

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТРАНСФОРМАЦИИ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА И ФОСФОРА В УСЛОВИЯХ НОВОСИБИРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

А.А. Цхай^{1,2}, В.Ю. Агейков², А.Н. Семчуков¹

E-mail: taa1956@mail.ru

¹ ФГБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук», г. Барнаул, Россия

² ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул, Россия

АННОТАЦИЯ: Представлено модельное описание пространственно-неоднородных особенностей экосистемы крупнейшего в Западной Сибири Новосибирского водохранилища на основе воспроизведения биогеохимических циклов лимитирующих элементов. Сформулирован модельный инструментарий для изучения количественных и качественных изменений переменных состояния водного биогеоценоза. Моделирование особенностей трансформации соединений азота и фосфора в водах Новосибирского водохранилища выполнено в боксовом приближении для получения адекватной картины экологических процессов, протекающих в различных частях водоема. Биомасса фитопланктона в относительно мелководной акватории значительно превышает концентрации в глубоководной и приплотинной частях водохранилища. Воспроизведена детальная динамическая картина изменчивости содержания загрязняющих веществ, а также кислорода, нормированных предельно допустимыми значениями, в акваториях водохранилища.

Полученные в ходе моделирования оценки в целом соответствуют наблюдаемым данным. Выполненное исследование может служить основой для развития модельного подхода к мониторингу и управлению экосистемными процессами в Новосибирском водохранилище.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Новосибирское водохранилище, режим эксплуатации, математическая модель, гидрология, загрязняющие вещества, трансформация, биогеохимический цикл.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН» при частичной финансовой поддержке РФФИ и Алтайского края (проект № 18-41-220002\19).

Крупнейшее в Западной Сибири Новосибирское водохранилище создано на р. Оби в 1959 г. (плотина расположена выше по течению от г. Новоси-

бирска). Комплексное изучение Новосибирского водохранилища в 1981 г. позволило получить сведения, необходимые для предварительного модельного описания процессов в экосистеме водохранилища и калибровки модели [1–3]. Эти данные характеризуют водный и термический режимы, морфометрию и актинометрию водохранилища.

В настоящее время в мире сформулировано более четырех тысяч моделей водных экосистем [4]. Достаточно полное представление о ситуации в этой научной области можно составить, например, по работам [5–7]. Продолжается создание моделей состояния водных экосистем, углубляющих понимание связанных с пространственной неоднородностью внутриводоемных процессов особенностей, например, [8]. Тем не менее, обоснование подходов к оценке состояния экосистем водных объектов на основе модельного воспроизведения природных биогеохимических циклов элементов остается актуальным. В этом контексте для условий Новосибирского водохранилища 1981 г. была решена трехмерная гидроредотермическая задача [9]. В данном исследовании на основе полученных пространственно-временных полей течений и температуры воды формулируются результаты применения модельного подхода для изучения количественных и качественных изменений компонентов экосистемы Новосибирского водохранилища.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

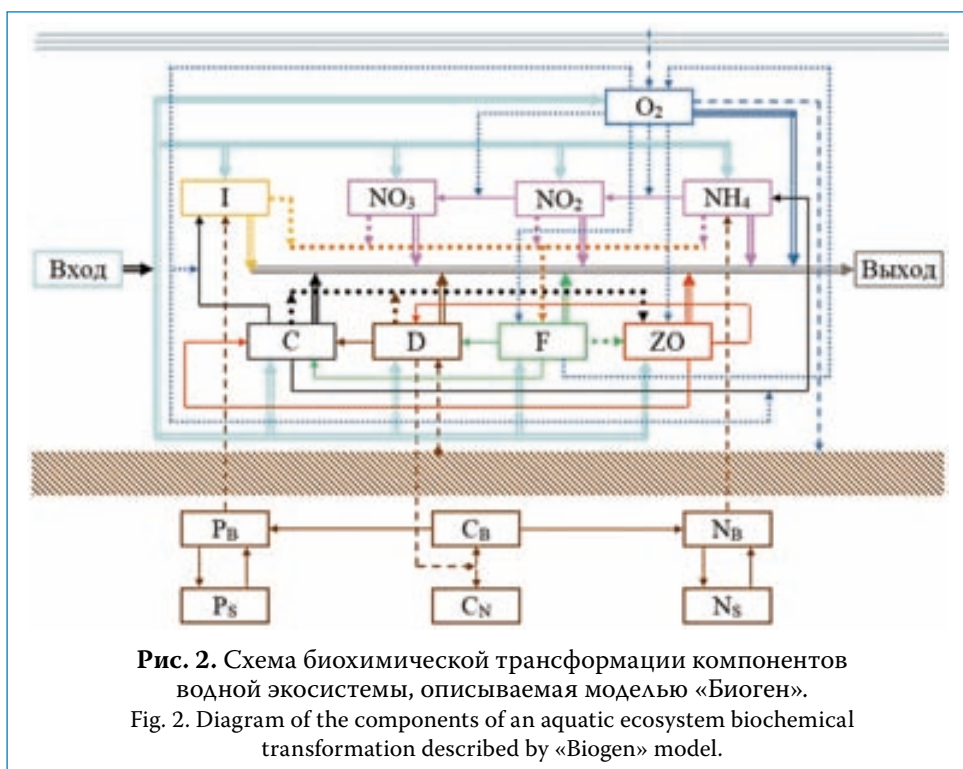
Боксовое приближение при моделировании

Боксовое приближение, например [10], применено для изучения пространственно-неоднородных динамических процессов. При этом используются 10 акваторий водохранилища, разделенных на три слоя по глубине (30 боксов). Из них семь акваторий расположены по длине водохранилища вдоль его русла, две акватории – на мелководье, у левого берега озерной части водохранилища, одна – в Бердском заливе (рис. 1).

Предполагается, что верхний и нижний слои имеют толщину в 1 м, если глубина превышает 2 м. Придонный слой отсутствует при глубине менее 1 м. В случае ледового покрова глубина H – это расстояние от нижней границы льда до дна.

Среднесуточные параметры каждого бокса (температура воды; объем, площадь, длина, ширина и высота бокса; площадь соприкосновения с дном; площадь поверхности, свободной ото льда; толщина льда; расстояние от бокса до поверхности воды или нижней поверхности льда; положительные и отрицательные компоненты расхода воды в этот бокс из других боксов) рассчитаны в работе [9].

Трансформация и динамическое поведение девяти переменных C_i (рис. 2) моделируются для воспроизведения процессов биогеохимической трансформации соединений азота и фосфора, а также кислородного режи-



ма в поверхностных и промежуточных боксах. Эти переменные относятся к водной толще, соответственно: ZO – биомасса зоопланктона; F – биомасса фитопланктона; $N-NH_4$, $N-NO_2$, $N-NO_3$ – минеральные формы N ; D – взвешенные вещества; C – растворенные органические вещества; I – минеральный P ; O_2 – кислород.

Еще шесть переменных добавляются в расчетах для придонных боксов. Речь идет о C_B – органическом веществе (ОВ), участвующем в обменных процессах; интерстициальных формах фосфора и азота – P_B и N_B соответственно; сорбированных на твердой фазе P_S и N_S . Пассивные ОВ в составе скелета донных отложений (ДО) обозначаются переменной C_N .

Уравнение модели «Биоген» при описании трансформации i -ого компонента в j -ом боксе выглядит следующим образом:

$$\frac{d(C_i^j \cdot W_j)}{dt} = W_j \cdot R_i^j + \sum_k Q_{kj} C_i^k - \sum_q Q_{jq} C_i^j + J_i^j \cdot \Omega_j + G_i^j \cdot L_j, \quad (1)$$

где $i = ZO, F, NH_4, NO_2, NO_3, D, C, I, O_2$;

C_j^i – концентрация i -ого компонента в j -ом боксе;

W_j – объем j -го бокса;

t – время;

R_j^k – скорость биохимической трансформации соединения C_i в k -м боксе;

Q_{kj} – расход перетока из k -го бокса в j -ый бокс;

J_i^j – массовый поток i -го компонента через межфазную поверхность в j -ый бокс;

Ω_j – площадь межфазной поверхности j -го бокса;

G_i^j – боковая нагрузка i -го компонента в j -ый бокс;

L_j – протяженность j -го бокса.

В промежуточных и придонных боксах боковая нагрузка G_i^j считается равной нулю. Вид членов R_i^k и значения внутренних параметров модели «Биоген» приведены в работе [2].

Распределение течений и температуры воды

Распределение течений и температуры воды в Новосибирском водохранилище получено путем решения трехмерной гидродотермической задачи [9] для моделирования изменчивости компонентов экосистемы в различных частях водоема.

Структура течений воды в верхней части водохранилища соответствует речной системе с достаточно узким руслом и небольшими глубинами. Поток поступающей из р. Оби воды и рельеф дна оказывают основное воздействие

на формирование течений на этом участке. Это главные факторы в формировании потока в нижней озерной части (от с. Завьялово – до плотины ГЭС) только в зимний период. Зимой почти одинаковая по температуре (около 1 °С) толща воды под слоем льда не подвергается ветровому воздействию. Смещение основного потока под влиянием ветра может происходить, когда поверхность воды свободна ото льда. В период осеннего выхолаживания резкое охлаждение поверхностных вод, активизация конвективного перемешивания приводят к возникновению множества нерегулярных структур в общей картине течения. Первые ледовые явления, согласно расчетам по трехмерной модели, появляются в конце октября, установление льда заканчивается к середине ноября. Освобождение ото льда начинается с верхней части водохранилища за счет поступления теплых вод из Оби. Лед лежит достаточно долго в нижней части водохранилища, пока не сходит окончательно к середине мая.

Почти однородное поле температуры, определяющееся, в основном, температурой поступающих из Оби вод, характерно в период свободной ото льда воды для речной части. Влияние потока тепла с поверхности становится явным по мере уменьшения скорости течения ближе к озерной части. Постепенный прогрев или охлаждение вод с образованием устойчивой стратификации идет в озерной части при отсутствии сильных ветров северных и северо-восточных направлений и резких колебаний температуры. Иначе происходит интенсивное перемешивание до почти равномерного распределения.

Динамическое воздействие атмосферы в зимний период прекращается ввиду образования ледового покрытия. Циркуляция вод определяется основным направлением потока поступающих вод и рельефом водоема. В связи с этим на протяжении зимнего периода картина течений отличается значительной устойчивостью.

Гидрологические характеристики водохранилищ

Новосибирское водохранилище является уникальным природным объектом. Вместе с тем сравнение его с другими водоемами может быть выполнено по отдельным гидрологическим характеристикам.

По генезису, в соответствии с классификацией К.К. Эдельштейна [11], водохранилища делятся на три группы: долинные, котловинные и смешанные. Приуроченность к макрорельфу позволяет разделить водохранилища на равнинные, предгорные, горные и высокогорные. Как и Новосибирское, Горьковское и Волгоградское водохранилища являются речными, долинными и равнинными. Близки данные водоемы и по форме ложа: вытянутые, ассиметричные вдоль продольной оси с наибольшей глубиной вблизи плотины.

Все три водохранилища осуществляют неглубокое сезонное регулирование стока, соответственно, их режимы эксплуатации похожи. Гидрологическая структура водных масс – сложная, многокомпонентная, проявляется в накоплении генетически и качественно различных водных масс озерного типа и речных фаз стока. В годовом цикле рассматриваемых водохранилищ выделяют три основные фазы: зимняя, весенне-летний прогрев и осеннее охлаждение. Соответственно, температура воды в разных частях водохранилищ – неоднородная и меняется в течение года в пределах от 0 °С до 26 °С. Термическая стратификация – изменчивая, нерегулярная, не возникает в речной и промежуточной зонах.

Ряд гидрологических характеристик трех крупнейших (с объемом свыше 1 млн м³) водохранилищ с относительно высоким внешним водообменом представлен в табл. 1.

Таблица 1. Некоторые характеристики рассматриваемых водохранилищ*
Table 1. Some characteristic of the reservoirs under consideration

Характеристика	Волгоградское вхр	Горьковское вхр	Новосибирское вхр
Координаты плотины водохранилища, широта/долгота	48°/44°	59°/43°	54°/82°
Расположено на реке	Волга	Волга	Обь
Год создания	1960	1957	1959
Нормальный подпорный уровень, (НПУ)/уровень мертвого объема, м	15/12	84/80	113,5/108,5
Площадь зеркала при НПУ, км ²	3117	1591	1070
Объем при НПУ, км ³	31,45	8,8	8,8
Полезный объем, км ³	8,25	2,8	4,4
Длина/средняя ширина, км	540/5,8	430/3,5	200/10
Максимальная глубина, м	41	22	25
Средняя глубина, м	10	5,5	9
Среднегодовой сток, км ³	260	49,5	52
Коэффициент водообмена, среднемноголетний, год ⁻¹	7,57	6,1	6,67
Боковой приток, км ³ /доля от общего, %	3,1/1	18,3/36	-/5

Примечание: * – данные [1,12 – 17]; «–» – отсутствие данных.

Содержательный анализ влияния водообмена на качество воды был выполнен Д. Собалле и В. Киммелем на основе данных по изменчивости биомассы фитопланктона, содержания биогенных веществ и характеристик водообмена в 812 озерах и водохранилищах и 345 реках США [18]. Оценивая влияние процессов водообмена на выбранные показатели рассмотренных экосистем, авторы пришли к выводу, что при возрастании проточности увеличивается роль абиотических компонент экосистемы в изменении качества воды.

В этой связи авторами выполнена модельная оценка средней концентрации и коэффициента накопления общего фосфора в Новосибирском водохранилище в 1981 г. Эту оценку следует считать косвенной в связи с отсутствием данных наблюдений по общему фосфору и его органическим формам. Недоступные значения определяются по результатам моделирования циклов трансформации биогенных веществ в Новосибирском водохранилище в 1981 г. в нульмерном приближении [19]. Полученные таким образом условные характеристики сравниваются с соответствующими результатами расчетов и наблюдений для Волгоградского и Горьковского водохранилищ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты пространственно-временного распределения в водохранилище соединений азота и фосфора

Особенности гидрохимического и гидробиологического режимов Новосибирского водохранилища – важнейшего водохозяйственного объекта в Западной Сибири [14] – изучены с помощью моделирования биогеохимических циклов трансформации биогенных элементов. Одновременное решение в тридцати рассматриваемых боксах нульмерных задач с заданным тепло-, водо- и массообменом позволило получить предварительную пространственно неоднородную динамическую картину компонентов водной экосистемы Новосибирского водохранилища.

Динамика фитопланктона в различных слоях отображается реалистично: его биомасса в относительно мелководной акватории № 6 существенно превышает концентрации в глубоководной № 8 и приплотинной № 9. Интенсивное развитие водорослей в Бердском заливе (акватория № 10) с относительно высоким содержанием цианопрокариот почти до завершения периода открытой воды (рис. 3) также соответствует данным наблюдений.

Как и в наблюдениях, годовая динамика зоопланктона характеризуется двумя основными пиками роста. При этом зоопланктон, в отличие от фитопланктона, более активен в средних слоях, чем в поверхностных (рис. 4).

Предварительная динамическая картина изменчивости в различных частях Новосибирского водохранилища в 1981 г. получена для концентраций соединений азота, фосфора, а также кислорода, нормируемых величин



нами предельно допустимых концентраций для водных объектов рыбохозяйственного значения. Динамическая картина распределения нитратов, в основном, ограничена предельно допустимыми нормативами. Превышение нормативов по аммонийному и нитритному азоту регулярно и относительно часто отмечено почти на всех участках водохранилища (рис. 5).

Особое значение при исследовании водной экосистемы имеет закон Либиха, утверждающий, что наиболее значим для организма тот фактор, который более всего отклоняется от оптимального значения. В водохранилищах долинного типа с удлинённой, вытянутой формой в плане, как правило, лимитирующим фактором служит содержание фосфора [20].

Одним из существенных прикладных результатов реализованного в данном исследовании подхода к моделированию биогеохимических циклов трансформации соединений азота и фосфора является способ оценки составляющих гидрохимического баланса, что пока является открытым вопросом для Новосибирского водохранилища.

Результаты моделирования, как уже было отмечено, служат лишь косвенной оценкой в отсутствии данных наблюдений, вместе с тем их использование порой позволяет продвинуться в понимании механизмов процессов, наметить направление будущих уточняющих исследований. В работе [19] оценена внеш-

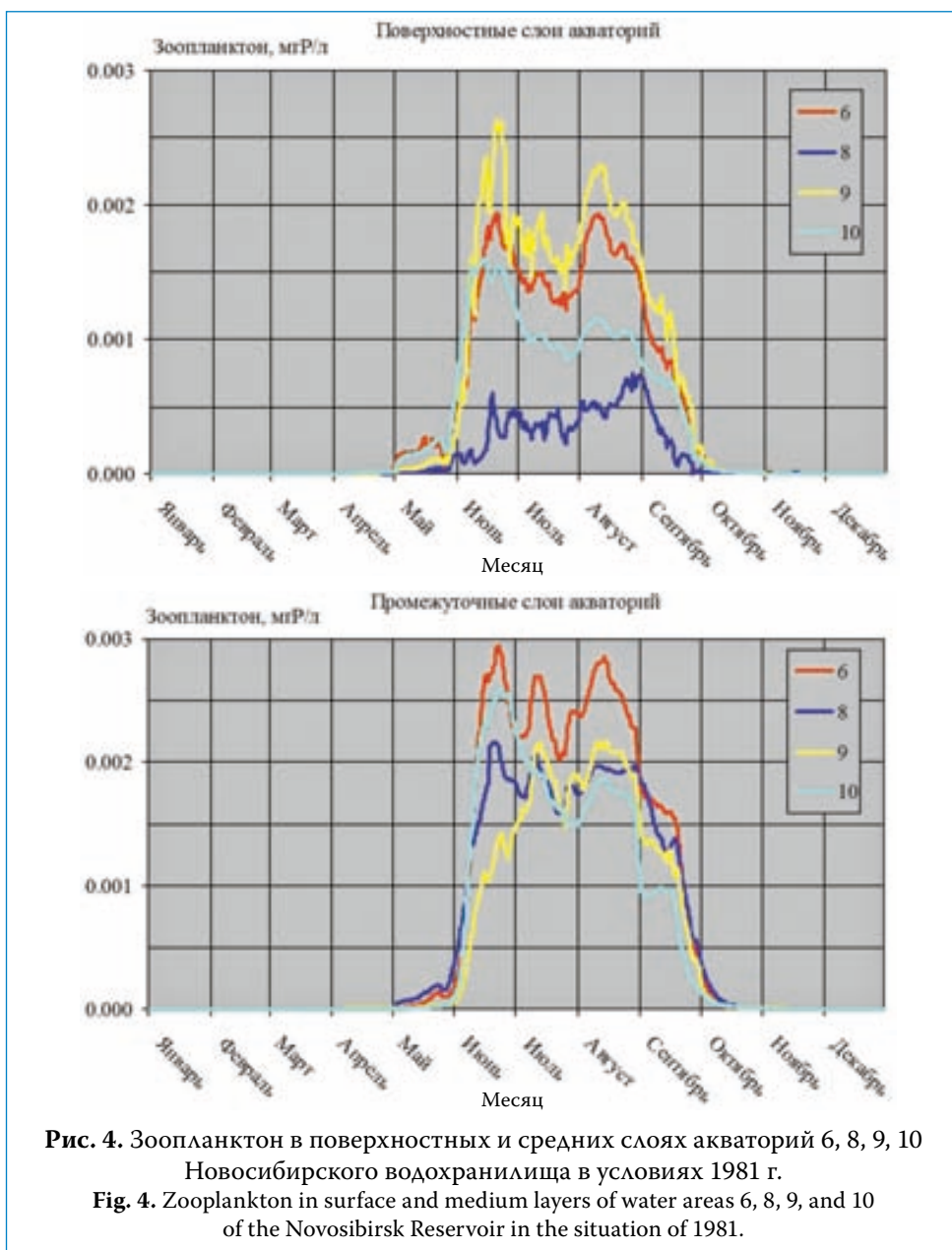


Рис. 4. Зоопланктон в поверхностных и средних слоях акваторий 6, 8, 9, 10 Новосибирского водохранилища в условиях 1981 г.

Fig. 4. Zooplankton in surface and medium layers of water areas 6, 8, 9, and 10 of the Novosibirsk Reservoir in the situation of 1981.

няя фосфорная нагрузка L_p , тР/год на Новосибирское водохранилище в 1981 г., что дает возможность сравнить полученную величину с соответствующими характеристиками Волгоградского и Горьковского водохранилищ (табл. 2).

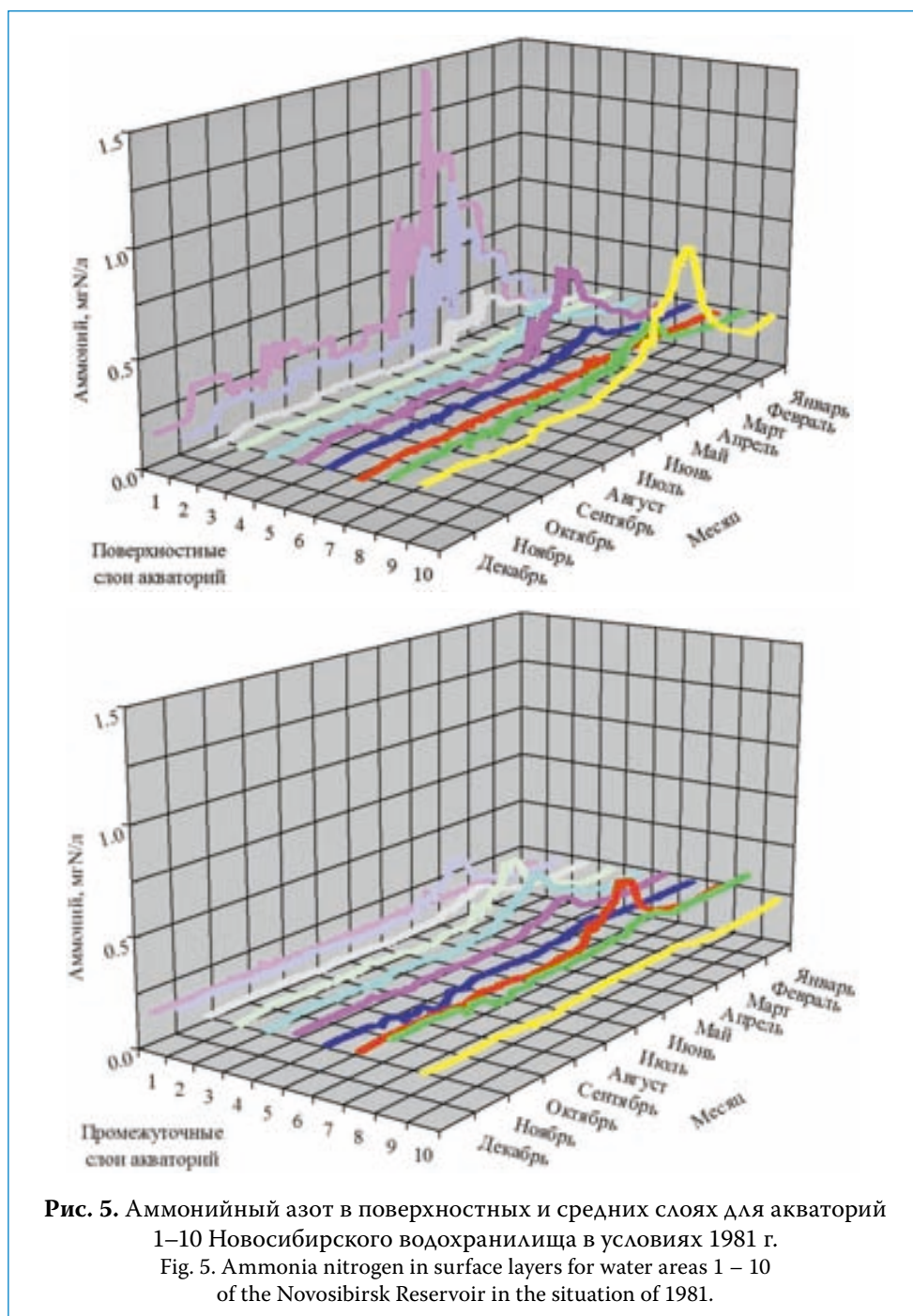


Рис. 5. Аммонийный азот в поверхностных и средних слоях для акваторий 1–10 Новосибирского водохранилища в условиях 1981 г.
Fig. 5. Ammonia nitrogen in surface layers for water areas 1 – 10 of the Novosibirsk Reservoir in the situation of 1981.

Таблица 2. Характеристики фосфора в водохранилищах
Table 2. Characteristics of phosphorous in reservoirs

Водохранилище	L_p , тР/год	K_c , год ⁻¹	Минеральный фосфор Р, среднее, мгР/м ³		Общий фосфор Р, среднее, мгР/м ³	
	расчет	расчет	расчет	наблюдения	расчет	наблюдения
Волгоградское	19231	1,9	–	(16–72)/38	76	86
Горьковское	4290	0,2	–	(0–75)/12	88	91
Новосибирское	3720	1,6	32	(0–290)/44	51	–

Примечание: В дробных выражениях в числителе указаны диапазоны изменений, в знаменателе – среднее.

Хорошо известным фактом является накопление общего фосфора в водохранилищах, связанное с тем, что общая величина внешней фосфорной нагрузки, как правило, всегда больше потерь, связанных с выносом общего фосфора с попуском из водохранилища. Это объясняется потреблением части соединений фосфора гидробийонтами, а также оседанием взвешенных форм на дно, где происходит их разложение с последующим вторичным поступлением в водную толщу.

Коэффициент накопления (седиментации) общего фосфора в водохранилище (K_c) определяется по формуле [20]:

$$K_c = K_b K_p / (1 - K_p), \quad K_p = (P^+ - P^-) / P^+, \quad (2)$$

где K_b – коэффициент внешнего водообмена; P^+ и P^- – приток общего фосфора в водохранилище и его сток с попуском в нижний бьеф соответственно.

Обобщенные данные по минеральному и общему фосфору в трех водохранилищах приведены в табл. 2. Используются расчетные данные по волжским водохранилищам [20], Новосибирскому водохранилищу [19]; данные наблюдений из работ [1, 15, 20, 21].

Характеристики Волгоградского водохранилища, по данным табл. 1, существенно превышают аналогичные показатели Горьковского и Новосибирского водохранилищ по абсолютным значениям. Поэтому неудивительно, что общая фосфорная нагрузка на Волгоградское водохранилище в разы выше, чем аналогичные показатели для двух других водных объектов. Вместе с тем по показателю накопления фосфора Новосибирское водохранилище – более близко к Волгоградскому.

Содержание минерального фосфора в Новосибирском водохранилище, в целом, близко к Волгоградскому и выше, чем в Горьковском. Однако расчетные оценки содержания общего фосфора в рассмотренных волжских водохранилищах оказались выше, чем в Новосибирском. Это можно объ-

яснить разницей в трофическом статусе водохранилищ: Волгоградское и Горьковское относились к мезотрофным водоемам, в то время как Новосибирское в 1981 г. было олиго-мезотрофным, т. е. в волжских водохранилищах больше минерального фосфора шло на потребление фитопланктона.

В ходе выполненного сопоставления предпочтение при выборе периодов гидрохимических наблюдений на трех упомянутых водохранилищах отдавалось годам малой водности. Сделанные выводы, несомненно, носят предварительный характер и призваны быть ориентиром для их дальнейшего уточнения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное численное моделирование экологических процессов в Новосибирском водохранилище в условиях 1981 г. позволяет сделать следующие предварительные выводы.

Динамика фитопланктона во всех слоях различных акваторий Новосибирского водохранилища моделируется правдоподобно. Биомасса фитопланктона в относительно мелководной акватории значительно превышает концентрации в глубоководной и приплотинной частях водохранилища. Интенсивное развитие водорослей в Бердском заливе с относительно высоким почти до конца периода открытой воды содержанием цианопрокариот также согласуется с данными наблюдений. Результаты моделирования годовой динамики экосистемы водохранилища позволяют отметить наблюдавшиеся два основных пика роста и изменение в распределении биомасс зоопланктона по глубине.

Воспроизведена детальная динамическая картина изменчивости загрязняющих веществ, а также кислорода, нормированных величинами предельно допустимых концентраций для водных объектов рыбохозяйственного значения в различных акваториях Новосибирского водохранилища. Оценки, полученные в ходе моделирования, в целом соответствуют наблюдаемым данным. Результаты сравнения расчетных характеристик фосфорных соединений с данными волжских водохранилищ, сходных по ряду гидрологических показателей с Новосибирским водохранилищем, получены из балансовых соотношений.

Выполненное исследование может служить основой для развития модельного подхода к мониторингу и управлению экосистемными процессами в Новосибирском водохранилище.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплексные исследования Новосибирского водохранилища / под ред. Ю.И. Подлипского, Т.С. Чайковской. М.: Гидрометеиздат, 1985. 134 с.
2. 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.
3. Tskhai, A.A., Ageikov, V.Yu. Disturbance of sustainability of the reservoir ecosystem: a model approach for assessing and forecasting the long-term process of eutrophication //

- Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. 2021. Vol. 9. Iss. 1, 1080327. <https://dx.doi.org/10.13044/j.sdewes.d8.0327>.
4. *Шарафутдинова Г.Ф.* Моделирование продукционно-деструкционных отношений в озерных экосистемах: автореф. дисс... канд. геогр. наук. СПб.: РГГМУ, 2013. 192 с.
 5. *Sapkota R.P., Stahl P.D., Rijal K.* Restoration governance: an integrated approach towards sustainably restoring degraded ecosystems // *Environmental Development*. 2018. Vol. 27. P. 83–94.
 6. *Айзатуллин Т.А., Шамардина И.П.* Математическое моделирование экосистем континентальных водотоков и водоемов // *Итоги науки и техники. Сер. Общая экология. Биоценология. Гидробиология. Моделирование водных экосистем*. М.: ВИНТИ, 1980. Т. 5. С. 154–228.
 7. *Bouillon V.V., Håkanson L.* A new general dynamic model to predict biomass and production of bacterioplankton in lake. // *Ecological Modelling*. 2003. Vol. 160. No. 1–2. P. 91–114.
 8. *Muller M.F., Bergmann M., Dannowski R., Dippner J.W., Gnauck A., Haase P., Jochimsen M.C., Kasprzak P., Kröncke I., Kümmerlin R., Küster M., Lischeid G., Meesenburg H., Merz C., Millat G., Müller J., Padisák J., Schimming C.G., Schubert H., Schult M., Selmečzy G., Shatwell T., Stoll S., Schwabe M., Soltwedel T., Straile D., Theuerkauf M.* Assessing resilience in long-term ecological data sets // *Ecological Indicators*. 2016. Vol. 65. P. 10–43.
 9. *Kravtchenko V.V., Golubeva E.N., Tskhai A.A., Tarhanova M.A., Krayneva M.V., Platov G.A.* The Novosibirsk reservoir hydrothermal regime model. // *Bulletin of the Novosibirsk computer center, series: Numerical Modeling in Atmosphere, Ocean, and Environment Studies*. 2019. No. 17. P. 31–49.
 10. *Леонов А.В.* Математическое моделирование трансформации соединений фосфора в пресноводных экосистемах (на примере оз. Балатон). М.: Наука, 1986. 151 с.
 11. *Эдельштейн К.К.* Водные массы долинных водохранилищ. М.: МГУ, 1991. 176 с.
 12. *Эдельштейн К.К.* Водоохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.
 13. *Вуглинский В.С.* Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 223 с.
 14. Многолетняя динамика водно-экологического режима Новосибирского водохранилища. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2014. 391 с.
 15. Экологические проблемы Верхней Волги / под ред. Крылова А.И. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2001. 427 с.
 16. *Савкин В.М., Двуреченская С.Я., Кондакова О.В.* Влияние Новосибирского водохранилища на формирование гидролого-гидрохимического режима Верхней Оби на зарегулированном участке // *Вода и экология: проблемы и решения*. 2020. № 1. С. 51–62.
 17. Вода России. Научно-популярная энциклопедия. Режим доступа: <https://water-ru.ru/> (дата обращения 17.04.2020).
 18. *Soballe D.M., Threlkeld S.T.* Advection, phytoplankton biomass, and nutrient transformations in a rapidly flushed impoundments // *Arch. Hydrobiol.* 1985. Vol. 105. P. 187–203.

19. 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.
20. Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.
21. Шашуловская Е.А., Мосияш С.А., Филимонова И.Г., Гришина Л.В., Кузина Е.Г., Шашуловская О.В. Особенности многолетней динамики гидрохимических показателей водохранилищ Нижней Волги и реки Урал (на примере Саратовского, Волгоградского, Ириклинского водохранилищ) // Водное хозяйство России. 2019. № 3. С. 72–93. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-3-4.

Для цитирования: Цхай А.А., Агейков В.Ю., Семчуков А.Н., Моделирование особенностей трансформации соединений азота и фосфора в условиях Новосибирского водохранилища // Водное хозяйство России. 2020. № 6. С. 87–102.

Сведения об авторах:

Цхай Александр Андреевич, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, ФГБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук»; профессор, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Россия, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 46; e-mail: taa1956@mail.ru

Агейков Владислав Юрьевич, канд. физ.-мат. наук, соискатель, кафедра высшей математики и математического моделирования, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Россия, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 46; e-mail: ageikov@mail.ru

Семчуков Александр Николаевич, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, ФГБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук», Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1; e-mail: ssl6011973@inbox.ru

MODELING OF TRANSFORMATION FEATURES FOR NITROGEN AND PHOSPHORUS COMPOUNDS IN THE CONDITIONS OF THE NOVOSIBIRSK RESERVOIR

Aleksandr A. Tskhai^{1,2}, Vladislav Y. Ageikov², Aleksandr N. Semchukov¹

¹*Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*

²*Polzunov Altai State Technical University*

Abstract: The article presents a model description of spatially inhomogeneous features for the ecosystem of the Novosibirsk reservoir, the largest in Western Siberia, based on the reproduction of biogeochemical cycles of limiting elements. We have formulated the model tool set for studying quantitative and qualitative changes in the state variables of water bio/geo/cenosis. To obtain an adequate picture of environmental processes occurring in various parts of the reservoir modeling of the transformation features of nitrogen and phosphorus compounds in the waters of the Novosibirsk reservoir was performed in the box approximation. Phytoplankton biomass in a relatively shallow water area significantly exceeds concentrations in the deep-water and near-dam parts of the reservoir. A detailed

dynamic picture of the variability of the content of pollutants, as well as oxygen, normalized by maximum permissible values, in the water areas of the reservoir is reproduced.

The estimates obtained during the simulation generally correspond to the observed data. This study can serve as a basis for developing a model approach to monitoring and management of ecosystem processes in the Novosibirsk reservoir.

Key words: Novosibirsk reservoir, operating mode, mathematical model, hydrology, pollutants, transformation, biogeochemical cycle.

Financing: The research has been carried out within the framework of the state assignment by Russian Academy of Sciences Siberian Branch Institute for Water and Ecological Problems with partial financial support of the Russian Foundation for Fundamental Researches and Altay Krai (project No. 18-41-220002\19).

About the authors:

Aleksandr A. Tskhai, Chief Researcher, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the RAS. Professor, Polzunov Altai State Technical University. 46, pr. Lenina, Barnaul 656038 Russian Federation, Tel.: +7(3852) 290865. E-mail: taa1956@mail.ru.

Vladislav Y. Ageikov, Applicant of the Higher Mathematics and Mathematical Modeling Chair of Polzunov Altai State Technical University, 46, pr. Lenina, Barnaul 656038 Russia. Tel.: +7(3852) 659797. E-mail: ageikov@mail.ru.

Aleksandr N. Semchukov, Researcher, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the RAS. 1, ul. Molodezhnaya, Barnaul, 656038, Russia. Tel.: +7(913) 2029020. E-mail: ss16011973@inbox.ru

For citation: Tskhai A.A., Ageikov V.Y., Semchukov A.N. *Modelling of Transformation Features for Nitrogen and Phosphorous Compounds in the conditions of the Novosibirsk Reservoir // Water Sector of Russia. 2020. No. 6. P. 87–102.*

REFERENCES

1. Podlipskiy, Y.I., Chaikovskaya, T.S. (eds.) Kompleksnye issledovaniya Novosibirskogo vodohranilishcha [Comprehensive Studies of the Novosibirsk Reservoir]. M.: Gidrometeoizdat, 1985. 134 s.
2. Tskhai A.A., Ageikov V.Y. Modelirovaniye izmeeniya urovnya ektrofirovaniya vodokhranilishcha na osnove vosproixvedeniya biogeikhimicheskikh tsiklov [Simulating Variations in Reservoir Eutrophication Level by Reproducing Biogeochemical Cycles] // Water Resources. 2020. Vol. 47. No. 1. P. 147–155.
3. Tskhai, A.A., Ageikov, V.Yu. Disturbance of sustainability of the reservoir ecosystem: a model approach for assessing and forecasting the long-term process of eutrophication // Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. 2021. Vol. 9. Iss. 1. 1080327. <https://dx.doi.org/10.13044/j.sdewes.d8.0327>.
4. Sharafutdinova G.F. Modelirovanie produktsionno-destruktsionnykh otnosheniy v ozernykh ekosistemakh [Modeling of production and destruction relations in lake ecosystems]: diss... kandidata geograficheskikh nauk. Sankt-Peterburg: RGGMU, 2013. 192 s.
5. Sapkota R.P., Stahl P.D., Rijal K. Restoration governance: an integrated approach towards sustainably restoring degraded ecosystems. // Environmental Development. 2018. Vol.27. P. 83–94.
6. Matematicheskoe modelirovanie ekosistem kontinentalnykh vodotokov i vodoemov [Mathematical modeling of ecosystems of continental watercourses and reservoirs]// Itogi nauki i tehniki. Seriya: Obshchaya ekologiya. Biostenologiya. Gidrobiologiya. Modelirovanie vodnykh ekosistem. M.: VINITI, 1980. T. 5. S. 154–228.
7. Boulion V.V., Håkanson L. A new general dynamic model to predict biomass and production of bacterioplankton in lake. // Ecological Modelling. 2003. Vol. 160. No. 1–2. P. 91–114.

8. Muller M.F., Bergmann M., Dannowski R., Dippner J.W., Gnauck A., Haase P., Jochimsen M.C., Kasprzak P., Kröncke I., Kümmerlin R., Küster M., Lischeid G., Meessenburg H., Merz C., Millat G., Müller J., Padisák J., Schimming C.G., Schubert H., Schult M., Selmečzy G., Shatwell T., Stoll S., Schwabe M., Soltwedel T., Straile D., Theuerkauf M. Assessing resilience in long-term ecological data sets // *Ecological Indicators*. 2016. Vol. 65. P. 10–43.
9. Kravtchenko V.V., Golubeva E.N., Tskhai A.A., Tarhanova M.A., Krayneva M.V., Platov G.A. The Novosibirsk reservoir hydrothermal regime model // *Bulletin of the Novosibirsk computer center, series: Numerical Modeling in Atmosphere, Ocean, and Environment Studies*. 2019. No. 17. P. 31–49.
10. Leonov A.V. Matematicheskoe modelirovanie transformatsiyi soedineniy fosfora v presnovodnykh ekosistemakh (na primere oz. Balaton). [Mathematical modeling of the transformation of phosphorus compounds in freshwater ecosystems (on the example of the Lake Balaton)]. M.: Nauka, 1986. 151 p.
11. Edelstein K.K. Vodniye massy dolinnykh vodokhranilishch. [Water masses in the valley reservoirs]. M.: MGU, 1991. 176 p.
12. Edelstein K.K. Vodokhranilishcha Rossiyi: ekologicheskie problemy, puti ikh resheniya [Russian reservoirs: environmental problems and ways of their solution]. M.: GEOS, 1998. 277 p.
13. Vuglinskiy V.S. Vodnye resursy i vodniy balans krupnykh vodokhranilishch SSSR. [Water resources and water balance of large reservoirs of the USSR]. L.: Gidrometeoizdat, 1991. 223 p.
14. Vasiliev O.F. (ed.) Mnogoletnyaya dinamika vodno-ekologicheskogo rezhima Novosibirskogo vodokhranilishcha. [Long-term dynamics of water-ecological regime of the Novosibirsk reservoir]. Novosibirsk: Izd. SO RAN, 2014. 391 p.
15. Ekologicheskie problemy Verhney Volgi [Environmental problems of the Upper Volga]: kollektivnaya monografiya pod red. Krylova A.I. Jaroslavl: Izd-vo JaGTU, 2001. 427 p.
16. Savkin V.M., Dvurechenskaya S.Y., Kondakova O.V. Vliyanie Novosibirskogo vodokhranilishcha na formirovanie gidrologo-gidrokhimicheskogo rezhima Verhney Obi na zaregulirovannom uchastke. [Influence of the Novosibirsk reservoir on the formation of the hydrological and hydro/chemical regime of the Upper Ob at a regulated reach] // *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*. 2020. № 1(81). P. 51–62.
17. Voda Rossiyi [Russian Water] Nauchno-populyarnaya enstiklopediya. Rezhim dostupa: <https://water-rf.ru/> (17.04.2020).
18. Soballe D.M., Threlkeld S.T. Advection, phytoplankton biomass, and nutrient transformations in a rapidly flushed impoundments // *Arch. Hydrobiol.* 1985. Vol. 105. P. 187–203.
19. Tskhai A.A., Ageikov V.Yu. Mathematical modeling of transformation processes for nitrogen and phosphorus compounds and oxygen regime changes in reservoirs // *Water Resources*, Vol. 24, No. 6. Pp. 664–674, 1997.
20. Datsenko Yu.S. Jevtrofirovanie vodokhranilishch. Gidrologo-gidrokhimicheskiye aspekty [Eutrophication of reservoirs. Hydrological and hydro/chemical aspects]. M.: GEOS, 2007. 252 p.
21. Shashulovskaya E.A., Mosiyash S.A., Filimonova I.G., Grishina L.V., Kuzina E.G., Shashulovskaya O.V. Osobennosti mnogoletney dinamiki gidrokhimicheskikh pokazateley vodokhranilishch Nizhney Volgi i reki Ural (na primere Saratovskogo, Volgogradskogo, Iriklinskogo vodokhranilishch) [Features of long-term dynamics of hydro/chemical indicators of reservoirs of the Lower Volga and the Ural River (on the example of Saratov, Volgograd, and Iriklinsky reservoirs)] // *Water Sector of Russia*. 2019. No. 3. P. 72–93.