реализующий сформулированную имитационную модель в точечном приближении.

Для проведения начального этапа верификации и модельных расчетов на основе мониторинговых данных Государственной системы наблюдений 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 [Селегей, Селегей, 1978; Зуйкова, 1998; Митрофанова, 2000; Шевченко, 2010].

Материалы и методы

ТО – имеет следующие морфометрические характеристики (табл. 1). Его ложе образовано относительно узкой расщелиной тектонического происхождения. Принято выделять два плеса ТО: меридиональный глубоководный (100–300 м) от устья р. Чулышман до мыса Караташ и широтный мелководный от этого мыса до истока р. Бия. Меридиональный отличается трапецевидная форма с относительно ровным дном и крутыми (60–70°) подъемами. Широтный сужается к р. Бия неширокой полосой с относительно волнообразным рельефом дна.

Для учета погодных и климатических особенностей ТО в работе использованы актинометрические и метеорологические данные специализированной

станции в пос. Яйлю.

Можно выделить основные гидрологические характеристики ТО: среднемноголетний уровень воды – 433.8 м со среднегодовой амплитудой колебаний около 3.5 м (максимально – 6.2 м). В течение года здесь проходят характерные периоды: относительно быстрое (40–50 дней) половодье; длительная (около 140 дней) летне-осенняя межень (июнь–октябрь), затем продолжительная (порядка 155 дней) зимняя межень (конец октября начало апреля). Среднемесячные температуры воды в ТО, усредненные за 23 года (1953–1976 гг.), приведены в монографии [Селегей, Селегей, 1978].

ТО – проточное, в него впадает порядка 70 средних и малых рек, а вытекает р. Бия. Самый крупный из притоков ТО – р. Чулышман, более мелкие – реки Кыга, Кокши, Колдор и др. Для оценки внутригодового водообмена использован водный баланс ТО за гидрологический год (с 1 сентября 2015 года по 31 августа 2016 года).

Гидробиологические и гидрохимические показатели – существенны для оценки экологического состояния вод. По упомянутым показателям воду ТО, в основном, относят к I–II классам качества по унифицированной шестибальной шкале (ГОСТ 17.3.1.07-82 [Охрана, 1982]) – «очень чистая – чистая».

Таблица 1

Основные морфометрические характеристики ТО [Селегей, Селегей, 1978]

Table 1

The main morphometric characteristics of Lake Teletskoye [Selegej, Selegej, 1978]

Площадь зеркала, км ²	Длина, км	Ширина, км		Глубина, м		Объем, км ³	Длина береговой линии, км	Развитие береговой линии, км
		mean	max	mean	max			
223	77.8	2.9	5.2	174	325	40	181	3.3

Примечание: mean – средняя; max – максимальная.

Применяемые методические подходы (см, например, [Леонов, 2012; Подгорный, 2018]) к разработке математических моделей циклов биогенных элементов имеют отличия в зависимости от набора показателей и полноты исходной информации, а также характеристик исследуемого природного водоема. В исследованиях такого рода окончательный вид имитационной модели и значения внутренних параметров всегда приходится уточнять, т.к. хорошо известно, что универсальных экологических моделей для природных водоемов не бывает [Йоргенсен, 1985]. В этом смысле полная запись работающей математической моде-

ли для каждого реального водоема будет отличаться от аналогов, созданных для других озер и водохранилищ.

В следующем разделе приведен вид разработанной модели для проведения предварительных расчетов процессов трансформации биогенных соединений и кислородного режима в воде Телецкого озера.

Результаты и их обсуждение

Для моделирования биогенных циклов в ТО была выбрана следующая схема биогеохимической трансформации биогенных веществ и кислородного режима (рис. 1):

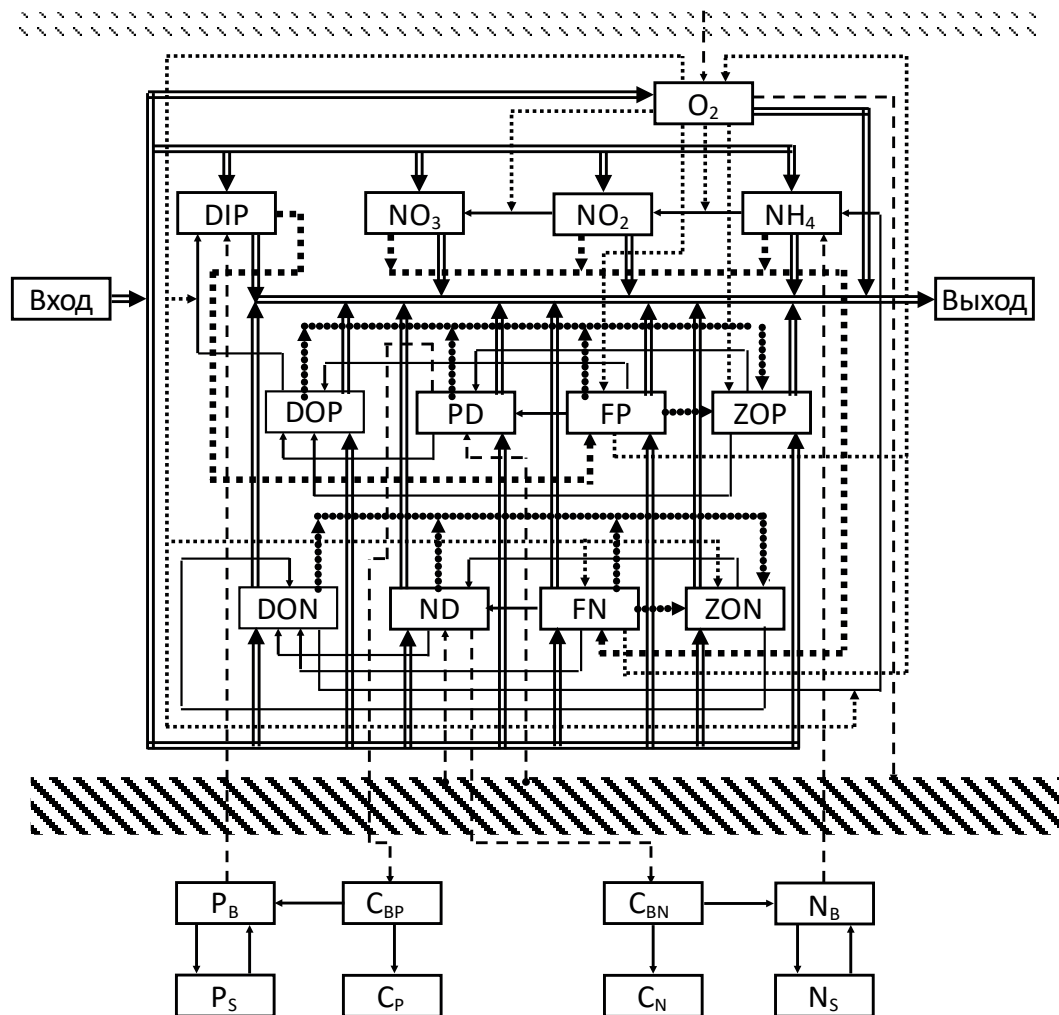


Рис. 1. Схема биогеохимической трансформации азота и фосфора в экосистеме Телецкого озера
Fig. 1. Scheme of biogeochemical transformation for nitrogen and phosphorus in the ecosystem of the Lake Teletskoye

Здесь использованы следующие обозначения: ZON – зоопланктонный азот, гN/м³; ZOP – зоопланктонный фосфор, гP/м³; FN – фитопланктонный азот, гN/м³; FP – фитопланктонный фосфор, гP/м³; NH₄ – аммонийный азот, гN/м³; NO₂ – нитритный азот, гN/м³; NO₃ – нитратный азот, гN/м³; ND – детритный азот, гN/м³; CBN – органический азот, участвующий в обменных процессах в донных отложениях (ДО), гN/м³; CBP – органический фосфор, участвующий в обменных процессах в ДО, гP/м³; PB – интерстициальный фосфор в поровом пространстве ДО, гP/м³; NB – интерстициальный азот в поровом пространстве ДО,

гN/м³; PD – детритный фосфор, гP/м³; DON – растворенный органический азот, гN/м³; DOP – растворенный органический фосфор, гP/м³; DIP – фосфаты, гP/м³; O₂ – растворенный кислород, гO/м³; PS – фосфор, сорбированный на твердой фазе ДО, гP/м³; NS – азот, сорбированный на твердой фазе ДО, гN/м³; CN – органический азот в пассивных формах в составе ДО, гN/м³; CP – органический фосфор в пассивных формах в составе ДО, гP/м³.

Для случая точечного (пространственно-однородного) приближения были использованы следующие математические уравнения.

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 $i = ZON, FN, NH_4, NO_2, NO_3, ND, DON, ZOP, FP, DIP, PD, DOP, O_2$ (названия переменных приведены под рис. 1).

Для процессов в деятельном слое донных отложений (ДО):

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

Расшифровка членов уравнений (1) R_i , ответственных за биогеохимическую трансформацию переменных модели в водной толще выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} R_{ZON} &= (U_{ZO} - E_{ZON} - S_{ZON}) \times C_{ZON}; & R_{FN} &= (U_F - E_{FN} - S_{FN}) \times C_{FN} - U_{ZON}^{FN} \times C_{ZON}; \\ R_{NH_4} &= k_m^{DON} \times C_{DON} - U_{FN}^{NH_4} \times C_{FN} - k_{NO_2}^{NH_4} \times C_{NH_4}; \\ R_{NO_2} &= k_{NO_2}^{NH_4} \times C_{NH_4} - U_{FN}^{NO_2} \times C_{FN} - k_{NO_3}^{NO_2} \times C_{NO_2}; \\ R_{NO_3} &= k_{NO_3}^{NO_2} \times C_{NO_2} - U_{FN}^{NO_3} \times C_{FN}; \\ R_{ND} &= S_{ZON} \times C_{ZON} + S_{FN} \times C_{FN} - k_{DON}^{ND} \times C_{ND} - U_{ZON}^{ND} \times C_{ZON}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{DON} &= k_{DON}^{ND} \times C_{ND} + E_{FN} \times C_{FN} + E_{ZON} \times C_{ZON} - U_{ZON}^{DON} \times C_{ZON} - k_m^{DON} \times C_{DON}; \\
 R_{ZOP} &= (U_{ZO} - E_{ZOP} - S_{ZOP}) \times C_{ZOP}; \quad R_{FP} = (U_F - E_{FP} - S_{FP}) \times C_{FP} - U_{ZOP}^{FP} \times C_{ZOP}; \\
 R_{DIP} &= k_m^{DOP} \times C_{DOP} - U_{FP}^{DIP} \times C_{FP}; \\
 R_{PD} &= S_{ZOP} \times C_{ZOP} + S_{FP} \times C_{FP} - k_{DOP}^{PD} \times C_{PD} - U_{ZOP}^{PD} \times C_{ZOP}; \\
 R_{DOP} &= k_{DOP}^{PD} \times C_{PD} + E_{FP} \times C_{FP} + E_{ZOP} \times C_{ZOP} - U_{ZOP}^{DOP} \times C_{ZOP} - k_m^{DOP} \times C_{DOP}; \\
 R_{O_2} &= H_1 \times U_{FN} \times C_{FN} / (1 + K_f \times U_{FN}) - H_2 \times k_{NO_2}^{NH_4} \times C_{NH_4} - H_3 \times k_{NO_3}^{NO_2} \times C_{NO_2} \\
 &\quad - H_4 \times E_{ZON} \times C_{ZON} - H_5 \times E_{FN} \times C_{FN} - H_6 \times k_m^{DON} \times C_{DON}.
 \end{aligned}$$

Здесь:

$$U_{ZON}^j = U_{ZO} \times \frac{D_{ZON}^j}{\sum_{ZON}} \times C_j, j = FN, ND, DON; \quad U_{ZOP}^j = U_{ZO} \times \frac{D_{ZOP}^j}{\sum_{ZOP}} \times C_j, j = FP, PD, DOP;$$

$$U_{ZO} = \frac{LT_{ZO}}{1 + \frac{C_{ZOP}}{\sum_{ZOP}} + \frac{C_{ZON}}{\sum_{ZON}}}; \quad \sum_{ZOP} = D_{ZOP}^{FP} \times C_{FP} + D_{ZOP}^{PD} \times C_{PD} + D_{ZOP}^{DOP} \times C_{DOP};$$

$$\sum_{ZON} = D_{ZON}^{FN} \times C_{FN} + D_{ZON}^{ND} \times C_{ND} + D_{ZON}^{DON} \times C_{DON};$$

$$U_{FN}^j = U_F \times \frac{D_{FN}^j}{\sum_{FN}} \times C_j, j = NH_4, NO_2, NO_3; \quad U_{FP}^{DIP} = U_F \times \frac{D_{FP}^{DIP}}{\sum_{FP}} \times C_{DIP};$$

$$U_F = \frac{LT_F}{1 + \frac{C_{FP}}{\sum_{FP}} + \frac{C_{FN}}{\sum_{FN}}}; \quad \sum_{FP} = C_{DIP}; \quad \sum_{FN} = D_{FN}^{NH_4} \times C_{NH_4} + D_{FN}^{NO_2} \times C_{NO_2} + D_{FN}^{NO_3} \times C_{NO_3};$$

$$E_j = U_{ZO} \times \exp \left(-e^2 \times \left(\frac{A_1^{ZO}}{A_2^{ZO} \times (1 + A_2^{ZO} \times U_{ZO})} \right) \right), j = ZON, ZOP;$$

$$E_j = U_F \times \exp \left(-e^2 \times \left(\frac{A_1^F}{A_2^F \times (1 + A_2^F \times U_F)} \right) \right), j = FN, FP;$$

$$S_j = V_1^{ZO} + V_2^{ZO} \times \left(\frac{C_j}{U_{zo}} \right), j = ZON, ZOP; \quad S_j = V_1^F + V_2^F \times \left(\frac{C_j}{U_F} \right), j = FN, FP;$$

$$LT_{ZO} = k_{0ZO} \times \left(T_1^{ZO} + T_2^{ZO} \times \frac{e^{T_3^{ZO} \times T} - 1}{1 + T_4^{ZO} \times e^{T_3^{ZO} \times T}} \right); \quad LT_F = k_{0F} \times R_{IF} \times \left(T_1^F + T_2^F \times \frac{e^{T_3^F \times T} - 1}{1 + T_4^F \times e^{T_3^F \times T}} \right);$$

$$R_{IF} = e \times (e^{-r_x} - e^{-r_e}) / (K_e \times h_0); \quad r_e = I / I_{opt}; \quad r_x = r_e \times e^{-K_e \times h_0}; \quad K_e = K_a + K_b \times C_{FP};$$

$$I = I_{av} \times (1 + \cos(2 \times \pi \times (t - t_{noon}) / f)) / f.$$

В табл. 2 сведены коэффициенты в при- держатся их численные значения или ссыл-
веденных уравнениях модели, а также со- ки на источник со способом вычисления.

Таблица 2

Коэффициенты (параметры) модели биогеохимической трансформации азота и
фосфора в экосистеме Телецкого озера

Table 2

Coefficients (parameters) of the model for biogeochemical transformation of nitrogen and
phosphorus in the Lake Teletskoye ecosystem

Параметр	Наименование	Значение или ссылка на источник со способом вычисления	Размерность
t	Время от начала года		сут
W	Объем водоема	[Цхай, Агейков, 1997]	m^3
R_i	Скорость биохимической трансформации соответствующего соединения C_i (здесь и далее учитывается, что $mg/l = g/m^3$)		$gN/m^3 \text{сут}$ или $gP/m^3 \text{сут}$ или $gO/m^3 \text{сут}$
Q^p	Расход реки – основного притока	[Цхай, Романов, 2023]	$m^3/\text{сут}$
C_i^p	Концентрации компонентов в реке – основном притоке	[Цхай, Романов, 2023]	gN/m^3 или gP/m^3 или gO/m^3
Q_-	Расход стока из водоема (р. Бия)	[Цхай, Романов, 2023]	$m^3/\text{сут}$
J_i	Массовые потоки на межфазных поверхностях: «воздух - вода», «вода – донные отложения»	[Цхай, Леонов, 1995], [Цхай, Агейков, 1997]	$gN/m^2 \text{сут}$ или $gP/m^2 \text{сут}$ или $gO/m^2 \text{сут}$
Ω	Площадь зеркала водоема	[Цхай, Агейков, 1997]	m^2
G_i	Боковая нагрузка, характеризующая поступления с берегов	[Цхай, Романов, 2023]	$gN/m \text{сут}$ или $gP/m \text{сут}$
L	Длина береговой линии водоема	[Цхай, Агейков, 1997]	m
T	Температура воды	[Селегей, Селегей, 1978]	$^{\circ}C$
$k_{NO_2}^{NH_4}$	Коэффициент трансформации аммонийного азота в нитритный азот	[Цхай, Леонов, 1995]	сут^{-1}
$k_{NO_3}^{NO_2}$	Коэффициент трансформации нитритного азота в нитратный азот	[Цхай, Леонов, 1995]	сут^{-1}
k_m^{DON}	Коэффициент минерализации растворенного органического азота	[Цхай, Леонов, 1995]	сут^{-1}
k_{DOP}^{PD}	Коэффициент трансформации детритного фосфора в растворенный органический фосфор	[Цхай, Леонов, 1995]	сут^{-1}
k_m^{DOP}	Коэффициент минерализации растворенного органического фосфора	[Цхай, Леонов, 1995]	сут^{-1}
k_{DON}^{ND}	Коэффициент трансформации детритного азота в растворенный органический азот	[Цхай, Леонов, 1995]	сут^{-1}
D_{ZON}^{FN}	Коэффициент предпочтительности фитопланктонного азота в рационе зоопланктона в азотных единицах	0.2	б/р
D_{ZOP}^{FP}	Коэффициент предпочтительности фитопланктонного фосфора в рационе зоопланктона в фосфорных единицах	0.2	б/р
D_{ZON}^{ND}	Коэффициент предпочтительности детритного азота в рационе зоопланктона в азотных единицах	0.6	б/р
D_{ZOP}^{PD}	Коэффициент предпочтительности детритного фосфора в рационе зоопланктона в фосфорных единицах	0.6	б/р
D_{ZON}^{DON}	Коэффициент предпочтительности растворенного органического азота в рационе зоопланктона в азотных единицах	0.2	б/р

Параметр	Наименование	Значение или ссылка на источник со способом вычисления	Размерность
D_{ZOP}^{DOP}	Коэффициент предпочтительности растворенного органического фосфора в рационе зоопланктона в фосфорных единицах	0.2	б/р
$D_{FN}^{NH_4}$	Коэффициент предпочтительности аммонийного азота в рационе фитопланктона в азотных единицах	0.5	б/р
$D_{FN}^{NO_2}$	Коэффициент предпочтительности нитритного азота в рационе фитопланктона в азотных единицах	0.3	б/р
$D_{FN}^{NO_3}$	Коэффициент предпочтительности нитратного азота в рационе зоопланктона в азотных единицах	0.2	б/р
D_{FN}^{DIP}	Коэффициент предпочтительности минерального фосфора в рационе зоопланктона в фосфорных единицах	1	б/р
H_1	Коэффициент перевода скорости фотосинтеза фитопланктона в кислородные единицы	4.2	гО/гN
K_f	Фотосинтетический коэффициент	0.25	сут
H_2	Первый коэффициент пересчета в кислородные единицы при нитрификации	2.1	гО/гN
H_3	Второй коэффициент пересчета в кислородные единицы при нитрификации	2.1	гО/гN
H_4	Коэффициент перевода скорости выделительной активности фитопланктона в кислородные единицы	2.1	гО/гN
H_5	Коэффициент перевода скорости выделительной активности фитопланктона в кислородные единицы	2.1	гО/гN
H_6	Коэффициент перевода скорости окисления органических веществ в кислородные единицы	0.25	гО/гN
A_1^{ZO}	Коэффициент 1 в выражении для скорости выделительной активности зоопланктона	0.003	сут
A_2^{ZO}	Коэффициент 2 в выражении для скорости выделительной активности зоопланктона	0.006	сут
A_1^F	Коэффициент 1 в выражении для скорости выделительной активности фитопланктона	0.0008	сут
A_2^F	Коэффициент 2 в выражении для скорости выделительной активности фитопланктона	0.0016	сут
V_1^{ZO}	Коэффициент 1 в выражении для смертности зоопланктона	0.006	сут ⁻¹
V_2^{ZO}	Коэффициент 2 в выражении для смертности зоопланктона	0.012	сут ⁻¹
V_1^F	Коэффициент 1 в выражении для смертности фитопланктона	0.0016	сут ⁻¹
V_2^F	Коэффициент 2 в выражении для смертности фитопланктона	0.0032	сут ⁻¹
k_{0ZO}	Коэффициент скорости роста зоопланктона	1	сут ⁻¹
T_1^{ZO}	Коэффициент 1 в выражении для температурной коррекции зоопланктона	0.00	б/р
T_2^{ZO}	Коэффициент 2 в выражении для температурной коррекции зоопланктона	0.22	б/р
T_3^{ZO}	Коэффициент 3 в выражении для температурной коррекции зоопланктона	0.02	б/р
T_4^{ZO}	Коэффициент 4 в выражении для температурной коррекции зоопланктона	0.02	б/р
k_{0F}	Коэффициент скорости роста фитопланктона	1	сут ⁻¹
T_1^F	Коэффициент 1 в выражении для температурной коррекции фитопланктона	0.00	б/р
T_2^F	Коэффициент 2 в выражении для температурной коррекции фитопланктона	0.0285	б/р

Параметр	Наименование	Значение или ссылка на источник со способом вычисления	Размерность
T_3^F	Коэффициент 3 в выражении для температурной коррекции фитопланктона	0.225	б/р
T_4^F	Коэффициент 4 в выражении для температурной коррекции фитопланктона	0.02	б/р
I_{av}	Среднесуточная освещенность ($I_{opt} = 350.0$)	[Страшкраба, Гнаука, 1989]	ккал/(м ² × сут)
h_0	Характерная глубина	[Цхай, Леонов, 1995]	м
f	Фотопериод	[Селегей, Селегей, 1978]	сут
K_a	Коэффициент экстинкции 1	1.7	б/р
K_b	Коэффициент экстинкции 2	18.723	б/р
α	Доля осаждающихся веществ, участвующих в обменных процессах	12/29	б/р
s	Удельная пористость ДО	0.85	б/р
k_m^N	Коэффициент минерализации органических вещества N в ДО	[Цхай, Агейков, 1997]	сут ⁻¹
k_m^P	Коэффициент минерализации органических вещества P в ДО	[Цхай, Агейков, 1997]	сут ⁻¹
K_N	Коэффициент диффузионного переноса N в ДО	[Цхай, Агейков, 1997]	м/сут
K_P	Коэффициент диффузионного переноса P в ДО	[Цхай, Агейков, 1997]	м/сут
V_f^N	Скорость фильтрации N	[Цхай, Агейков, 1997]	м/сут
V_f^P	Скорость фильтрации P	[Цхай, Агейков, 1997]	м/сут
γ_N	Коэффициент обратимой линейной сорбции N на скелете ДО	[Цхай, Агейков, 1997]	б/р
γ_P	Коэффициент обратимой линейной сорбции P на скелете ДО	[Цхай, Агейков, 1997]	б/р
L_1	Толщина деятельного слоя ДО	0.1	м

К особенностям сформулированной математической модели по сравнению, например, с работами [Леонов, 2012; Подгорный, 2018] можно отнести иной набор переменных состояния. Этот вариант более приближен к набору мониторинговых и экспедиционных данных, собранных для моделирования экосистемы ТО. Кроме того, использование для деятельного слоя ДО выбранной версии модельного блока, прошло апробацию при сравнении величин расчетных потоков на межфазных поверх-

ностях «вода – ДО» и натурных данных природных водоемов [Цхай, Агейков, 1997].

В ходе проведения этого исследования создан программный комплекс, реализующий сформулированную имитационную модель в точечном приближении. Модельные расчеты проводили для периода с 1 января по 31 декабря с шагом по времени равным 0.0625 сут. для сценарных условий гидрологического года (2015–2016 гг.) по среднегодовым данным, которые представлены в [Цхай, Романов, 2023].

Для подготовки файлов входных данных использована процедура отсева случайных реализаций по критерию 3σ [Брандт, 2003]. Оценка внутригодовой динамики концентраций растворенных и взвешенных органических соединений в притоках ТО проводилась в соответствии с методикой [Подгорный, 2018].

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.

Неизвестные параметры модели (1–2) определены минимизацией 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 [Theil, 1971].

Модельные расчеты показали, что по шести выбранным для первоначальной верификации переменным имитационной модели ТО получено достаточно хорошее соответствие результатов моделирования

данным наблюдений. Значения критерия Тейла для модельных переменных менее 0.24 (рис. 2). Это позволяет предполагать, что основные процессы трансформации соединений азота, фосфора и динамики растворенного в воде кислорода воспроизводятся разработанной в данном исследовании имитационной моделью вполне корректно.

Расчетная кривая (сплошная линия) агрегированной биомассы фитопланктона на графиках (а) и (б) в течение периода: с января по сентябрь включительно – ниже величин, наблюдаемых в теплый период: с июня по октябрь (штриховая линия). Весенний пик содержания водорослей, как он воспроизводится в расчете, практически отсутствует в связи с низкой температурой воды в Телецком озере в течение года вообще.

В летний период концентрации FN и FP продолжают снижаться в связи с уменьшением и без того скудного запаса питательных веществ ввиду их выедания фитопланктоном. Однако постепенное прогревание воды с минерализацией органического вещества и увеличением рациона водорослей, с августа и далее, приводит к росту концентраций FN и FP с пиком в октябре, что соответствует данным наблюдений и является распространенной ситуацией для условий ТО.

Расчетная динамика растворенных и взвешенных органических веществ в единицах N и P в воде ТО, в основном, соответствует наблюдаемым внутригодовым трендам изменчивости содержания этих соединений азота и фосфора в пресноводных экосистемах, связанных с сезонностью процессов жизнедеятельности гидробионтов [Леонов, 2012].

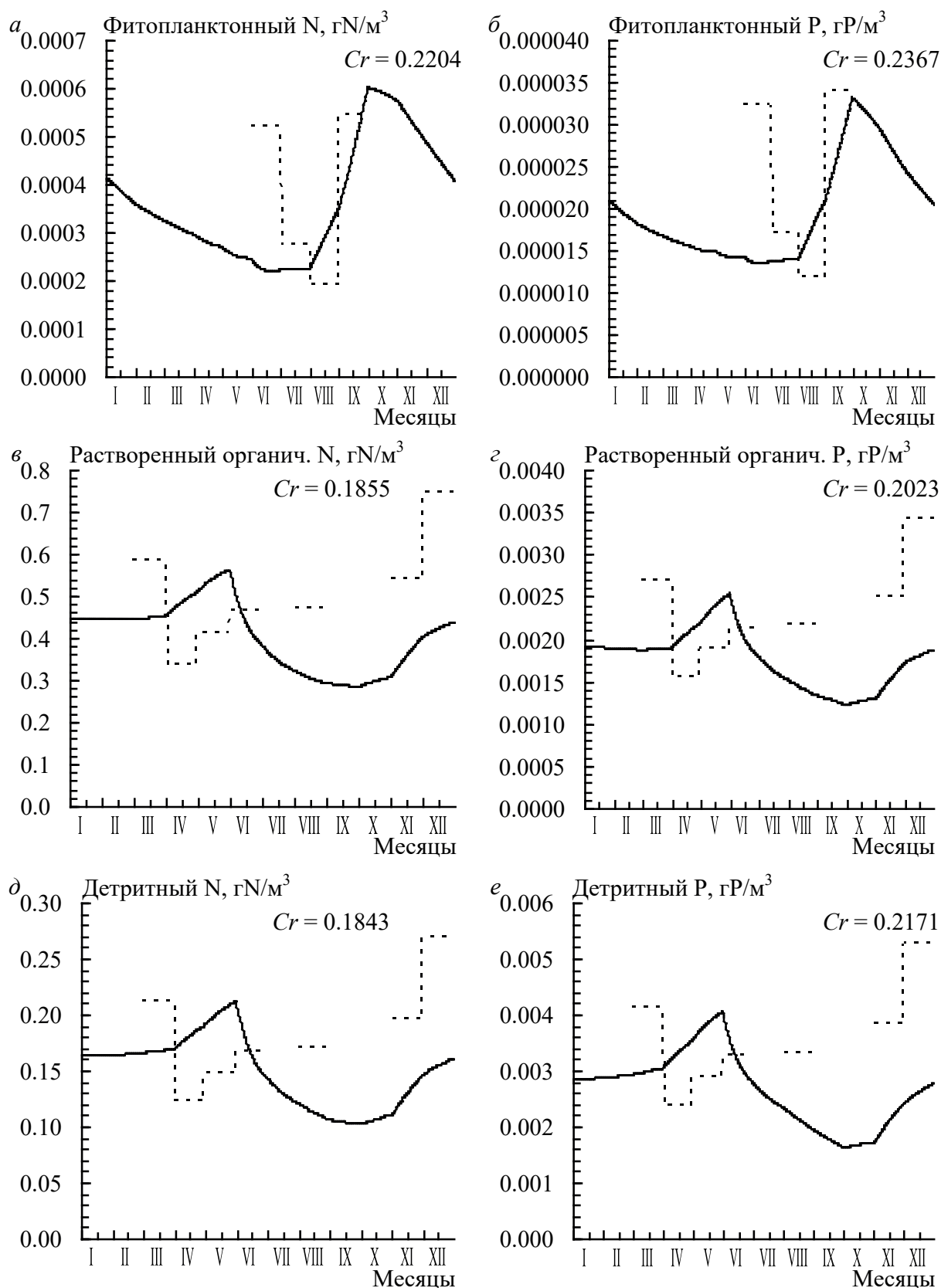


Рис. 2. Предварительная верификация модели годовой динамики трансформации соединений N и P (а–е) в воде ТО (пунктиром – наблюдения, кривая – расчет)

Fig. 2. Preliminary verification of the model of the annual dynamics for the transformation of N and P compounds (a–e) in water of the TL (dotted line – observations, curve – calculation)

Выводы

По выполненным предварительным модельным расчетам трансформации соединений азота и фосфора и кислородного режима в воде ТО можно сделать следующие выводы:

- осуществлен начальный этап создания и калибровки модели биогеохимиче-

ской трансформации азота и фосфора, а также кислородного режима в точечном приближении;

- результаты сценарного расчета по сформулированной модели соответствуют данным натурных наблюдений на ТО по выбранным компонентам и известным внутригодовым трендам их изменчивости в экосистемах пресноводных водоемов.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

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») и инициативных работ в АлтГТУ им. И. И. Ползунова и АлтГУ.

Список литературы

Брандт З. Анализ данных. Статистические и вычислительные методы для научных работников и инженеров. Москва: Мир, 2003. 686 с.

Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б., Дьяченко А.А. Анализ результатов моделирования и натурных 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

Зуйкова Е.И. Современное состояние зоопланктонного сообщества Телецкого озера: Дис. ... кандидата биол. наук. Красноярск, 1998. 124 с.

Йоргенсен С.Э. Управление озерными системами: [пер. с англ.]. Москва: Агропромиздат, 1985. 160 с.

Леонов А.В., Пищальник В.М. Моделирование природных процессов в водной среде. Теоретические основы. Южно-Сахалинск: СГУ, 2012. 228 с.

Митрофанова Е.Ю. Фитопланктон Телецкого озера: Дис. ... кандидата биол. наук. Москва, 2000. 200 с.

Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков. ГОСТ 17.1.3.07-82. Издание официальное. Государственный комитет СССР по стандартам от 19.03.1982. 1982. 10 с.

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: АтлантНИРО, 2018. 271 с.

Селегей В.В., Селегей Т.С. Телецкое озеро. Ленинград: Гидрометеиздат, 1978. 143 с.

Страшкраба М., Гнаук А. Пресноводные экосистемы. Математическое моделирование: [перевод с англ.]. М.: Мир, 1989. 376 с.

Цхай А.А., Леонов А.В. Прогнозирование качества воды в проектируемом водохранилище на основе модели трансформации азота и фосфора // Водные ресурсы. 1995. № 3. С. 261–272.

Цхай А.А., Агейков В.Ю. Математическое моделирование процессов трансформации соединений азота и фосфора и изменения кислородного режима в водохранилищах // Водные ресурсы. 1997. Т. 24, № 6. С. 718–728.

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

Шевченко Г.А. Геоэкологическое состояние акватории и прибрежной зоны Телецкого озера (Горный Алтай): Дис. ... кандидата геолого-минерал. наук. Томск, 2010. 149 с.

Theil H. Applied Economic Forecasting. Amsterdam: North-Holland, 1971. 474 p.

References

Brandt S. Data analysis: Statistical and computational methods for scientists and engineers. Moscow: Mir, 2003. 686 p.

Zinovyev A.T., Koshelev K.B., Dyachenko A.A. Analiz rezul'tatov modelirovaniya i naturnyh dannyh sodержaniya rastvorennogo kisloroda v Teleckom ozere [Modeling and observations of dissolved oxygen content in the Lake Teletskoye] // Vodnoe hozjajstvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie [Water sector of Russia: problems, technologies, management]. 2023. No. 6. P. 57–69. (in Russian). doi: 10.35567/19994508_2023_6_5

Zujkova E.I. Sovremennoe sostojanie zooplanktonnogo soobshhestva Teleckogo ozera [The current state of the zooplankton community of Lake Teletskoye]: DSc (PhD of Biology) thesis. Krasnojarsk, 1998. 124 p. (in Russian).

Jorgensen S.E. Lake management: water development, supply and management. Moscow: Agropromizdat. 1985. 160 p.

Leonov A.V., Pischalnik V.M. Modelirovanie prirodnyh processov v vodnoj srede. Teoreticheskie osnovy [Modeling of natural processes in the aquatic environment. Theoretical foundations]. Yuzhno-Sakhalinsk: SSU, 2012. 228 p. (in Russian).

Mitrofanova E.Ju. Fitoplankton Teleckogo ozera [Phytoplankton of Lake Teletskoye]: DSc (PhD of Biology) thesis. Moskva, 2000. 200 p. (in Russian).

Ohrana prirody. Gidrosfera. Pravila kontrolja kachestva vody vodoemov i vodotokov [Nature protection. Hydrosphere. Procedures for quality control of water in reservoirs and stream flows]. GOST 17.1.3.07-82. Izdanie oficial'noe. Gosudarstvennyj komitet SSSR po standartam ot 19.03.1982. 1982. 10 p. (in Russian).

Podgorny K.A. Matematicheskaja model' dlja izuchenija jekosistemy Vislinskogo zaliva Baltijskogo morja. Chast' 1. Teoreticheskie osnovy i struktura modeli, metodologija podgotovki ishodnyh dannyh dlja vypolnenija raschetov [A mathematical model for studying the ecosystem of the Vislinsky Bay of the Baltic Sea. Part 1. Theoretical foundations and structure of the model, methodology of preparation of initial data for calculations]. Kaliningrad: AtlantNIRO, 2018. 271 p. (in Russian).

Selegej V.V., Selegej T.S. Teleckoe ozero [Teletskoye Lake]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978. 143 p. (in Russian).

Straskraba M., Gnauck A.H. Freshwater ecosystems. Modelling and simulation. Moscow: Mir, 1989. 376 c. p.

Tskhai A.A., Leonov A.V. Water quality forecast for designing reservoir based on the model for nitrogen and phosphorus compounds transformation // Water Resources. 1995. Vol. 22, no. 3. P. 261–272. (in Russian).

Tskhai A.A., Ageikov V.Yu. Mathematical modeling of the processes of transformation of nitrogen and phosphorus compounds and variations in oxygen regime in reservoirs // Water Resources. 1997. Vol. 24, no. 6. P. 664–674. (in Russian).

Tskhai A.A., Romanov M.A. Ob uslovijah protekanija ciklov biogennyh jelementov v Teleckom ozere: analiz dannyh dlja modelirovanija [On the conditions of the cycles of biogenic elements in Lake Teletskoye: data analysis for modeling] // Izvestija Altajskogo otdelenija Russkogo geograficheskogo obshhestva. 2023. 71(4). P. 40–60. (in Russian). doi: 10.24412/2410-1192-2023-17104

Shevchenko G.A. Geojekologicheskoe sostojanie akvatorii i pribrezhnoj zony Teleckogo ozera (Gornyj Altaj): [Geoecological condition of the water area and coastal zone of Lake Teletskoye (Gorny Altai)]. DSc (PhD of Geol.-mineral.) thesis. Tomsk, 2010. 149 p. (in Russian).

Theil H. Applied Economic Forecasting. Amsterdam: North-Holland, 1971. 474 p.

MODEL OF CYCLES FOR TRANSFORMATION OF BIOGENIC ELEMENTS AND DYNAMICS OF DISSOLVED OXYGEN IN THE LAKE TELETSKOYE

A.A. Tskhai^{1,2}, V.Y. Ageikov¹, M.A. Romanov³

¹ Institute for Water and Environmental Problems, SB RAS, Barnaul, E-mail: tskhai@iwep.ru,

² Polzunov Altai State Technical University, Barnaul,

³ Altai State University, Barnaul

The object of the study is the Lake Teletskoye. The aim of the work is to develop a mathematical model of the biogeochemical transformation for nitrogen and phosphorus compounds, as well as the oxygen regime for the object of study. The model formulated in this work has been pre-verified on a set of observational data on the state of the ecosystem for the Lake Teletskoye. The corresponding model calculations reproduce the features of the intra-annual variability

for phytoplankton biomass and the known trends in the annual dynamics of concentrations for selected components of the model.

Keywords: Teletskoye Lake; mathematical model; limnology; meteorology; hydrology; hydrochemistry; hydrobiology; transformation; biogeochemical cycle.

Received January 17, 2024. Accepted: February 21, 2024

Сведения об авторах

Цхай Александр Андреевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ИВЭП СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0003-3892-1502. E-mail: tskhai@iwep.ru.

Агейков Владислав Юрьевич – кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник ИВЭП СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0001-9762-1492. E-mail: ageikov@mail.ru.

Романов Максим Анатольевич – преподаватель колледжа Алтайского государственного университета. Россия, 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61. ORCID: 0000-0001-5010-6469. E-mail: max.rom1@mail.ru.

Information about the authors

Tskhai Aleksandr Andreevich – Dr Sc in Technics, Professor, Chief Researcher of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (IWEP SB RAS). 1, Molodezhnaya Str., 656038 Barnaul, RF. ORCID: 0000-0003-3892-1502. E-mail: tskhai@iwep.ru.

Ageykov Vladislav Yurievich – PhD in Physics and Mathematics, Junior Researcher of the IWEP SB RAS. 1, Molodezhnaya Str., 656038 Barnaul, RF. ORCID: 0000-0001-9762-1492. E-mail: ageikov@mail.ru.

Romanov Maxim Anatol'evich – Lecturer of the College of the Altai State University. 61, Lenin Av., 656049 Barnaul, RF. ORCID: 0000-0001-5010-6469. E-mail: max.rom1@mail.ru.