

МАТЕРИАЛЫ XII МЕЖДУНАРОДНОЙ СТУДЕНЧЕСКОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
«СТУДЕНЧЕСКИЙ НАУЧНЫЙ ФОРУМ 2020»

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛЕЙ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ И ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НИХ

Седова С.А., Дмитриев В.В.

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,  
e-mail: svet.sv0627@gmail.com*

На современном этапе исследований, направленных на изучение и моделирование природных трансформаций эко- и геосистем, а также оценки состояния сложных систем в природе и обществе, важным этапом является оценка сложных (эмерджентных, интегративных) свойств водных экосистем, анализ способности экосистем сохранять интегративные свойства и параметры режимов при внешнем воздействии на них. В статье рассматриваются вопросы исследования таких интегративных свойств водной экосистемы, как трофность, качество и токсическое загрязнение воды, а также экологическое (системное) нормирование внешних воздействий на экосистему. Рассматривается методология построения композитных индексов для исследования этих интегративных свойств системы. Приводятся этапы и результаты исследования. Оценка реализовывалась на основе результатов авторской имитационной пространственно-однородной модели круговорота углерода, азота, фосфора и других химических элементов, и динамики кислорода в мелководной экосистеме (CNPXO-модель). Для этого на модели был воспроизведен годовой цикл развития «чистой» водной экосистемы (стандартный вариант модели) и экосистемы, находящейся под антропогенным воздействием. Для этого на модели реализуется запланированный вариант «воздействия». Показана возможность исследования и оценки воздействия на систему на основе построения композитных индексов по результатам имитационного моделирования.

**Ключевые слова:** композитный индекс, свертка показателей, модель-классификация, интегральная оценка, трофический статус, качество воды, имитационное моделирование, оценка воздействия

## USING COMPOSITE INDICES TO STUDY THE ADEQUACY OF AQUATIC ECOSYSTEM MODELS AND ASSESS THE IMPACT ON THEM

Sedova S.A., Dmitriev V.V.

*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, e-mail: svet.sv0627@gmail.com*

At the present stage of research aimed at studying and modeling natural transformations of ecosystems and geosystems, as well as assessing the state of complex systems in nature and society, an important stage is the assessment of complex (emergent, integrative) properties of aquatic ecosystems, analysis of the ability of ecosystems to maintain integrative properties and parameters modes under external influence on them. The article deals with the study of such integrative properties of an aquatic ecosystem as trophicity, quality and toxic pollution of water, as well as ecological (systemic) regulation of external influences on the ecosystem. A methodology for constructing composite indices for studying these integrative properties of the system is considered. The stages and results of the research are given. The assessment was carried out based on the results of the author's imitation spatially homogeneous model of the cycle of carbon, nitrogen, phosphorus and other chemical elements, and the dynamics of oxygen in a shallow-water ecosystem (CNPXO model). To do this, the model was used to reproduce the annual development cycle of a «clean» aquatic ecosystem (standard version of the model) and an ecosystem under anthropogenic impact. For this, the planned version of the «impact» is implemented on the model. The possibility of investigating and assessing the impact on the system based on the construction of composite indices based on the results of simulation modeling is shown.

**Keywords:** composite index, convolution of indicators, model-classification, integral assessment, trophic status, water quality, simulation, impact assessment

Особенность современного этапа развития методологии системного моделирования и нормирования воздействий на эко- и геосистемы, а также оценки состояния сложных систем (их статуса) в природе и обществе на основе их неаддитивных (эмерджентных) свойств, заключается в разработке моделей функционирования естественных и антропогенно-трансформированных систем при внешнем и внутреннем воздействии на них, а также сопутствующем развитии методов построения композитных индексов, характеризующих интегративные свойства систем (продуктивность, устойчивость, благополучие и др.) и их сочетание.

Зарубежный уровень исследований в настоящее время характеризуется акцентом на развитие методов анализа природных систем с использованием компьютерного моделирования; накоплением практического опыта в исследовании состояния сложных систем, а также отдельных подсистем в окружающей человека природной и антропогенно- трансформированной среде на основе индикаторного подхода [1].

Имитационное моделирование и модели интегрального оценивания на современном этапе исследований позволяют воспроизводить изменение компонентов экосистемы и удельных скоростей массооб-

мена в экосистеме на некотором временном интервале. Однако они не используются для оценки эмерджентных свойств водных экосистем и их временных изменений при внешнем воздействии на экосистему [2, 3]. При этом, стоит отметить, что результаты, получаемые при моделировании скоростей процессов массообмена между компонентами водной экосистемы, используются и для оценки экосистемных услуг (обеспечивающих, регулирующих, поддерживающих и др.), поскольку в основе таких оценок лежат оценки потоков веществ от основных природных капиталов на определенном временном интервале и, таким образом, косвенно, характеризуют интегративные свойства объектов исследования.

Развиваемая авторами статьи, а также зарубежными [4-6] и отечественными исследователями [7, 8] методология изучения сложных природных систем включает в себя 5 основных этапов: 1 – первичное измерение геокомпонентов системы и ее свойств полевыми и дистанционными методами. На 2 этапе выполняются анализ и обобщение собранной информации, на основе полученных данных разрабатываются оценочные шкалы и классификации компонентов и интегративных свойств системы (продуктивность, устойчивость, экологический статус, экологическое благополучие и др.). Этап 3 характеризуется моделированием отдельных свойств и связей в системах – создаются многофакторные зависимости, позволяющие описать совместный эффект влияния факторов среды на процессы переноса, синтеза, трансформации и транслокации вещества в модельной экосистеме; выполняются оценки интегративных (эмерджентных) свойств системы на основе построения моделей-классификаций и композитных индексов, проводятся многокомпонентные и многоуровневые свертки показателей по индексам. На этапе 4 выполняется синтез общей имитационной модели на основе моделей подсистем – осуществляется реализация модели на ПК, с последующей проверкой ее адекватности по отобранным критериям и интегративным свойствам [8]. После этого на модели проводятся тестовые эксперименты, позволяющие определить ее чувствительность к заданию параметров в функциях, описывающих скорости переноса и массообмена компонентами, что в дальнейшем позволяет исследователю проводить эксперименты в рамках экологического нормирования воздействия на водную экосистему [8-10]. На последнем этапе реализуется оптимизация модели. Проводятся эксперименты по оценке воздействия на экосистему, ис-

следуются ее интегративные свойства, рассчитываются нормы допустимого/недопустимого воздействия на систему и др. [8].

Целью работы является реализация интегральной оценки трофического статуса, качества воды и нормы воздействия на водную экосистему на основе результатов имитационного моделирования и построения композитных индексов.

Для оценки адекватности выбранной имитационной модели, учитывающей влияние факторов среды на скорости массообмена в экосистеме (СНРХО-модель) [10], и определения нормы воздействия на систему предлагается использовать серию композитных индексов, агрегирующих интегративные (эмерджентные) свойств водной экосистемы. При этом решаются две задачи: 1 – доказываемость, что результаты моделирования и оценка эмерджентного свойства на основе композитного индекса дают возможность (или не позволяют) отнести исследованную систему к одному классу (трофности, благополучия, экологического статуса и др.); 2 – проводится оценка нормы состояния системы и допустимого воздействия на систему по совокупности оцениваемых критериев на основе композитных индексов.

#### *Теоретико-методологические основы исследования*

Имитационные модели, отражающие естественную территориальную и хронологическую дифференциацию природных комплексов, в настоящее время представляют наибольший интерес для географических и геоэкологических исследований. Интегральная оценка трофности экосистемы, качества и токсического загрязнения воды в водоеме, оценка нормы воздействия на водную экосистему выполнялись на основе пространственно-однородной (точечной) модели круговорота углерода (С), азота (N), фосфора (P) и других элементов (X), и динамики кислорода (O<sub>2</sub>) в мелководной экосистеме (СНРХО-модель) [10]. Полученные на модели решения позволили исследовать влияние факторов среды и биоты на изменение удельных скоростей массообмена в экосистеме; оценить скрытые от наблюдений составляющие баланса скоростей.

Модель водной экосистемы записывается в виде системы уравнений баланса скоростей массообмена между компонентами водной экосистемы [10]:

$$1) \frac{dF}{dt} = B_F - G_{FZ} - S_F - R_F \pm Q_F;$$

$$2) \frac{dZ}{dt} = A_Z - S_Z - R_Z \pm Q_Z;$$

- 3)  $\frac{dB}{dt} = B_D - G_{BZ} - S_B - R_B \pm Q_B;$
- 4)  $\frac{dD}{dt} = S_{FD} + S_{ZD} + S_{BD} + O_{ZD} + \Phi_{ZD} - G_{ZD} - D_{DB} \pm Q_D;$
- 5)  $\frac{dC}{dt} = \Gamma_{BC} + \mathcal{E}_{FC} + \mathcal{E}_{ZC} + \mathcal{E}_{BC} + O_{ZC} - M_C \pm Q_C;$
- 6)  $\frac{dN}{dt} = \Gamma_{BN} + \mathcal{E}_{FN} + \mathcal{E}_{ZN} + \mathcal{E}_{BN} + O_{ZN} - M_N \pm Q_N;$
- 7)  $\frac{dP}{dt} = \Gamma_{BP} + \mathcal{E}_{FP} + \mathcal{E}_{ZP} + \mathcal{E}_{BP} + O_{ZP} - M_P \pm Q_P;$
- 8)  $\frac{dX}{dt} = \Gamma_{BX} + \mathcal{E}_{FX} + \mathcal{E}_{ZX} + \mathcal{E}_{BX} + O_{ZX} - M_X \pm Q_X;$
- 9)  $\frac{dNH_4}{dt} = M_N + \mathcal{E}_{ZNH_4} - B_{FNH_4} - M_{NH_4} \pm Q_{NH_4};$
- 10)  $\frac{dNO_2}{dt} = M_{NH_4} - B_{FNO_2} - M_{NO_2} \pm Q_{NO_2};$
- 11)  $\frac{dNO_3}{dt} = M_{NO_2} - B_{FNO_3} \pm Q_{NO_3};$
- 12)  $\frac{dPO_4}{dt} = M_P + \mathcal{E}_{ZPO_4} - B_{FPO_4} \pm Q_{PO_4};$
- 13)  $\frac{dCO_2}{dt} = A_{Q_{CO_2}} + T_{FCO_2} + T_{BCO_2} + T_{ZCO_2} + M_C - B_{FCO_2} \pm Q_{CO_2};$
- 14)  $\frac{dO_2}{dt} = A_{Q_{O_2}} + B_{FO_2} - T_{FO_2} - T_{BO_2} - T_{ZO_2} - M_{O_2} \pm Q_{O_2},$

где  $B_F$  – скорость первичного биосинтеза фитопланктона;  $G_{FZ}, G_{BZ}, G_{DZ}$  – скорости выедания,  $B, D$  зоопланктоном;  $S_F, S_Z, S_B$  – скорости естественного отмирания  $F, Z, B$ ;  $R_F, R_Z, R_B$  – скорости трат на обмен  $F, Z, B$ ;  $A_F, A_B, A_D$  – скорости ассимиляции пищи зоопланктоном;  $B_D$  – скорость внеклеточного бактериального гидролиза детрита бактериями (валовая бактериальная продукция органического вещества);  $D_D$  – скорость деградации детрита ( $D$ ) бактериями;  $\Gamma_{BC}, \Gamma_{BN}, \Gamma_{BP}, \Gamma_{BX}$  – скорости поступления в среду  $C, N, P, X$  в процессе внеклеточного бактериального гидролиза,  $\Phi_{ZD}$  – скорость поступления в детрит неусвоенной пищи (фекалий) при питании зоопланктона;  $O_{ZD}$  – скорость поступления в среду  $D$  в процессе питания зоопланктона («твердые отбросы пищи»);  $O_{ZC}, O_{ZN}, O_{ZP}, O_{ZX}$  – скорости поступления в среду компонентов РОВ:  $C, N, P, X$  в процессе питания зоопланктона («жидкие отбросы пищи» или псевдофекалии);  $\mathcal{E}_{BC}, \mathcal{E}_{BN}, \mathcal{E}_{BP}, \mathcal{E}_{BX}, \mathcal{E}_{FC}, \mathcal{E}_{FN}, \mathcal{E}_{FP}, \mathcal{E}_{FX}, \mathcal{E}_{ZC}, \mathcal{E}_{ZN}, \mathcal{E}_{ZP}, \mathcal{E}_{ZX}$  – ско-

рости поступления в среду  $C, N, P, X$  с тратами на обмен  $F, Z$  и  $B$ ;  $\mathcal{E}_{ZNH_4}, \mathcal{E}_{ZPO_4}$  – скорости поступления в среду  $NH_4$  и  $PO_4$  с экскретируемыми метаболитами  $Z$ ;  $M_C, M_N, M_P$  – скорости минерализации растворенных органических  $C, N, P$ ;  $M_{NH_4}, M_{NO_2}$  – скорости нитрификации I и II ступени;  $B_{FNH_4}, B_{FNO_2}, B_{FNO_3}, B_{FPO_4}, B_{FCO_2}, B_{FX}$  – скорости изъятия из воды  $NH_4, NO_2, NO_3, PO_4, CO_2, X$  в процессе биосинтеза водорослей;  $B_{FO_2}$  – скорость поступления в воду кислорода в процессе биосинтеза  $F$ ;  $T_{FCO_2}, T_{BCO_2}, T_{ZCO_2}$  – скорости выделения в воду  $CO_2$  в процессе дыхания  $F, Z, B$ ;  $T_{FO_2}, T_{BO_2}, T_{ZO_2}$  – скорости изъятия из воды кислорода в процессе дыхания  $F, B, Z$ ;  $A_{Q_{CO_2}}, A_{Q_{O_2}}$  – скорости газообмена  $CO_2$  и  $O_2$  через поверхность раздела «вода – воздух». В каждом уравнении присутствуют скорости  $Q_i$ , описывающие внешнее поступление (изъятие) компонентов в системе на шаге по времени.

Материалы и методы исследования

Примеры внутригодичного изменения компонентов водной экосистемы на основе CNPХО-модели приведены на рис. 1. и рис. 2. Именно эти результаты имитационного моделирования использовались авторами для: 1 – определения по результатам моделирования интегративных свойств водной экосистемы, чтобы ответить на вопрос, какую трофность и какое качество воды формирует сочетание климатических условий, условий среды (и биоты) для каждого месяца и сезона года (или вегетационного

периода в целом); 2 – системного (экологического, экосистемного) нормирования воздействий и количественного отражения эффекта внешнего воздействия на водную экосистему.

Для определения интегративных свойств водной экосистемы на модели был воспроизведен внутригодичной цикл развития водной экосистемы, выбраны из перечня компонентного состава и других параметров модели репрезентативные параметры для оценки трофности (трофического статуса), качества и токсического загрязнения воды.

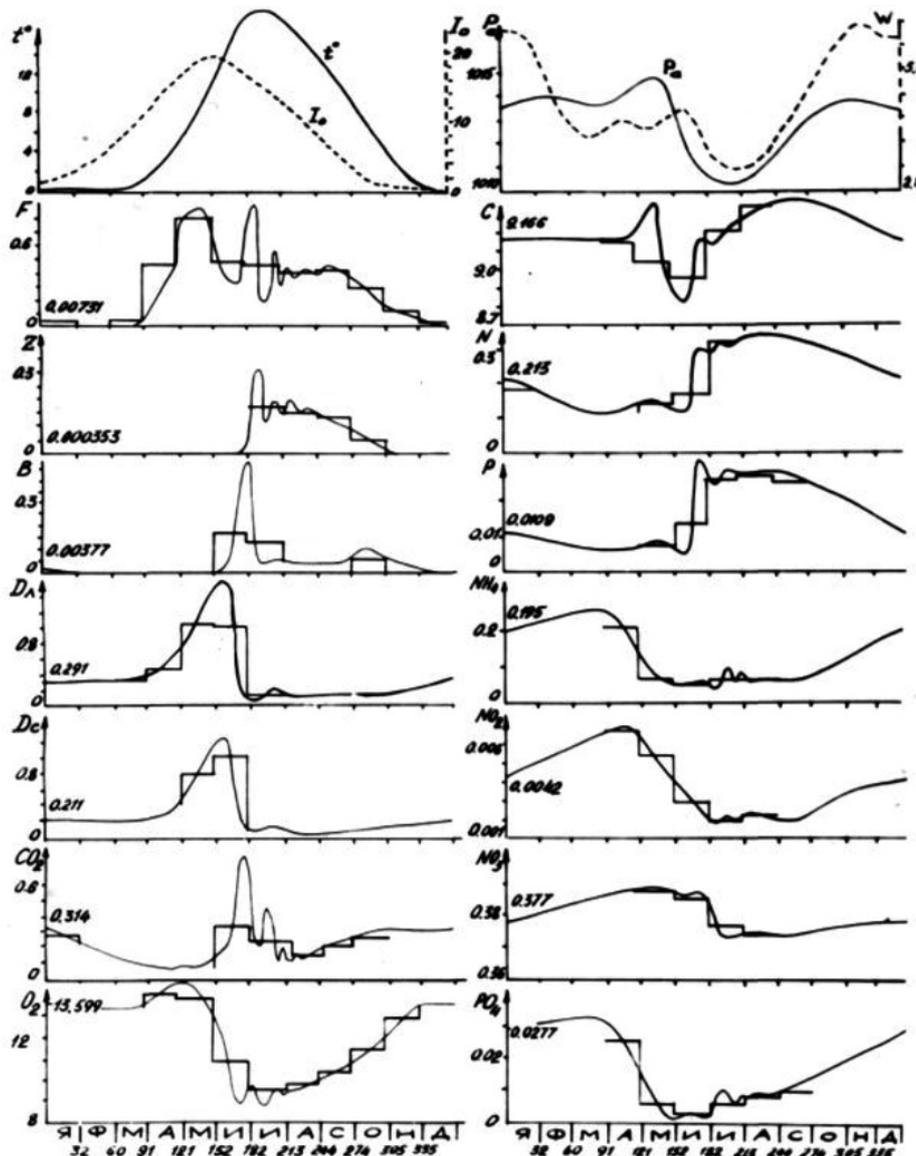


Рис. 1. Реализация климатического варианта точечной CNPХО-модели («КЧ»). Горизонтальными линиями на графиках подписаны средние значения компонентов по месяцам года. Цифрами подписаны начальные условия для компонентов

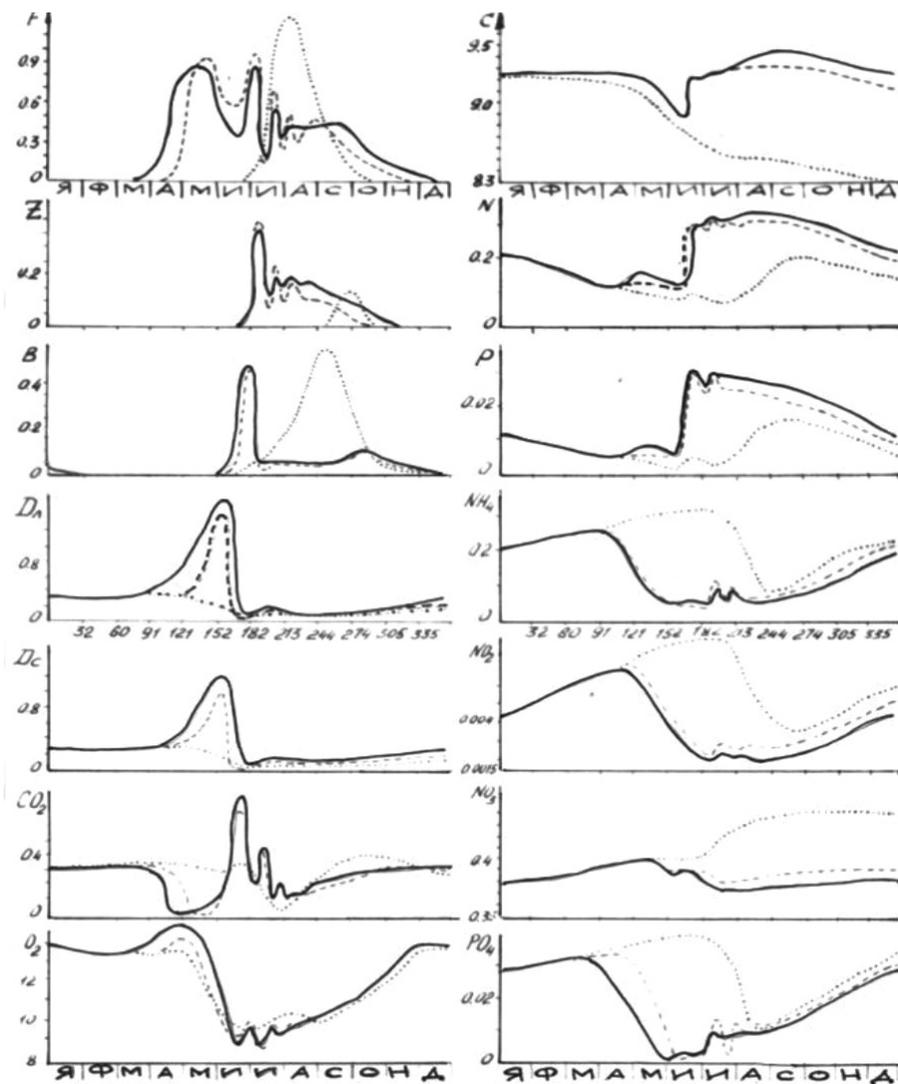


Рис. 2. Влияние мутности воды на внутригодичное изменение компонентов в водной экосистеме на фоне варианта «КЧ». Вариант КЧ, сплошная линия –  $M = 2$  мг/л; пунктир –  $M = 6$  мг/л; точки –  $M = 40$  мг/л ежемесячно в течение года

Для исследования системного нормирования возможных воздействий на экосистему на модели был воспроизведен внутригодовой цикл развития: «чистой» водной экосистемы (климатический или стандартный вариант модели, обозначим его «КЧ») и экосистемы, находящейся под антропогенным воздействием (климатический с воздействием – «КВ»). При этом на модели нами реализован некоторый запланированный вариант «воздействия», а именно – повышение фона мутности воды с 2 мг/л до 40 мг/л. При построении композитных индексов для «чистого» варианта и варианта с воздействием использовались одни и те же веса выбранных для свертки показателей. В этом случае важно было оценить,

изменяется ли трофический статус (трофность) и качество воды на временном интервале исследования, и, в случае, если система перейдет в другой класс, сделать выводы по допустимости/недопустимости воздействия или о влиянии воздействия на водную экосистему. Допустимым воздействием при этом считалось смещение экосистемы внутри класса, без выхода за его границы. Если же воздействие приводит к выходу системы по величине интегрального показателя за пределы класса, в котором она находилась до воздействия, то такое воздействие должно быть охарактеризовано как недопустимое. На основе этого мы можем также оценить устойчивость экосистемы к оказанному воздействию: 1 – изменит ли

система свои свойства и параметры режимов и перейдет ли (частично, полностью) в другой класс (трофности, качества и др.); 2 – сможет ли система вернуться к прежним свойствам и параметрам режимов после устранения оказанного воздействия на интервале моделирования.

При оценке трофности экосистемы считалось, что показательной будет оценка за вегетационный период, при этом дополнительно сравнивались значения продуктивности (трофности) системы по месяцам внутри вегетационного периода и за год в целом. Это позволяет установить, когда (в какие временные интервалы) система перейдет (если перейдет) в более продуктивный класс, или оценить изменение интегрального показателя трофности (ИПТ) внутри вегетационного периода (сместится к левой или правой границе класса, не выходя за его пределы, или выйдет за пределы класса в отдельные месяцы).

Начальные условия при моделировании уточнялись на основе 3-х летнего непрерывного решения задачи без дополнительного поступления/изъятия компонентов так, чтобы в начале следующего года задавались значения компонентов, полученные в конце предыдущего года. Так продолжалось до тех пор, пока разница между концентрациями компонентов в начале и в конце года не совпадала (с точностью 5%). Поэтому начальные условия на рис. 1 подписаны с данной точностью.

**Результаты исследования и их обсуждения**

В результате осреднения оценочных шкал разных авторов, рассмотренного в [7] и др. публикациях, нами были получе-

ны шкалы последнего уровня свертки для дальнейшей интегральной оценки трофности, качества и токсического загрязнения экосистемы, которые представлены в табл. 1 и табл. 2.

Затем, в результате проведенной оценки интегративных свойств системы – трофности и качества воды, были получены таблицы (табл. 3 и табл. 4) для двух вариантов расчета – «чистого» варианта «КЧ» и варианта с воздействием «КВ» (увеличение мутности с 2 мг/л до 40 мг/л).

Было получено, что в естественных условиях («КЧ» – вариант модели) вода в водоеме относится к «чистой» (II класс). Данный класс отмечается во все месяцы, кроме мая: в переходный сезон от весны к лету воды относились к I классу («очень чистые»), ближе к правой границе качества воды. Сезонная изменчивость качества воды не выявлена – в каждый сезон воды относились ко II классу («чистые»). Однако, можно отметить смещение ИПК внутри класса: весна и лето – ближе к левой границе класса, осень и зима – ближе к правой границе класса.

Полученные результаты расчета эксперимента с воздействием позволяют сделать вывод о том, что воздействие на систему привело к изменению класса качества воды в отдельные месяцы года. Так, качество воды в мае изменилось с «очень чистых» (I класс) на «чистые» (II класс); в июне с «чистых» (II класс) на «умеренно-загрязненные» (III класс), т.е. качество перешло в более старший класс. По сезонам года вода, по-прежнему характеризуется II классом, при этом выявлено смещение значений интегрального показателя (ИПК) в сторону правой границы класса.

**Таблица 1**

Итоговая шкала интегрального показателя качества и токсического загрязнения воды.

Показатель	Классы качества воды и токсического загрязнения					
	Очень чистые	Чистые	Умеренно загряз.	Загрязнен.	Грязные	Очень грязные
	I	II	III	IV	V	VI
Интегральный показатель качества и токс. загрязнения воды (ИПК)	1-0,960	0,960-0,917	0,917-0,849	0,849-0,668	0,668-0,264	0,294-0

**Таблица 2**

Итоговая шкала интегрального показателя трофического статуса

	Классы трофического статуса (трофности)			
	Олиготрофный I	Мезотрофный II	Эвтрофный III	Гипертрофный IV
Интегральный показатель трофического статуса водоема (ИПТ)	1-0,794	0,794-0,468	0,468-0,185	0,185-0

Таблица 3

Сравнение интегральных показателей качества воды и токсического загрязнения для «КЧ» и «КВ» вариантов

Месяц	Янв.	Фев.	Мар.	Апр.	Май	Июн.	Июл.	Авг.	Сен.	Окт.	Ноя.	Дек.
«КЧ» вариант ИПК месяц	<u>0,922</u> II (п)	<u>0,921</u> II (п)	<u>0,919</u> II (п)	<u>0,938</u> II (п)	<u>0,971</u> I (п)	<u>0,937</u> II (п)	<u>0,939</u> II	<u>0,940</u> II (л)	<u>0,936</u> II (п)	<u>0,925</u> II (п)	<u>0,925</u> II (п)	<u>0,919</u> II (п)
ИПК сезон	<u>0,921</u> II (п)		<u>0,942</u> II (л)			<u>0,939</u> II (л)		<u>0,929</u> II (п)				
«КВ» вариант ИПК месяц	<u>0,922</u> II (п)	<u>0,921</u> II (п)	<u>0,935</u> II (п)	<u>0,937</u> II (п)	<u>0,922</u> II (п)	<u>0,917</u> III – II	<u>0,933</u> II (п)	<u>0,950</u> II (п)	<u>0,932</u> II (п)	<u>0,926</u> II (п)	<u>0,920</u> II (п)	<u>0,918</u> II (п)
ИПК сезон	<u>0,920</u> II (п)		<u>0,931</u> II (п)			<u>0,933</u> II (п)		<u>0,926</u> II (п)				

Примечание: I, II, III – классы качества; буквами «л», «с», «п» обозначена близость результата к левой, правой границам класса или к его середине.

Таблица 4

Сравнение интегральных показателей трофности для «КЧ» и «КВ» вариантов

Месяц	Янв.	Фев.	Мар.	Апр.	Май	Июн.	Июл.	Авг.	Сен.	Окт.	Ноя.	Дек.
«КЧ» вариант ИПТ месяц	<u>0,453</u> III (л)	<u>0,454</u> III (л)	<u>0,453</u> III (л)	<u>0,482</u> II (п)	<u>0,548</u> II (п)	<u>0,616</u> II (л)	<u>0,492</u> II (п)	<u>0,429</u> III (л)	<u>0,403</u> III (л)	<u>0,425</u> III (л)	<u>0,447</u> III (л)	<u>0,441</u> III (л)
ИПТ сезон	<u>0,449</u> III (л)		<u>0,494</u> II (п)			<u>0,512</u> II (п)		<u>0,425</u> III (л)				
ИПТ вегет. период						<u>0,486</u> II (п)						
«КВ» вариант ИПТ месяц	<u>0,452</u> III (л)	<u>0,453</u> III (л)	<u>0,485</u> II (п)	<u>0,449</u> III (л)	<u>0,566</u> II (п)	<u>0,549</u> II (п)	<u>0,367</u> III (л)	<u>0,353</u> III (л)	<u>0,470</u> II (п)	<u>0,612</u> II (л)	<u>0,451</u> III (л)	<u>0,438</u> III (л)
ИПТ сезон	<u>0,448</u> III (л)		<u>0,500</u> II (п)			<u>0,423</u> III (л)		<u>0,511</u> II (п)				
ИПТ вегет. период						<u>0,483</u> II (п)						

Примечание: I, II, III – классы качества; буквами «л», «с», «п» обозначена близость результата к левой, правой границам класса или к его середине.

Трофность системы в «чистом» варианте, остается постоянной в течение года – III класс (эвтрофный водоем), ближе к левой границе, за исключением переходного весенне-летнего периода (апрель – июль), когда по величине ИПТ получен II класс (мезотрофный), ближе к правой границе. Отмечается сезонная изменчивость продуктивности: весна – лето – II класс (мезотрофный), ближе к правой границе: осень – зима – III класс (эвтрофный), ближе к левой границе. В целом за вегетационный период (март-октябрь) водоем относится ко II классу (мезотрофный) (ИПТ = 0,486).

В случае оказываемого на систему воздействия получено, что продуктивность заметно изменяется по месяцам и сезонам года, но при этом интегральный показатель за вегетационный период остался практически неизменным: 0,486-0,483 – II класс – мезотрофный, ближе к правой границе. Стоит отметить, что в летний сезон продуктивность растет, ИПТ перешел из II класса (мезотрофный) в III класс (эвтрофный), в тоже время в осенний период система вернулась из эвтрофного в мезотрофный класс.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что при увеличе-

нии мутности воды в водоеме (до 40 мг/л) поведение компонентов претерпевает значительные изменения. Отмечается переход водоема в эвтрофный класс в летний период по сравнению с «чистым» экспериментом. Качество воды остается во II классе, однако смещается ближе к его правой границе. Результатом увеличения мутности стало увеличение содержания биогенных веществ и, предположительно, сохранение нагрузки приведет далее к ухудшению качества воды и возможному переходу водоема в более старший класс качества, а также к полному переходу экосистемы в более продуктивный эвтрофный класс.

Для выявления способности системы сохранять свои свойства и параметры режимов в условиях действующих на него внешних и внутренних нагрузок необходимо дополнительно оценить устойчивость данной экосистемы, которая включает в себя учёт большего количества параметров. Так, при сохранении параметров естественного режима и масштабов воздействия на экосистему большим изменениям будут подвержены низкоустойчивые водоемы. Высокоустойчивые водные объекты, скорее всего, сохранят свои свойства при сохранении темпов оказанного воздействия.

### Заключение

Рассмотрены важные аспекты исследования сложных природных систем с применением методов имитационного моделирования на примере пространственно-однородной (точечной) модели круговорота углерода, азота, фосфора и других элементов, и динамики кислорода в мелководной экосистеме (СНРХО-модель), и методологии построения композитных индексов для исследования интегративных свойств системы – трофности, качества и токсического загрязнения вод на основе разработанных, и/или существующих оценочных шкал и классификаций. Показана возможность исследования и оценки допустимого/недопустимого воздействия на систему. Для этого были рассмотрены 2 эксперимента, реализованные с помощью СНРХО-модели: 1 – «КЧ»-вариант (климатический или стандартный вариант модели), цикл развития «чистой» водной экосистемы; 2 – «КВ»-вариант (климатический с воздействием), цикл развития экосистемы, находящейся под антропогенным воздействием (увеличением мутности воды с 2 мг/л до 40 мг/л).

Получено, что при оказываемом на систему воздействии – по мере увеличения фона мутности – поведение компонентов и интегративных свойств системы (трофности и качества воды) претерпевает значительные изменения и оказывает негативное влияние на водную экосистему. Отмечается переход системы из одного класса в другой в летний период по сравнению с «чистым» экспериментом при исследовании трофности. Качество воды остается в том же классе, но смещается ближе к правой границе класса в направлении ухудшения.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-00683 А.*

### Список литературы

1. Jorgensen S.E., Chon T.S., Recknagel F. Handbook of Ecological Modelling and Informatics. Southampton (United Kingdom) and Boston (Massachusetts): WIT Press, 2009. 431 p.
2. Сергеев Ю.Н., Сулин Лю. Модели водных экосистем. Имитация антропогенного эвтрофирования водоемов. СПб.: Изд. «ГеоГраф», 2005. 320 с.
3. Меншуткин В.В. Искусство моделирования (экология, физиология, эволюция). Петрозаводск – Санкт-Петербург, 2010. 416 с.
4. Delphine Brousmichea, Florent Occellia, Michaël Geninb, Damien Cunya, Annabelle Derama, Caroline Lanier Spatialized composite indices to evaluate environmental health inequalities: Meeting the challenge of selecting relevant variables. Ecological Indicators. 2020. № 111. P. 16. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.106023.
5. Eugenio, Molina-Navarro, Pedro, Segurado, Paulo, Branco, Carina, Almeida, Hans E., Andersen. Predicting the ecological status of rivers and streams under different climatic and socioeconomic scenarios using Bayesian Belief Networks. Limnologia. 2020. P. 32. DOI: 10.1016/j.limno.2019.125742.
6. Lausch A., Blaschke T., Haase D., Herzog F., Syrbe R.-U., Tischendorf L., Walz U. Understanding and quantifying landscape structure – A review on relevant process characteristics, data models and landscape metrics. Ecological Modelling Volume, 2015. № 295. P. 31-41. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2014.08.018.
7. Александрова Л.В., Васильев В.Ю., Дмитриев В.В., Мякишева, Н.В., Огурцов, А.Н., Третьяков В.Ю., Хованов Н.В. Многокритериальные географо-экологические оценки состояния и устойчивости природных и урбанизированных систем. ВИНТИ, 2000. <https://clck.ru/G5sC2> (дата обращения: 17.05.2019).
8. Tretyakov V.Yu., Dmitriev V.V., Sergeev Yu.N., Kulesh V.P. Computer simulation of within-year cycle of an aquatic ecosystem life. International Scientific Conference «Mathematical modeling processes and systems» Borovets, Bulgaria, 2017. P. 147-151.
9. Меншуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н. Моделирование экосистем пресноводных озёр (обзор) 2. Модели экосистем пресноводных озёр // Водные ресурсы. 2014. № 1. С. 24-38.
10. Дмитриев В.В. Диагностика и моделирование водных экосистем. СПб.: Изд. СПбГУ, 1995. 215 с.