

УДК: 556.551

Модель ассимиляционного потенциала озерной экосистемы на примере биогенных загрязнений

А. А. Цхай^{1,2,a}, М. А. Романов², В. А. Куприянов²

¹Институт водных и экологических проблем СО РАН,
Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1

²Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,
Россия, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 46

E-mail: ^a tskhai@iwep.ru

Получено 20.08.2024, после доработки — 16.10.2024.

Принято к публикации 28.10.2024.

Разработана модель биогеохимических циклов трансформации питательных веществ в экосистеме водоема на примере Телецкого озера (ТО) для оценки его ассимиляционного потенциала в условиях отсутствия прямых измерений концентраций общего азота и фосфора, вместо чего для предварительных выводов используются соответствующие расчетные данные, полученные при моделировании. Правомерность такого способа обосновывается проверкой адекватности результатов моделирования данным среднемесячных многолетних наблюдений для всех переменных состояния модели в воде изучаемого объекта. Рассмотрены наиболее существенные особенности моделирования круговорота соединений биогенных элементов (N и P) и динамики растворенного кислорода в экосистеме ТО. Выполнена калибровка модели с учетом данных многолетних наблюдений за качеством воды 1985–2003 гг., а также сценарного варианта гидрологического режима 2016 г. Приводится анализ внутригодовой изменчивости переменных состояния, азотных и фосфорных поступлений и потерь в воде ТО. Рассчитана предварительная величина допустимой нагрузки N и P на озеро. Модельный анализ показал, что у озера практически отсутствует ассимиляционный потенциал по отношению к соединениям фосфора. Значения среднегодовых концентраций, соответствующие случаю допустимой биогенной нагрузки, равны $P_{\text{общ.}} = 0,013 \text{ гP/м}^3$, что равно среднегодовой концентрации за 18-летний период наблюдений, пороговое содержание $N_{\text{общ.}} = 0,895 \text{ гN/м}^3$. Ассимиляционный потенциал по азоту небольшой, в пределах второй значащей цифры после запятой, имеется в виду, что его расчетная среднегодовая величина составляет $0,836 \text{ гN/м}^3$. Результаты модельных расчетов свидетельствуют о том, что воды ТО из-за низкой температуры воды в течение всего года наряду с уникальной чистотой отличаются крайне слабо развитым сообществом гидробионтов. В случае других озер повышение антропогенного пресса могло бы сглаживаться за счет утилизации вследствие жизнедеятельности достаточно развитых сообществ гидробионтов. Здесь же достаточного ресурса самоочищения нет, и сравнительно небольшое повышение антропогенного загрязнения может привести к нарушению устойчивости в экосистеме ТО.

Ключевые слова: Телецкое озеро, математическая модель, лимнология, трансформация, биогеохимический цикл, азот, фосфор, загрязнение, ассимиляция

Исследование проводилось в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН и плана инициативных работ Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова.

UDC: 556.551

Model of assimilation potential in lake ecosystem on the example of biogenic pollutants

A. A. Tskhai^{1,2,a}, M. A. Romanov², V. A. Kupriianov²

¹Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
1 Molodezhnaya st., Barnaul, 656038, Russia

²Polzunov Altai State Technical University,
46 Lenin av., Barnaul, 656038, Russia

E-mail: ^a tskhai@iwep.ru

Received 20.08.2024, after completion — 16.10.2024.

Accepted for publication 28.10.2024.

A model of biogeochemical cycles for nutrient transformation in the ecosystem of a water body has been developed using the example of the Lake Teletskoye (TL) to assess its assimilation potential in the absence of direct measurements for total nitrogen and phosphorus concentrations, instead of which the corresponding simulated data. The validity is justified by checking the adequacy of the simulation results to the data of average monthly long-term observations for all variables of the state for model. The model was calibrated with taking into account data from observations of water quality in 1985–2003, as well as a scenario version of the hydrological regime in 2016. The analysis of the intra-annual changeability of state variables, nitrogen and phosphorus inputs and outputs in TL water is given. The preliminary values of the permissible load N and P on the lake is accessed. The model analysis showed that the lake has practically no assimilation potential with respect to phosphorus compounds. The corresponding values of concentrations are equal to: $P_{\text{tot.}} = 0.013 \text{ gP/m}^3$, which is equal to the average annual content over the period of 18-year observations. The threshold content of $N_{\text{tot.}} = 0.895 \text{ gN/m}^3$. The assimilation potential for nitrogen is small, within the second significant digit after the decimal point, bearing in mind that its simulated average annual value is 0.836 gN/m^3 . The results of simulation indicate that the TL waters, due to the low water temperatures, along with their unique purity, differ in an extremely poorly developed community of hydrobionts. In the case of other lakes, the increase of anthropogenic pressure could be mitigated by utilization due to the vital activity of sufficiently developed hydrobionts communities. Here, there is no sufficient self-purification resource, and a relatively small increase in anthropogenic load can lead to a violation of the sustainability.

Keywords: Lake Teletskoye, mathematical model, limnology, transformation, biogeochemical cycle, nitrogen, phosphorus, pollution, assimilation

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2025, vol. 16, no. 6, pp. 1447–1465 (Russian).

The research was carried out within the framework of the state assignment of the IWEP SB RAS and the plan of initiative work of the Polzunov Altai State Technical University.

1. Введение

Актуальной проблемой лимнологии является оценка ассимиляционного потенциала (АП) природных водных объектов — как объема загрязнений, причиняющего минимальный ущерб и не нарушающего устойчивости экосистемы. Как только речь заходит о количественной стороне вопроса, невозможно обойтись без использования кинетических характеристик основных составляющих баланса химических элементов (в контексте данного исследования: азота и фосфора) в изучаемом гидробиоценозе.

Начало подобных исследований следует, по-видимому, относить к 70-м годам прошлого века, когда формировались базовые представления о проблематике экологии и рационального природопользования, а для решения соответствующих научно-практических задач стали применять математические методы и модели, например, [Рубин, Пытьева, Ризниченко, 1977].

В эти годы, в связи с проблемой эвтрофирования, активно шли исследования Великих озер (информация о ретроспективе этих работ содержится в обзоре [Chapra, Dolan, 2012]). Была разработана модель баланса общего фосфора для оценки влияния изменения поступлений фосфора в сточных водах на эвтрофирование Великих озер. Навысшую прогностическую способность модель продемонстрировала для озера Верхнее, хотя в целом удовлетворительные результаты были получены и для озер Мичиган, Гурон и Эри. Экономичная модель баланса массы оказалась эффективным инструментом для моделирования и анализа долгосрочных тенденций ассимиляции консервативных загрязнений и общего фосфора. Вместе с тем оказалось, что на меньших масштабах времени (например, при суточном расчетном шаге), при рассмотрении отдельных зон озера (в частности, для прибрежной акватории), в случае более сложного набора биогенных соединений и структуры пищевой цепи и т. п., для адекватного воспроизведения требуются более совершенные и сложные модели. Простая модель, упомянутая выше, привлекательна тем, что охватывает всю экосистему водоема и позволяет получить усредненную оценку для озера в целом.

Аналогичные подходы широко используются в мире и по сей день [Land et al., 2016; Tong et al., 2019; Skinner, 2022; Neumann et al., 2024]. Это объясняется возможностью в требуемом объеме обеспечить проекты исходной информацией и получить релевантные ответы на вопросы, которые обычно возникают о водоеме в целом.

В этой работе использованы данные Государственной системы наблюдений Росгидромета за загрязнением Телецкого озера (ТО) и его основных притоков в период с 1985 по 2003 г. Этот период, как известно из новейшей истории, стал временем, когда антропогенное воздействие на экологическое состояние природных вод было ограниченным. Поэтому, по мнению авторов, состояние экосистемы ТО было сравнительно стабильным, а биогенная нагрузка на озеро была близка к природной, фоновой. В этом случае АП ТО считался равным объему поступлений азота (фосфора), не меняющему степень загрязнения вод рассматриваемого озера. А это приводит к рассмотрению случая, когда в экосистеме ТО в течение года утилизируется объем биогенных загрязнений, равный поступающему их массовому потоку за тот же период.

Такие предположения позволили в свое время оценить допустимую биогенную нагрузку на достаточно изученные, по сравнению с ТО, озера северо-запада РФ [Лозовик, Рыжаков, Сабылина, 2011; Лозовик и др., 2016; Лозовик, 2015; Лозовик, Фруммин, 2018]. Но в этих работах специалисты пользовались данными прямых измерений интересующих их характеристик питательных веществ в озерных экосистемах.

На сегодня, по мнению авторов, при оценке числа наших внутренних водоемов, в которых когда-либо измеряли концентрации общего фосфора и общего азота, счет может идти лишь на десятки. В то же время, как известно, на территории России находится свыше двух миллионов озер. Поэтому представляется актуальной разработка модели для предварительной

оценки ассимиляционного потенциала, хотя бы для водоемов, на которых действуют пункты наблюдений Росгидромета за качеством вод. В этом случае может возникнуть принципиальная возможность увеличить число характеризуемых водоемов, где предварительно, на основе применения математического моделирования, будет оценена допустимая биогенная нагрузка, — хотя бы в сторону ста.

Вместе с тем моделирование состояния экосистемы ТО до сих пор не выполнялось. Поэтому для предварительной оценки допустимой биогенной нагрузки на экосистему ТО в этом исследовании была разработана математическая модель АП путем воспроизведения круговорота питательных веществ в воде изучаемого объекта. При этом косвенным аргументом в пользу полученных оценок служили величины статистически подтвержденной адекватности модельных результатов реально наблюдаемым значениям переменных состояния модели в воде ТО с использованием коэффициентов пересчета [Wetzel, 2001], проверенных на множестве водоемов, что считалось репрезентативным и в случае этого исследования тоже. В этой связи представляется правильным считать полученные результаты в данной работе предварительными и требующими окончательной проверки путем организации специальных мониторинговых наблюдений на объекте исследований.

2. Особенности объекта исследований на примере Телецкого озера

Моделирование проводилось на данных ТО (рис. 1), которое находится на юге Западной Сибири ($51^{\circ}31'45''$ с. ш., $87^{\circ}42'53''$ в. д.) и входит в пятерку самых глубоких водоемов России. ТО имеет площадь поверхности 223 км^2 и максимальную глубину 325 м (при средней глубине 174 м). Около 70 средних и малых рек впадают в ТО, а площадь его водосбора составляет приблизительно 20 тыс. км^2 . Самый крупный (порядка 70% общего поверхностного притока) из притоков ТО — р. Чулышман, более мелкие (реки Кыга, Кокши и т. д.) учитываются при оценке боковой приточности. Из озера вытекает р. Бия, которая впадает в р. Обь.

Местоположение ТО отличает своеобразный лимноклимат, определяемый особыми, горными, физико-географическими условиями. Данные о температуре и осадках, как и о скорости ветра, облачности, солнечной радиации, актинометрических и метеорологических характеристиках, были получены со специализированной станции в пос. Яйлю и использовались для работ по моделированию.

Так, например, в модельном описании скорости потребления для фитопланктона поправка на изменчивость освещенности имеет вид, использованный ранее в [Цхай, Леонов, 1995] для случая двух сибирских водохранилищ. Доказательная база его использования для ТО недавно пополнилась выполненными [Акулова, Букатый, 2019; Акулова и др., 2022] пока эпизодическими натурными гидрооптическими наблюдениями в двух точках ТО, которые тем не менее могут служить ориентиром для предварительной оценки относительной прозрачности по белому диску Секки и толщины фотического слоя. По мере накопления соответствующих натуральных данных предполагается дальнейшее уточнение фотосинтетического блока модели.

Среднегодовое количество воды в ТО — $433,8 \text{ м БС}$, со среднегодовой амплитудой колебаний приблизительно $3,5 \text{ м}$ (максимально — $6,2 \text{ м}$). Характерные периоды гидрологического года можно оценить как быстрое (менее 50 дней) половодье; продолжительная (около 140 дней) летне-осенняя межень (июнь-октябрь) с частыми дождями; затем долгая (приблизительно 155 дней) зимняя межень (с конца октября по начало апреля). По гидротермическим характеристикам ТО входит в число водных объектов умеренного типа. В этом исследовании в качестве сценария среднемесячных температур воды использовались ретроспективные данные ТО, усредненные за более чем 20 -летний период [Селегей, Селегей, 1978].

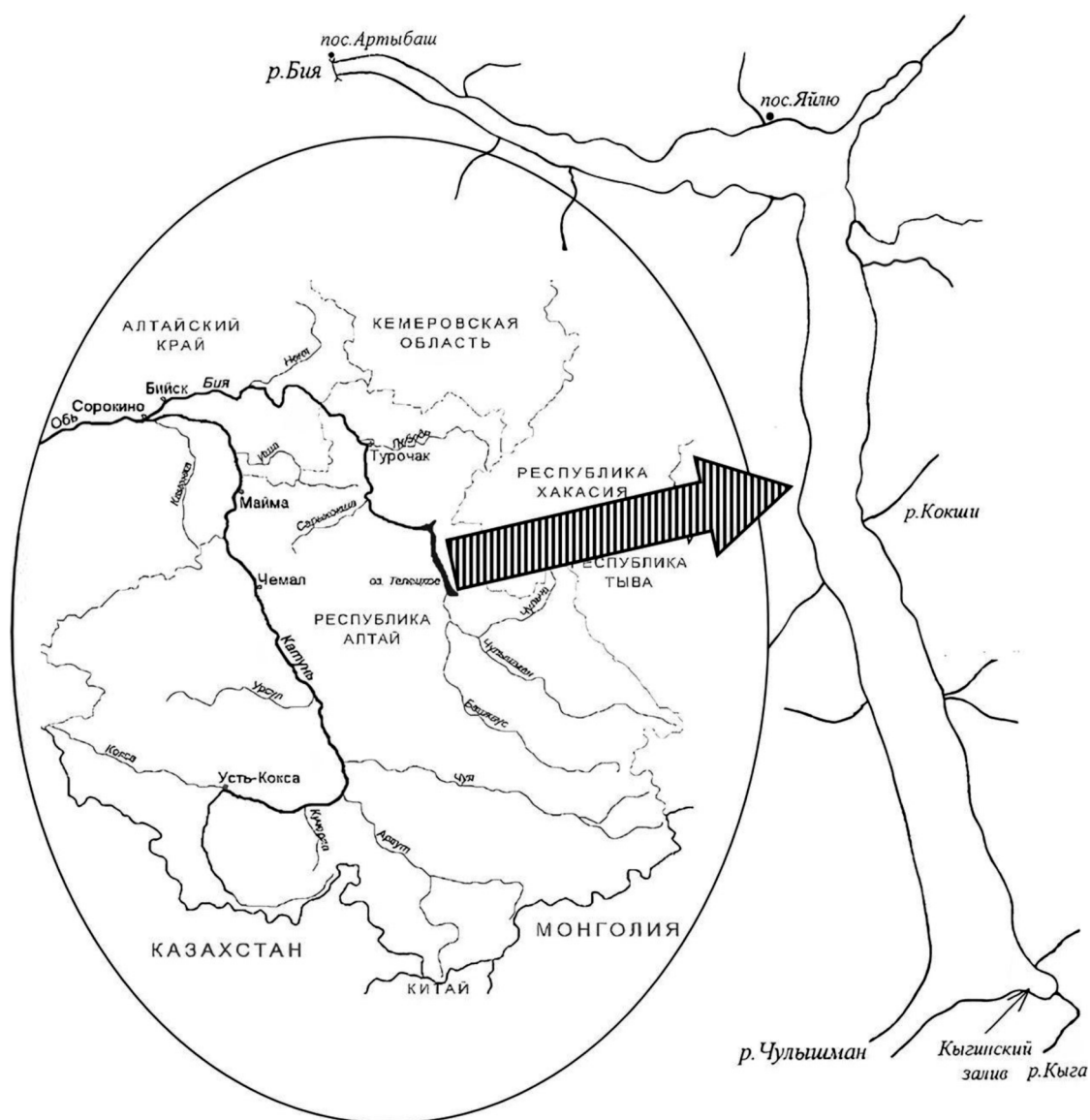


Рис. 1. Географическое положение Телецкого озера

Данные мониторинга качества воды, осуществляемого Государственной системой наблюдений Росгидромета, позволяют отнести воду ТО к классам качества I, II по унифицированной шестибальной шкале [Охрана. . . , 1982] — «очень чистая – чистая». При построении модели круговорота биогенных соединений авторами использованы данные физической лимнологии (например, температура воды, концентрация растворенного кислорода), химии воды (например, концентрации минеральных форм азота, фосфатов, традиционных показателей органического вещества). В работе также использовались характеристики фито- и зоопланктона, полученные в экспедиционных исследованиях Института водных и экологических проблем и Института систематики и экологии животных СО РАН [Зуйкова, 1998; Митрофанова, 2000].

Основную роль в механизме формирования качества воды в ТО играет смешение. Этому способствуют активный водообмен в озере, низкая температура воды, относительно невысокие концентрации минеральных и органических веществ и пр. Тем не менее процессы трансформации химического состава воды в ТО существенны и также являются значимым фактором,

меняющим годовой ход изменчивости содержания биогенных соединений. В работе [Цхай, Романов, 2023] представлен сценарный вариант динамики природных условий для моделирования состояния водной экосистемы ТО в условный период с 1 января по 31 декабря 2016 года.

3. Краткая характеристика модели биогенного круговорота

В данной работе моделируются процессы в воде ТО, а также в деятельном слое донных отложений (ДО). В целях упрощения в выполненном исследовании использовалось точечное (нульмерное) приближение. Это означает, что авторы изначально пренебрегают пространственной неоднородностью процессов, происходящих в воде ТО. Такое приближение заведомо «загрубляет» используемый подход, выводя из рассмотрения ряд важных особенностей исследуемого объекта. Тем не менее, несмотря на очевидный прогресс трехмерных и боксовых моделей, в том числе [Bai et al., 2022], точечное приближение по-прежнему используется при моделировании [Подгорный, 2018], чаще всего при получении оценок для водного объекта в целом в условиях ограниченности необходимой исходной информации, что бывает во многих случаях на практике. Область применимости полученных результатов при этом заведомо ограничивается предварительной оценкой неких средних значений, но иногда и это бывает полезным в случаях, когда, для начала, важно знать хотя бы порядок величины изучаемой характеристики. Расчеты по модели выполнялись для периода с 1 января по 31 декабря с шагом по времени, равным 0,1 сут.

Общий вид математической модели процессов в водной толще ТО выглядит как

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

где $i = ZON, FN, NH_4, NO_2, NO_3, ND, DON, ZOP, FP, DIP, PD, DOP, O_2$; W — объем ТО; t — время; R_i — скорость биогеохимической трансформации соответствующего соединения C_i ; Q^p и C^p — расход основного притока ТО (реки Чулышман) и концентрации компонентов в ней, Q^b и C^b — расход остальной учтенной боковой приточности ТО и концентрации компонентов в ней, Q_{out} — расход стока из ТО (р. Бия), J_i — массовый поток на межфазной поверхности, Ω — площадь зеркала ТО, G_i — диффузная нагрузка с берегов, L — длина ТО.

При этом использованы следующие обозначения: ZON — зоопланктонный азот, гН/м^3 ; ZOP — зоопланктонный фосфор, гР/м^3 ; FN — фитопланктонный азот, гН/м^3 ; FP — фитопланктонный фосфор, гР/м^3 ; NH_4 — аммонийный азот, гН/м^3 ; NO_2 — нитритный азот, гН/м^3 ; NO_3 — нитратный азот, гН/м^3 ; ND — детритный азот, гН/м^3 ; PD — детритный фосфор, гР/м^3 ; DON — растворенный органический азот, гН/м^3 ; DOP — растворенный органический фосфор, гР/м^3 ; DIP — фосфаты, гР/м^3 ; O_2 — растворенный кислород, $\text{гО}_2/\text{м}^3$.

Для воспроизведения процессов в деятельном слое донных отложений (ДО) используются следующие уравнения:

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

Здесь C_{BN} — органический азот, участвующий в обменных процессах в донных отложениях (ДО), гН/м^3 ; C_{BP} — органический фосфор, участвующий в обменных процессах в ДО, гР/м^3 ;

P_B — интерстициальный фосфор в поровом пространстве ДО, гР/м³; N_B — интерстициальный азот в поровом пространстве ДО, гN/м³; P_S — фосфор, сорбированный на твердой фазе ДО, гР/м³; N_S — азот, сорбированный на твердой фазе ДО, гN/м³; C_N — органический азот в пассивных формах в составе ДО, гN/м³; C_P — органический фосфор в пассивных формах в составе ДО, гР/м³.

Кроме того, α — доля осаждающихся веществ, участвующих в обменных процессах; s — удельная пористость ДО; L_1 — толщина деятельного слоя ДО; k_m^N — коэффициент минерализации органического N в ДО; k_m^P — коэффициент минерализации органического P в ДО; K_N — коэффициент диффузионного переноса N в ДО; K_P — коэффициент диффузионного переноса P в ДО; V_f^N — скорость фильтрации N; V_f^P — скорость фильтрации P; γ_N — коэффициент обратной линейной сорбции N на скелете ДО; γ_P — коэффициент обратной линейной сорбции P на скелете ДО.

Полная запись разработанной математической модели биогенного круговорота и значения ее параметров со способами их вычисления представлены в специальном файле «Tskhai et al 2024.pdf», доступном на сайте журнала в дополнительных материалах к статье. Настройка (уточнение значений внутренних параметров) модели и последующие модельные расчеты осуществлены для сценарных условий 2016 г. по среднемноголетним данным, которые представлены в [Цхай, Романов, 2023]. Для отсева грубых погрешностей при обработке исходной информации использовался статистический критерий трех сигм [Брандт, 2003].

Неизвестные параметры модели (1)–(2) определены минимизацией статистического критерия Тейла Cr для компонентов водной экосистемы:

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

где X_i и Y_i — соответственно расчетные и измеренные величины содержания веществ. Число наблюдений n в данной работе равно 8 для каждой из четырех модельных переменных ZON , ZOP , FN , FP и равно 14 для каждой из девяти оставшихся модельных переменных. При полном совпадении расчетных и наблюдаемых значений Cr равен нулю, при полном несовпадении — единице [Theil, 1971].

4. Входные данные для модельных расчетов

При разработке имитационной модели АП ТО, как открытой водной системы, реализовано положение о том, что необходимо совместное моделирование динамики компонентов биологической системы и среды ее функционирования [Леонов, 2012; Леонов, Пищальник, 2012]. Упомянутое положение реализуется на основе синтеза имеющихся гидробиологических, гидрохимических и гидрологических знаний о наиболее важных особенностях, которые происходят в экосистеме ТО. В работе [Цхай, Романов, 2023] проанализирована совокупность полученных предшественниками данных о природных условиях ТО, которая служит исходной информацией для моделирования, выполненного в данном исследовании.

Методические вопросы, которые касаются детализации модельных блоков, базы данных гидрохимических и гидробиологических наблюдений, подготовки входных данных по гидрологическому и гидрометеорологическому режимам, рассмотрены ранее [Цхай, Леонов, 1995; Леонов, 2012; Подгорный, 2018; Цхай, Агейков, 2020]. Оценка внутригодовой динамики концентраций растворенных и взвешенных органических соединений в притоках ТО проводилась в соответствии с методикой [Подгорный, 2018].

К особенностям сформулированной математической модели, по сравнению, например, с работами [Леонов, 2012; Подгорный, 2018], можно отнести несколько 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 поверхностях «вода – ДО» и натурных данных природных водоемов [Цхай, Агейков, 1997].

В данной работе в качестве стехиометрических соотношений использовалось классическое соотношение Редфилда: $C : N : P = 106 : 16 : 1$. Вопрос изменчивости стехиометрических соотношений в клетках организмов в данном исследовании не рассматривался.

При определении начальных данных использовалась процедура замыкания годовых циклов. Это означает, что экспертным путем выбирались правдоподобные значения, с которыми выполнялся первый расчет годового цикла, затем конечные значения первого года использовались как начальные значения следующего годового расчета с тем же сценарными условиями, как и в первом расчете и т. д., до момента замыкания начальных и конечных значений годового расчета.

Процедура подготовки данных наблюдений для учета поверхностной приточности и оценки адекватности результатам расчетов была следующая. Для каждого пункта наблюдений, по каждому показателю, все имеющиеся данные мониторинга Государственной службы наблюдений Росгидромета за 18 лет (с 1985 по 2003 г.) и вышеназванных экспедиций были разделены по месяцам (т. е. максимальное число выборок – 12). Затем по каждому месяцу выполнялась отбраковка грубых погрешностей следующим образом [Брандт, 2003]. Согласно критерию трех сигм вычислялись среднее по выборке значение C_i и еще два числа: $(C_i - 3\sigma)$ и $(C_i + 3\sigma)$. Затем из выборки отсеивались значения, которые не входили в интервал $(C_i - 3\sigma, C_i + 3\sigma)$. Процедура отбраковки повторялась до того момента, когда после очередного отсеивания в выборке оставались те же самые значения, которые являлись исходными при очередном определении $(C_i - 3\sigma, C_i + 3\sigma)$. С этого момента больше ни одно значение не отсеивалось. После этого итоговое среднее значение считалось среднемесячным значением переменной и использовалось при моделировании.

5. Анализ внутригодовой расчетной динамики модельных переменных

Изменчивость агрегированных биомасс фито- и зоопланктона на графиках рис. 2, *a–г* определяется в основном термическим режимом ТО. Относительный прогрев воды (повышение температуры с $4,8^\circ\text{C}$ до $5,3^\circ\text{C}$) происходит только в августе-октябре. Поэтому годовой максимум содержания фитопланктона приходится на октябрь, с небольшим запаздыванием за ним следует максимум биомассы зоопланктона.

Здесь стоит перечислить некоторые подтверждения расчетами ряда известных из наблюдений фактов, существенных для характеристики условий развития фитопланктона в ТО:

- судя по наблюдениям [Митрофанова, 2000, с. 157], в 1990–1997 гг. средняя многолетняя биомасса фитопланктона в ТО изменялась в пределах от $0,009$ до $0,044$ г/м³; сценарные модельные расчеты, выполненные в нашем исследовании, оценивают эту характеристику как $0,024$ г/м³, что свидетельствует об их достаточной близости натурным данным;
- статистические показатели биомассы фитопланктона по акватории ТО, оцененные по всем месяцам теплого периода в 1989 г. и 1997 г. [Митрофанова, 2000, с. 103], достигали своего внутригодового максимума в период с конца августа по октябрь, что согласуется с данными модельных расчетов, приведенных на рис. 2, *в, г* этой статьи.

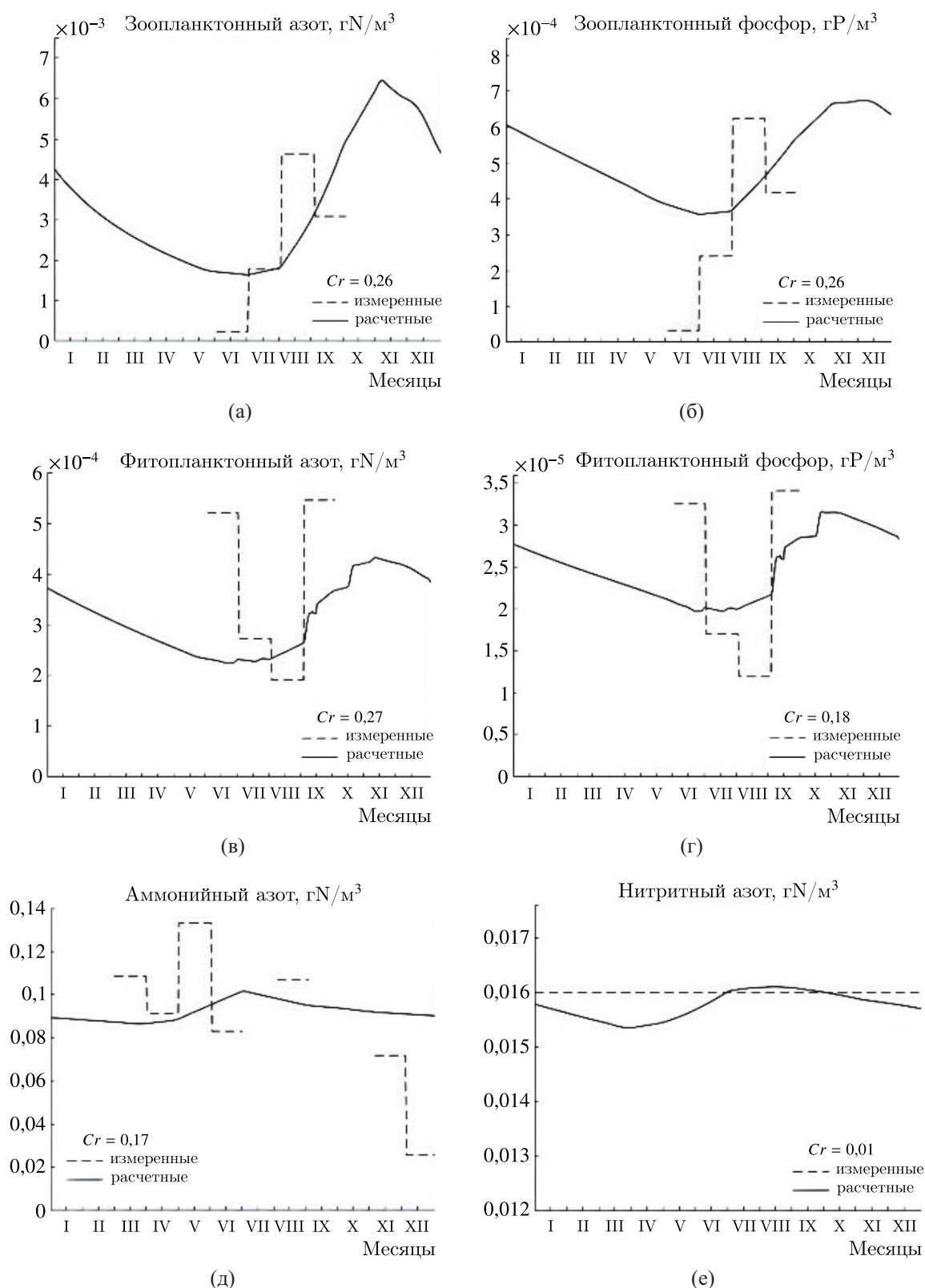


Рис. 2. Результаты верификации модели годовой динамики трансформации соединений азота и фосфора, а также кислородного режима в воде Телецкого озера (пунктир — наблюдения, кривая — расчет, обозначение Cr — значение статистического критерия Тейла). Исходные данные по биомассе фитопланктона взяты из [Митрофанова, 2000], зоопланктона — из [Зуйкова, 1998]. Гидрохимические данные взяты из [Государственный. . . , 1985–2003]

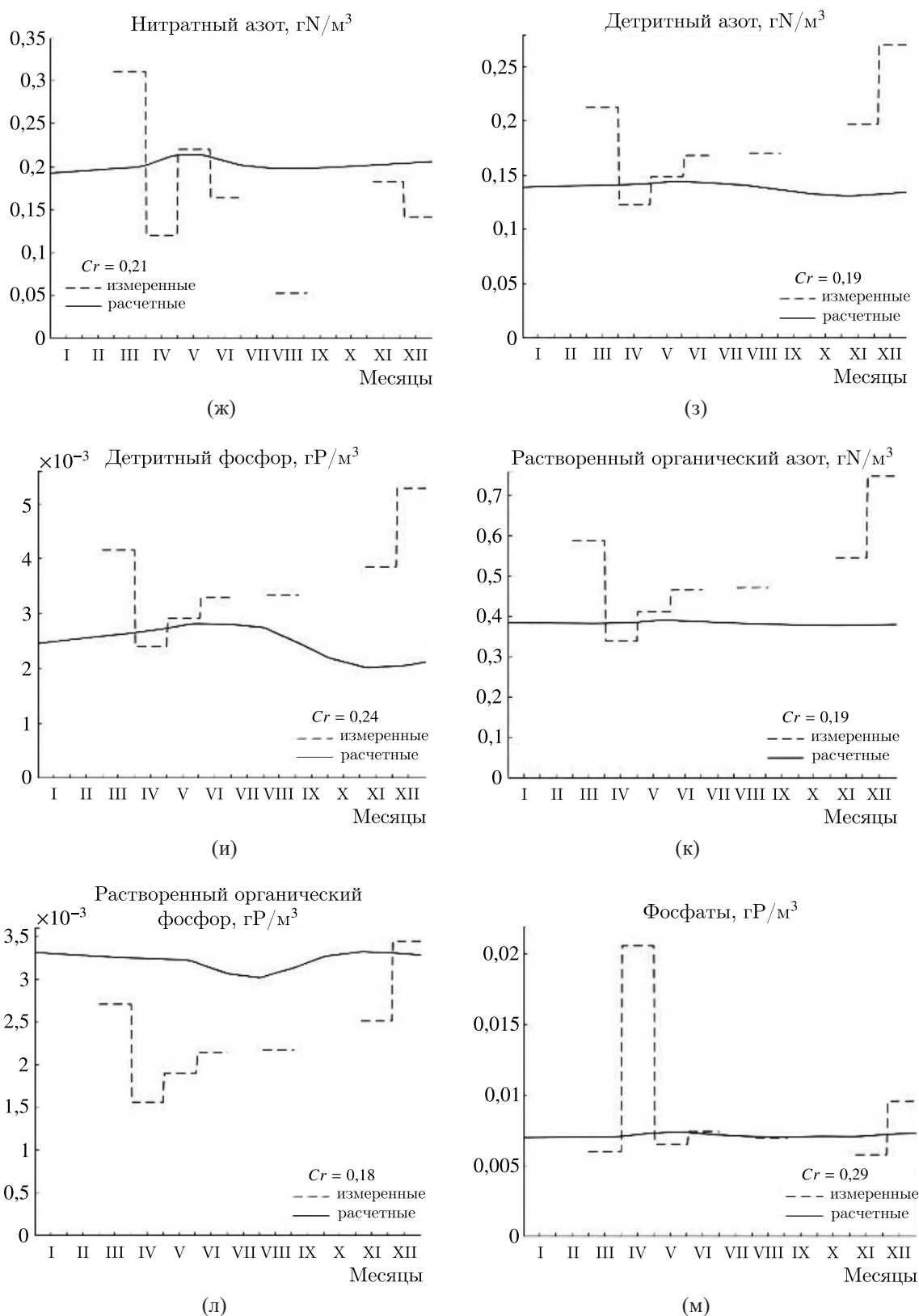


Рис. 2 (продолжение). Результаты верификации модели годовой динамики трансформации соединений азота и фосфора, а также кислородного режима в воде Телецкого озера (пунктир — наблюдения, кривая — расчет, обозначение Cr — значение статистического критерия Тейла). Гидрохимические данные взяты из [Государственный..., 1985–2003]

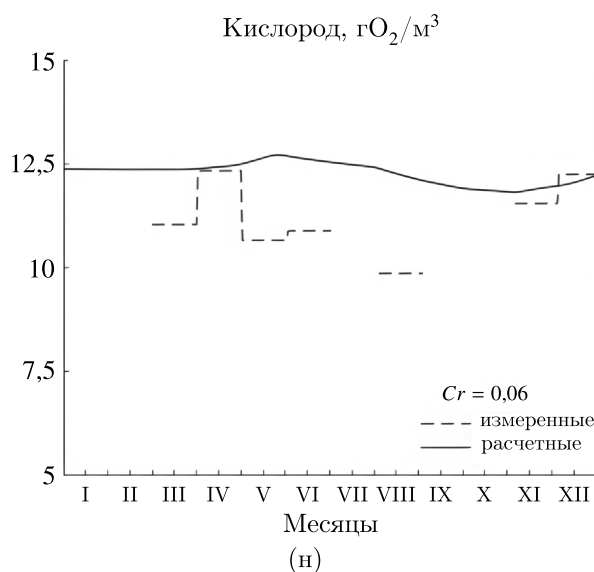


Рис. 2 (окончание). Результаты верификации модели годовой динамики трансформации соединений азота и фосфора, а также кислородного режима в воде Телецкого озера (пунктир — наблюдения, кривая — расчет, обозначение Cr — значение статистического критерия Тейла). Гидрохимические данные взяты из [Государственный... , 1985–2003]

Весенний пик содержания водорослей, судя по результатам расчета, практически отсутствует в связи с низкой температурой воды в ТО (с 1,8 °С в мае до 3,6 °С в июле). С ноября следует снижение средней температуры воды, что обуславливает дальнейшее уменьшение содержания фито- и зоопланктона.

Содержание и распределение азота и фосфора в воде ТО зависят от взаимодействия ряда факторов. Среднее содержание в воде ТО минеральных форм азота намного ниже уровня ПДК в течение всего года. Расчетная кривая рис. 2, *д* концентрации NH_4 достигает максимума чуть более 0,1 гN/м³ в среднем по озеру в конце июня, затем идет ее снижение в течение лета в связи с вегетацией водорослей. В остальные месяцы содержание NH_4 в среднем по ТО сохраняется на уровне 0,08–0,1 гN/м³.

Концентрации азота нитратов, основной формы минерального азота, сравнительно малы по величине (0,15–0,25 гN/м³ в течение года при ПДК 9,1 гN/м³). Результаты моделирования на рис. 2, *ж* показывают в течение года колебание содержания нитратов около 0,2 гN/м³, что согласуется с результатами наблюдений.

Содержание азота нитритов в воде ТО незначительно. Расчетные концентрации NO_2 рис. 2, *е* близки к 0,016 гN/м³ в течение всего года с относительным увеличением в конце июля, т. е. до начала отмечаемой вегетации фитопланктона в ТО в среднем по озеру.

Сезонный ход содержания фосфатов по многолетним данным наблюдений за период 1985–2003 гг. характеризуется особенностями, которые в основном достаточно адекватно воспроизводятся в модельных расчетах рис. 2, *м*.

Концентрация растворенного минерального фосфора (DIP) в воде ТО в течение года поддерживается в основном приблизительно 0,007 гP/м³ по озеру в условиях подпитки из притоков 0,01–0,02 гP/м³ за счет зимней аккумуляции, а затем поступления в водоем паводковых вод. В июне в притоке происходит снижение DIP до малых значений приблизительно около нуля гP/м³. Далее содержание DIP в притоках чуть возрастает до 0,008 гP/м³ в июле–августе и до 0,02 гP/м³ — с сентября до конца года, что вместе с вкладом других форм фосфора создает определенный запас питательных веществ для поздней вегетации фитопланктона.

Изменчивость концентраций растворенных и взвешенных форм N и P в воде ТО по данным моделирования и многолетних наблюдений приведена на рис. 2, *з-л*. Расчетные кривые содержания названных переменных мало меняются в течение года и находятся в пределах наблюдаемых концентраций.

Кислородный режим в воде ТО определяется интенсивностью биогеохимических процессов, глубоководностью, влиянием поверхностных притоков и процессов загрязнения. Водные массы ТО дважды в год полностью перемешиваются и даже в зимний период в достаточной степени аэрируются, чему способствует отсутствие сплошного ледового покрова на всей площади озера. На рис. 2, *н* показана внутригодовая динамика концентрации растворенного в водной среде кислорода. Наблюдаются сезонные изменения расчетных величин содержания растворенного кислорода: весенний максимум в период весенней гомотермии в конце мая (до $12,6 \text{ гO}_2/\text{м}^3$) и некоторое уменьшение — до $12 \text{ гO}_2/\text{м}^3$ — в октябре в конце межленной стратификации. К декабрю концентрация растворенного в воде кислорода вновь выше $12 \text{ гO}_2/\text{м}^3$.

Результаты калибровки показали приемлемое для экологического моделирования соответствие расчетных результатов — данным мониторинговых наблюдений: значения критерия Тейла для всех переменных состояния, указанных на графиках рис. 2, *а-н*, — меньше, чем 0,3. Отсюда следует, что основные процессы трансформации соединений азота, фосфора и динамика растворенного в воде кислорода воспроизводятся математической моделью достаточно корректно.

6. Балансовые оценки потоков биогенных веществ

Модельные расчеты потоков веществ приводят к предварительной оценке (табл. 1) основных составляющих прихода и потерь соединений азота и фосфора в ТО внутри моделируемого периода и суммарно за год. Определяющий вклад, как в водном, так и биогенном стоке, порядка 70 %, здесь вносит основной приток ТО р. Чулышман. Для учета роли боковых притоков озера использовался сценарный вариант, основанный на мониторинговых данных (1985–2005 гг.) по гидрохимическому состоянию р. Кыга и Кокши, оценке боковой приточности, вычисленной при составлении внутригодового водного баланса ТО.

В соответствии с ретроспективным анализом публикаций в работе [Шевченко, 2010, с. 87] сделан вывод о незначительной роли атмосферных осадков в питании ТО. Далее считается, что вклад атмосферных осадков — в пределах погрешности выполняемого моделирования. Используя существующее мнение об устойчивости гидрохимического состояния ТО в последние десятилетия до десятых годов нашего века, можно условно считать антропогенную составляющую поступлений непосредственно в ТО (диффузная нагрузка) в расчетный период также пренебрежимо малой.

Видно, что приведены действительно основные составляющие годового баланса, так как невязка составляет приблизительно 4 % по азоту и 2 % по фосфору, т. е. в пределах погрешности моделирования.

Модельные расчеты потоков веществ позволяют вычислить балансы и оценить вклад тех или иных компонентов модели и процессов с течением времени и суммарно за год. В годовом балансе ТО трансформация NH_4 в NO_2 составила приблизительно 1192 тN; потребление NH_4 фитопланктоном — 9 тN. 662 тN попали в воду озера с экскрецией NH_4 гетеротрофных бактерий (которые, как и простейшие, в данной модели не выделялись специальными переменными, но, как известно, ответственны за упомянутые процессы). Внешний приток NH_4 в ТО составил приблизительно 1404 тN, а вынос с р. Бия — 883 тN.

Трансформация NO_2 в NO_3 составила 1241 тN в годовом балансе NO_3 . Потребление NO_3 фитопланктоном — приблизительно 8 тN. Внешний приток NO_3 в ТО оценивается величиной

Таблица 1. Модельная оценка основных составляющих поступлений и потерь азота и фосфора в Телецком озере для сценарных условий

(в тоннах N)

Вход N		1 квартал	2 квартал	3 квартал	4 квартал	Год
	Поступление форм N с поверхностной приточностью	363,957	5138,118	1525,762	1053,695	8081,531
	Поступление в воду со дна	0,469	8,105	6,465	2,481	17,520
1	Итого	364,426	5146,223	1532,227	1056,175	8099,051
Выход N		1 квартал	2 квартал	3 квартал	4 квартал	Год
	С рекой Бией	-257,998	-4112,636	-2526,733	-871,332	-7768,699
	Седиментация	-2,802	-3,423	-2,948	-2,617	-11,790
2	Итого	-260,8	-4116,0598	-2529,681	-873,948	-7780,489
3	Невязка (сумма п. 1 и п. 2) в тоннах азота	103,626	1030,163	-997,454	182,227	318,562
4	Невязка по N, в процентах	-40 %	-25 %	39 %	-21 %	-4 %

(в тоннах P)

Вход P		1 квартал	2 квартал	3 квартал	4 квартал	Год
	Поступление форм P с поверхностной приточностью	6,267	67,616	28,242	23,029	125,153
	Поступление в воду со дна	0,002	0,193	0,212	0,333	0,740
5	Итого	6,269	67,809	28,454	23,362	125,894
Выход P		1 квартал	2 квартал	3 квартал	4 квартал	Год
	С рекой Бией	-4,194	-65,747	-39,921	-13,9	-123,763
	Седиментация	-0,051	-0,066	-0,055	-0,041	-0,213
6	Итого	-4,245	-65,813	-39,975	-13,942	-123,976
7	Невязка (сумма п. 5 и п. 6) в тоннах фосфора	2,024	1,996	-11,522	9,420	1,917
8	Невязка по P, в процентах	-48 %	-3 %	29 %	-68 %	-2 %

приблизительно 1253 тN, а вынос с р. Бия — 1875 тN. Можно видеть, что разность между приходом и потерями аммонийного азота практически покрывается за счет превышения нитратного азота в выносе по сравнению с притоком.

В структуре годового баланса *DIP* трансформация *DOP* в *DIP* составляет более 2 тP; потребление *DIP* фитопланктоном — более 1,4 тP. Внешний приток *DIP* в ТО составляет более 79 тP, а вынос с р. Бия — 66 тP.

Соответствующие расчеты балансов *DON*, *DOP*, азота и фосфора в составе детрита позволили сделать вывод о значимой роли гетеротрофных бактерий и простейших в процессах трансформации биогенных соединений в экосистеме ТО. Наиболее существенное потребление *DON*, *DOP* названными микроорганизмами имеет место с июля по сентябрь. Их доля в балансе растворенных органических веществ оценивается величиной приблизительно 30 %.

Наиболее существенное потребление *PD* и *ND* зоопланктоном происходит во второй половине года и достигает более 93 тP и 493 тN. Увеличение азотной и фосфорной составляющих детрита в результате отмирания зоо- и фитопланктона большей частью происходит в холодный сезон, а внутренний поток через этот канал трансформации в целом составляет более 80 тP и приблизительно 779 тN за год.

7. Оценка ассимиляционного потенциала озера

Для охраны вод и рационального водопользования важным показателем является ассимиляционный потенциал водного объекта как его способность без потери для устойчивости

разлагать загрязняющие вещества природного и антропогенного происхождения, устранять их вредное воздействие. Временной период сбора мониторинговых гидрохимических и гидробиологических данных, использованных в данном исследовании, — с середины восьмидесятых годов прошлого века до нулевых годов включительно — считается временем ограниченного антропогенного воздействия на экологическое состояние природных вод, в том числе ТО. Мнения специалистов сходятся на том, что по крайней мере в это время состояние его экосистемы было устойчивым, а биогенная нагрузка на ТО была приближена к природной, практически фоновой. В таком предположении в работе была предпринята попытка оценки допустимой биогенной нагрузки, как не меняющейся степени загрязнения вод ТО. А это может трактоваться как случай, когда в экосистеме ТО в течение года ассимилируется объем загрязняющих биогенных веществ, равный поступающему массовому потоку в водный объект за тот же период. Для этого случая могут быть оценены значения концентраций $P_{\text{общ.}}$ и $N_{\text{общ.}}$, соответствующие случаю допустимой биогенной нагрузки.

Подобный подход [Лозовик, Рыжаков, Сабылина, 2011; Лозовик и др., 2016; Лозовик, 2015; Лозовик, Фрумин, 2018] позволил в свое время оценить допустимую биогенную нагрузку на достаточно изученные, по сравнению с ТО, озера северо-западной части РФ (например, [Филатов и др., 2015]). В этих работах исследователи пользовались непосредственно измеренными данными наблюдений за трансформацией круговорота питательных веществ в упомянутых водных экосистемах.

В нашем исследовании на основе восполнения недостающих данных наблюдений расчетными характеристиками, полученными при моделировании биогенного круговорота, получены предварительные оценки допустимой биогенной нагрузки на ТО с целью сохранения его устойчивого состояния.

Под «устойчивым состоянием» экосистемы ТО понимается отсутствие или незначительное изменение качества водной среды, а также степени загрязнения и трофического состояния водного объекта в результате антропогенного влияния. В этом контексте «основной принцип... — это сохранение геохимического класса вод, отвечающего природному состоянию объекта при увеличении нагрузки» [Лозовик, 2006, с. 353]. Поэтому под «нарушением устойчивости» здесь и далее понимается изменение геохимического класса вод, что может повлечь за собой эффекты, не наблюдавшиеся в экосистеме водоема раньше, в том числе нежелательные.

Показатель удерживающей способности озера R_u (б/р величина), характеризующий относительное понижение концентрации общего азота / общего фосфора (здесь и далее: вещества u) в водоеме по сравнению с его содержанием в приточных водах задается как в [Лозовик, Рыжаков, Сабылина, 2011]:

$$R_u = \frac{\bar{C}_{u\text{-in}} - \bar{C}_{u\text{-l}}}{\bar{C}_{u\text{-in}}}, \quad (4)$$

где $\bar{C}_{u\text{-in}}$ и $\bar{C}_{u\text{-l}}$ — средневзвешенные концентрации вещества u в приточных водах и в озере соответственно.

Коэффициент K_u — показатель скорости трансформации вещества u (год^{-1}) оценивается из кинетического уравнения, полученного в работе [Лозовик, Рыжаков, Сабылина, 2011]:

$$K_u = \frac{R_u}{\tau \cdot (1 - R_u \cdot e^{-1/\tau})}, \quad \tau = \frac{V_0}{V_{\text{out}}}, \quad (5)$$

где τ — временной период водообмена в ТО с размерностью (год); V_0 — объем воды в озере в начальный момент, м^3 ; V_{out} — водный сток из озера, $\text{м}^3/\text{год}$.

Суммарная ассимиляция в озере A_{s_u} была рассчитана, согласно [Лозовик, Рыжаков, Сабылина, 2011], как

$$A_{s_u} = K_u \cdot C_u \cdot V_{\text{out}} \cdot (\tau + 1) \quad (6)$$

с размерностью в г единиц Р или N, соответственно, в год.

Представляется, что использование показателей (4)–(6) имеет сходство с подходом Стригера и Фелпса, применивших для изучения распада легкоокисляемых органических веществ в водной среде инструментарий кинетики первого порядка. Здесь, как и там, реализуется эвристический подход. Для интерпретации изменчивости общего фосфора (азота), литофильных элементов и металлов в [Лозовик, Рыжаков, Сабылина, 2011; Лозовик, Кулик, Ефременко, 2020] ее причиной считается некое «удержание водным объектом», в предположении о том, что последнее происходит по типу реакции заданного типа. Расчет ассимиляции происходит на основе предположения о возможности оценивать ее пропорциональной произведению показателя скорости трансформации на концентрацию вещества и величину стока (для озер учитывается также ассимиляция в котловине последних). Сравнение величины фактической нагрузки на водоем со значением показателя (6) служит количественным инструментом для индикации перехода водных объектов из одного класса в другой в геохимической классификации вод [Лозовик, 2006].

В табл. 2 приведены расчетные характеристики ряда озер северо-западной части РФ и соответствующие предварительные расчетные оценки в случае ТО.

Таблица 2. Период водообмена, удерживающая способность озер, коэффициенты скорости трансформации веществ и суммарная ассимиляция

№	Озеро	τ, лет	$P_{\text{общ.}}$			$N_{\text{общ.}}$		
			R, б/р	K, год ⁻¹	As, тР/год	R, б/р	K, год ⁻¹	As, тN/год
1	Онежское [Лозовик, Рыжаков, Сабылина, 2011; Лозовик и др., 2016; Лозовик, 2015]	15,6	0,72	0,194	624	0,70*	0,13*	6122*
2	Ладожское [Лозовик, Рыжаков, Сабылина, 2011; Лозовик, 2015]	11,7	0,63	0,13	1284	0,69*	0,16*	—
3	Псковско-Чудское [Лозовик, Фрумин, 2018]	2,19	0,44	0,25	112	0,53	0,33	1136
4	Крошноозеро [Лозовик, Рыжаков, Сабылина, 2011; Лозовик, 2015]	0,88	0,47	0,63	2,1	0,38*	0,49*	—
5	Телецкое	4,35	0,02	0,005	3,5	0,06	0,014	585

Обозначение: «—» — нет данных.

В ряде случаев указанные характеристики, отмеченные знаком *, оценивались для $N_{\text{орг}}$ в аллохтонном веществе — основной части $N_{\text{общ.}}$ для названных озер. Для данного исследования, где был важен лишь порядок отмеченных величин, этого было достаточно.

Как видно, расчетная годовая суммарная ассимиляция в ТО составляет всего 3,5 тР и 585 тN в год при общем поступлении в озеро 126 тР и 8100 тN в год. Таким образом, модельный анализ самоочищения для ТО показал, что у озера ассимиляционный потенциал по отношению к соединениям фосфора незначителен, практически отсутствует. По отношению к соединениям азота сравнительно небольшой, по сравнению с другими указанными озерами, запас самоочищения еще имеется.

Значения среднегодовых концентраций, соответствующие случаю допустимой биогенной нагрузки, равны $P_{\text{общ.}} = 0,013 \text{ гР/м}^3$ и $N_{\text{общ.}} = 0,895 \text{ гN/м}^3$. Таким образом, ассимиляционный потенциал по фосфору исчерпан, по азоту — небольшой, в пределах второй значащей цифры после запятой, имея в виду, что расчетная среднегодовая величина составляет 0,836 гN/м³.

Результаты модельных расчетов свидетельствуют о том, что воды ТО из-за низкой температуры воды в течение всего года наряду с уникальной чистотой отличаются крайне слабо развитым сообществом гидробионтов. Последнее приводит к малой самоочищающей способности ТО. Вода ТО чистая не за счет достаточной ассимиляции, а ввиду того, что до сих пор была низкая антропогенная нагрузка.

В случае других озер повышение антропогенного пресса могло бы сглаживаться за счет утилизации вследствие жизнедеятельности достаточно развитых сообществ гидробионтов. Здесь же достаточного ресурса самоочищения нет, и сравнительно небольшое повышение антропогенного загрязнения может привести к нарушению устойчивости водной экосистемы.

8. Заключение

Выполненные исследования показали, что разработанная АП-модель достаточно адекватно описывает сложные биогеохимические взаимодействия и сезонную динамику основных биологических и химических показателей качества воды в Телецком озере. В этом один из наиболее важных полученных результатов.

Так, например, некоторые подтверждения согласия ряда наблюдавшихся фактов, существенных для характеристики условий развития фитопланктона в ТО, с результатами расчетов таковы:

- в 1990–1997 гг средняя многолетняя биомасса фитопланктона в ТО изменялась в пределах от 0,009 до 0,044 г/м³ [Митрофанова, 2000, с. 157]; сценарные модельные расчеты, выполненные в нашем исследовании, оценивают эту характеристику как 0,024 г/м³;
- статистические показатели биомассы фитопланктона по акватории ТО, оцененные по всем месяцам теплого периода в 1989 г. и 1997 г. [Митрофанова, 2000, с. 103], достигали своего внутригодового максимума в период с конца августа по октябрь, что согласуется с данными модельных расчетов, приведенных на рис. 2, в, г этой статьи.

Еще один существенный результат работы заключается в том, что разработана модель для оценки ассимиляционного потенциала внутренних водоемов, обеспеченных данными мониторинга Государственной системы наблюдений Росгидромета. Значения среднегодовых концентраций в воде ТО, соответствующие случаю допустимой биогенной нагрузки, равны $P_{\text{общ.}} = 0,013 \text{ гP/м}^3$ и $N_{\text{общ.}} = 0,895 \text{ гN/м}^3$. Таким образом, ассимиляционный потенциал по фосфору исчерпан, по азоту — небольшой: в пределах второй значащей цифры после запятой, имея в виду, что среднегодовое значение общего N в расчетах составило 0,836 гN/м³.

Итак, экосистема Телецкого озера находится на грани изменения геохимического класса вод. Происходящее на водосборе уникального водоема кратное увеличение интенсивности рекреационной, а по сути — антропогенной деятельности, ведет к регрессу состояния водной экосистемы. Необходимы неотложные меры по приведению системы мониторинга Телецкого озера к современному уровню для своевременного выявления неблагоприятных тенденций и реализации адекватных мер по оздоровлению экологической ситуации.

Список литературы (References)

- Акулова О. Б., Букатый В. И. Оценка влияния оптически активных компонентов воды на ослабление света в озере Телецкое // Ползуновский альманах. — 2019. — № 4. — С. 63–65.
Akulova O. B., Bukatyy V. I. Ocenka vlijaniya opticheski aktivnyh komponentov vody na oslablenie sveta v ozere Teleckoe [The influence of optical active components of water on the attenuation of light in Lake Teletskoye] // Polzunovskij al'manah. — 2019. — No. 4. — P. 63–65 (in Russian).

- Акулова О. Б., Букатый В. И., Вагнер А. А., Дьяченко А. В., Коломейцев А. А., Зиновьев А. Т.* Фотосинтетически активная солнечная радиация в Телецком озере в период открытой воды // Известия Алтайского государственного университета. — 2022. — № 4 (126). — С. 11–17. — DOI: 10.14258/izvasu(2022)4-01
- Akulova O. B., Bukatyy V. I., Vagner A. A., D'yachenko A. V., Kolomejcev A. A., Zinov'ev A. T.* Fotosinteticheski aktivnaja solnechnaja radiacija v Teleckom ozere v period otkrytoj vody [Photosynthetically active solar radiation in Lake Teletskoye during the open water period] // Izvestija Altajskogo gosudarstvennogo universiteta. — 2022. — No. 4 (126). — P. 11–17. — DOI: 10.14258/izvasu(2022)4-01 (in Russian).
- Брандт З.** Анализ данных. Статистические и вычислительные методы для научных работников и инженеров. — М.: Мир, 2003. — 686 с.
- Brandt Z.* Analiz dannyh. Statisticheskie i vychislitel'nye metody dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov [Data analysis: Statistical and computational methods for scientists and engineers]. — Moscow: Mir, 2003. — 686 p. (in Russian).
- Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о качестве поверхностных вод суши. Раздел 1. Поверхностные воды. — 1985–2003. — Т. 1 (18). Бассейны Оби (без бассейна Иртыша), вып. 10, 11, часть 1. Реки и каналы, часть 2. Озера и водохранилища.**
- Gosudarstvennyj vodnyj kadastr. Ezhegodnye dannye o kachestve poverhnostnyh vod sushi. [The State Water Cadastre. Annual data on the land surface water quality] Razdel 1. Poverhnostnye vody. — 1985–2003. — Vol. 1 (18). Bassejny Obi (bez bassejna Irtysha), vyp. 10, 11, Chast' 1. Reki i kanaly, Chast' 2. Ozera i vodohranilishha (in Russian).*
- Зуйкова Е. И.* Современное состояние зоопланктонного сообщества Телецкого озера: дисс. ... кандидата биол. наук. 03.00.18. — Красноярск: Красноярский госуниверситет, 1998. — 124 с.
- Zujkova E. I.* Sovremennoe sostojanie zooplanktonnogo soobshhestva Teleckogo ozera [The current state of the zooplankton community of Lake Teletskoye]: dis. ... kandidata biol. nauk. — Krasnojarsk, 1998. — 124 p. (in Russian).
- Леонов А. В.** Моделирование природных процессов на основе имитационной гидроэкологической модели трансформации соединений С, N, P, Si. — 2-е изд. — Южно-Сахалинск: Сахалинский госуниверситет, 2012. — 148 с.
- Leonov A. V.* Modelirovanie prirodnykh protsessov na osnove imitatsionnoi gidroekologicheskoj modeli transformatsii soedinenij C, N, P, Si [Modeling of natural processes based on a simulated hydroecological model of transformation of compounds C, N, P, Si]. — 2-e izd. — Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalinskii gosuniversitet, 2012. — 148 p. (in Russian).
- Леонов А. В., Пищальник В. М.** Моделирование природных процессов в водной среде. Теоретические основы. — Южно-Сахалинск: Сахалинский госуниверситет, 2012. — 228 с.
- 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).
- Лозовик П. А.** Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: дисс. ... доктора хим. наук. 25.00.36. — М.: Ин-т геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского, 2006. — 481 с.
- Lozovik P. A.* Hidrogeohimicheskie kriterii sostojanija poverhnostnyh vod gumidnoj zony i ih ustojchivosti k antropogennomu vozdejstviyu [Hydrogeochemical criteria for the state of surface waters of the humid zone and their resistance to anthropogenic impact]: diss. ... doktora him. nauk. 25.00.36. — Moscow: In-t geohimii i analiticheskoj himii im. V. I. Vernadskogo, 2006. — 481 p. (in Russian).
- Лозовик П. А.** Нормирование допустимой антропогенной нагрузки на водные объекты с экологической и геохимических позиций // Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года»: сб. науч. тр., Петрозаводск, 06–11 июля 2015 г. — Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. — Т. 1. — С. 446–452.
- Lozovik P. A.* Normirovanie dopustimoi antropogennoi nagruzki na vodnye ob'ekty s ekologicheskoj i geokhimicheskikh pozitsii [Rationing of the permissible anthropogenic load on water bodies from an ecological and geochemical perspective] // Nauchnoe obespechenie realizatsii "Vodnoi strategii Rossijskoj Federatsii na period do 2020 goda": sb. nauch. tr., Petrozavodsk, 06–11 iyulya 2015 g. — Petrozavodsk: Karel'skii nauchnyi tsentr RAN, 2015. — Vol. 1. — P. 446–452 (in Russian).
- Лозовик П. А., Бородулина Г. С., Карпечко Ю. В., Кондратьев С. А., Литвиненко А. В., Литвинова И. А.** Биогенная нагрузка на Онежское озеро по данным натурных наблюдений // Труды Кар. НЦ РАН. — 2016. — № 6. — С. 35–52.
- Lozovik P. A., Borodulina G. S., Karpechko Yu. V., Kondrat'ev S. A., Litvinenko A. V., Litvinova I. A.* Biogennaya nagruzka na Onezhskoe ozero po dannym naturnykh nablyudenii [Biogenic load on Lake Onega according to field observations] // Trudy Kar. NTs RAN. — 2016. — No. 6. — P. 35–52 (in Russian).
- Лозовик П. А., Кулик Н. В., Ефременко Н. А.** Литофильные элементы и тяжелые металлы в Онежском озере: источники поступления, содержание и трансформация // Труды Кар. НЦ РАН. — 2020. — № 4. — С. 62–74. — DOI: 10.17076/lim1189

- Lozovik P. A., Kulik N. V., Efremenko N. A.* Litofil'nye jelementy i tzhzhelye metally v Onezhskom ozere: istochniki postupleniya, sodержanie i transformatsiya [Lithophilic elements and heavy metals in Lake Onega: sources of supply, content and transformation] // *Trudy Kar. NC RAN.* — 2020. — No. 4. — P. 62–74. — DOI: 10.17076/lim1189 (in Russian).
- Лозовик П. А., Рыжиков А. В., Сабылина А. В.* Процессы трансформации, круговорота и образования веществ в природных водах // *Труды Кар. НЦ РАН.* — 2011. — № 4. — С. 21–28.
- Lozovik P. A., Ryzhakov A. V., Sabylina A. V.* Protsessy transformatsii, krugovorota i obrazovaniya veshchestv v prirodnykh vodakh [The processes of transformation, circulation and formation of substances in natural waters] // *Trudy Kar. NTs RAN.* — 2011. — No. 4. — P. 21–28 (in Russian).
- Лозовик П. А., Фрумин Г. Т.* Современное состояние и допустимые биогенные нагрузки на Псковско-Чудское озеро // *Труды Кар. НЦ РАН.* — 2018. — № 3. — С. 3–10.
- Lozovik P. A., Frumin G. T.* Sovremennoe sostoyanie i dopustimye biogennye nagruzki na Pskovsko-Chudskoe ozero [Current state and permissible biogenic loads on Lake Pskov-Chudskoe] // *Trudy Kar. NTs RAN.* — 2018. — No. 3. — P. 3–10 (in Russian).
- Митрофанова Е. Ю.* Фитопланктон Телецкого озера (Горный Алтай, Россия): дисс. . . кандидата биол. наук. 03.00.18. — М., 2000. — 200 с.
- Mitrofanova E. Yu.* Fitoplankton Teleckogo ozera [Phytoplankton of Lake Teletskoye]: dis. . . kandidata biol. nauk. — Moscow, 2000. — 200 p. (in Russian).
- 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.
- 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).
- 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.
- Podgornyy K. A.* Matematicheskaja model' dlja izuchenija ekosistemy 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).
- Рубин А. Б., Пытьева Н. Ф., Ризниченко Г. Ю.* Кинетика биологических процессов. — М.: изд-во МГУ, 1977. — 300 с.
- Rubin A. B., Pyt'eva N. F., Riznichenko G. Yu.* Kinetika biologicheskikh processov [Kinetics of biological processes]. — Moscow: izd-vo MGU, 1977. — 300 p. (in Russian).
- Селегей В. В., Селегей Т. С.* Телецкое озеро. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. — 143 с.
- Selegej V. V., Selegej T. S.* Teleckoe ozero [Teletskoye Lake]. — Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978. — 143 p. (in Russian).
- Страшкраба М., Гнаук А.* Пресноводные экосистемы. Математическое моделирование / пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 376 с.
- Strashkraba M., Gnauk A.* Presnovodnye ekosistemy. Matematicheskoe modelirovanie [Freshwater ecosystems. Mathematical model] / per. s angl. — Moscow: Mir, 1989. — 376 p. (in Russian).
- Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Литвиненко А. В. и др.* Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. — Петрозаводск: Карельский научный центр Российской академии наук, 2015. — 375 с.
- Filatov N. N., Nazarova L. E., Litvinenko A. V. i dr.* Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh [The largest lakes and reservoirs in the North-West of the European territory of Russia: the current state and changes of ecosystems under climatic and anthropogenic influences]. — Petrozavodsk: Karel'skii nauchnyi tsentr Rossiiskoi akademii nauk, 2015. — 375 p. (in Russian).
- Цхай А. А., Агейков В. Ю.* Математическое моделирование процессов трансформации соединений азота и фосфора и изменчивости кислородного режима в водохранилищах // *Водные ресурсы.* — 1997. — Т. 24, № 6. — С. 718–728.
- Tskhai A. A., Ageikov V. Yu.* Matematicheskoe modelirovanie processov transformacii soedinenij azota i fosfora i izmenchivosti kislorodnogo rezhima v vodokhranilishchah [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. 718–728 (in Russian).

- Цхай А. А., Агейков В. Ю. Моделирование изменения уровня эвтрофирования водохранилища на основе воспроизведения биогеохимических циклов // Водные ресурсы. — 2020. — Т. 47, № 1. — С. 105–113. — DOI: 10.31857/S0321059620010149
Tskhai A. A., Ageikov V. Yu. Modelirovanie izmeneniya urovnya evtrofirovaniya vodokhranilishcha na osnove vosproizvedeniya biogeokhimicheskikh tsiklov [Modeling of changes in the level of reservoir eutrophication based on the reproduction of biogeochemical cycles] // Water Resources. — 2020. — Vol. 47, No. 1. — P. 105–113. — DOI: 10.31857/S0321059620010149 (in Russian).
- Цхай А. А., Леонов А. В. Прогноз качества воды проектируемого водохранилища на основе модели трансформации соединений азота и фосфора // Водные ресурсы. — 1995. — Т. 22, № 3. — С. 261–272.
Tskhai A. A., Leonov A. V. Prognoz kachestva vody proektiruемого vodokhranilishcha na osnove modeli transformacii soedinenij azota i fosfora [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).
- 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. — № 4 (71). — С. 40–60. — DOI: 10.24412/2410-1192-2023-17104
Tskhai A. A., Romanov M. A. Ob uslovijah protokanija ciklov biogennyh elementov 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. — No. 4 (71). — P. 40–60. — DOI: 10.24412/2410-1192-2023-17104 (in Russian).
- Шевченко Г. А. Геоэкологическое состояние акватории и прибрежной зоны Телецкого озера (Горный Алтай): дисс. ... канд. геолого-минерал. наук. 25.00.36. — Томск: ТПУ, 2010. — 149 с.
Shevchenko G. A. Geoekologicheskoe sostojanie akvatorii i pribrezhnoj zony Teleckogo ozera (Gornyj Altaj): [Geoecological condition of the water area and coastal zone of Lake Teletskoye (Gornyj Altaj)]: dis. ... kandidata geologo-mineral. nauk. — Tomsk, 2010. — 149 p. (in Russian).
- Bai J., Zhao J., Zhang Z., Tian Z. Assessment and a review of research on surface water quality modeling // Ecological Modelling. — 2022. — Vol. 466. — 109888. — <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.109888>
- Chapra S. C., Dolan D. M. Great Lakes total phosphorus revisited: 2. Mass balance modeling // Journal of Great Lakes Research. — 2012. — Vol. 38, No. 4. — P. 741–754. — <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0380133012001980> (accessed: 12.08.2024).
- Land M., Graneli W., Grimvall A., Hoffmann C. C., Mitsch W. J., Tonderski K. S., Verhoeven J. T. A. How effective are created or restored freshwater wetlands for nitrogen and phosphorus removal? A systematic review // Environmental Evidence. — 2016. — Vol. 5. — P. 1–26. — <https://doi.org/10.1186/s13750-016-0060-0>
- Neumann A., Fernando Ya., Saber A., Arhonditsis G. B. Toward the development of an ecosystem model ensemble to support adaptive management in Lake Ontario // Environmental Reviews. — 2024. — Vol. 32, No. 2. — P. 231–262. — <https://doi.org/10.1139/er-2023-0100>
- Skinner M. Wetland phosphorus dynamics and phosphorus removal potential // Water Environ. Res. — 2022. — Vol. 94, No. 10. — e10799. — <https://doi.org/10.1002/wer.10799>
- Theil H. Applied economic forecasting. — Amsterdam: North-Holland, 1971. — 474 p.
- Tong Y., Li J., Qi M., Zhang X., Wang M., Liu X., Zhang W., Wang X., Lu Y., Lin Y. Impacts of water residence time on nitrogen budget of lakes and reservoirs // Sci. Total Environ. — 2019. — Vol. 646. — P. 75–83.
- Wetzel R. G. Limnology: lake and river ecosystems. — Third Edition. — San Diego: Academic Press, 2001. — 1006 p.