

## Методология выбора параметров водных объектов для интегральной оценки их экологического статуса на основании имитационного моделирования

Третьяков В.Ю.<sup>1,2</sup>, Дмитриев В.В.<sup>1</sup>, Клубов С.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> – Российский Государственный Гидрометеорологический университет,  
Санкт-Петербург, Россия  
v\_yu\_tretyakov@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается методология применения компьютерного имитационного моделирования функционирования водных экологических систем для выбора их параметров, наиболее информативных для интегральной оценки экологического статуса экосистем.

**Ключевые слова:** параметры интегральной оценки экосистем, имитационное моделирование

Современный глобальный экологический кризис вызван главным образом отравлением биосферы Земли антропогенными загрязняющими веществами. Прогноз поведения экосистем и поиск их самых слабых элементов невозможны без применения компьютерного имитационного моделирования. Имитационные модели функционирования водных экологических систем отражают современный уровень знаний целого комплекса естественных наук [1, 2]. Все загрязняющие вещества антропогенного происхождения подразделяются на вещества индивидуально-токсического и тотально-экологического воздействия. Первые имеют свойства накопления в организмах гидробионтов, они непосредственно воздействуют на их физиологические процессы и вызывают отравление организмов. Вторые не опасны для отдельных организмов гидробионтов в концентрациях, при которых они встречаются в водных объектах, но их антропогенное поступление приводит к кардинальной перестройке биогеохимических циклов в водных экосистемах, смене доминантов и самих экосистем. Примером подобного процесса является антропогенное эвтрофирование, вызываемое поступлением в водные объекты веществ, содержащих азот и фосфор. Другой пример — поступление легкоокисляющихся органических веществ антропогенного происхождения, вызывающее падение содержания растворённого в воде кислорода. Обычно два эти процесса происходят одновременно: естественно, что органические вещества содержат азот и фосфор. Естественное эвтрофирование экосистем водоёмов является природным процессом их эволюции, вызываемым поступлением азота и фосфора с водосборов, их частичным накоплением в донных осадках и сокращением средней глубины водоёмов из-за накопления донных осадков. Этот процесс из-за антропогенных воздействий приобретает специфические черты и превращается в антропогенное эвтрофирование [3].

Оценка экологического статуса водного объекта необходима для оценки «расстояния», на которое подвергающаяся антропогенному воздействию экосистема «отошла» в многомерном пространстве своих параметров от своего естественного состояния. Если антропогенное воздействие продолжается в течение продолжительного периода времени, что характерно для большинства экосистем с высокой плотностью населения, урбанизацией, сельскохозяйственной освоённостью и развитием промышленности, то это «расстояние» необходимо измерять между современным реальным положением экосистемы и её современным теоретическим положением в результате естественной эволюции при отсутствии антропогенных воздействий. Это возможно только на основании результатов имитационного моделирования экосистемы. Разумеется, любая имитационная модель по своей структуре и имитируемым процессам на много порядков проще своего природного прототипа. Однако она обладает свойствами сложности и эмергентности, из-за которых свойства системы в целом не сводятся к простым суммам свойств отдельных её частей. Имитационная модель позволяет изучать сложные взаимодействия различных факторов при имитации антропогенных воздействий подобно тому, как простые модели популяционной динамики «хищник-жертва» и конкуренции двух и более видов за ограниченный ресурс позволили

прояснить многие аспекты экологии популяций. Суммарное воздействие на экосистему различных антропогенных факторов носит сложный характер. Так, совместное поступление в экосистему биогенных элементов (азота и фосфора), и токсикантов может привести к замедлению и даже остановке процесса антропогенного эвтрофирования из-за подавления токсикантами первичной продукции фитопланктона. При совместном поступлении различных токсикантов возможны следующие формы их воздействий на гидробионты: аддитивное действие, антагонизм, синергизм, и сенсбилизация. Оценка состояния водных экосистем с помощью показателя УКИЗВ не учитывает особенности воздействия на них ни совместного поступления биогенных элементов, органики и токсикантов, ни совместного поступления различных токсикантов. Эти эффекты могут быть изучены и учтены только с помощью имитационного моделирования. Необходимо отметить широкое использование имитационных моделей при исследованиях функционирования экосистем водоёмов и морских акваторий [4].

Имитационные модели должны также привлекаться для решения двух взаимосвязанных задач: определения параметров водных экосистем, необходимых и достаточных для оценки их экологического статуса; определения параметров окружающей среды, наиболее информативных и достаточных для оценки экологического статуса водных объектов, и при этом подходящих в качестве показателей, определяемых при мониторинге. Предлагается следующий подход: при многокритериальной оценке экологического статуса экосистемы значение 1 интегрального показателя означает её ненарушенное природное состояние, а 0 — катаценоз, полное разрушение исходной экосистемы. Проведение численных экспериментов на имитационных моделях позволяет ранжировать параметры по степени их важности для оценки экологического статуса водных экосистем. При этом многие параметры функционирования экосистемы доступны для определения только на моделях, а в реальности их определение крайне затруднительно. Поэтому следующий этап исследования модели: определение параметров экосистемы, наиболее информативных для определения её экологического статуса и при этом приемлемых для мониторинга природного объекта. Затем на модели определяется необходимая и достаточная частота мониторинга в течение года с учётом различных сценариев поступления в экосистему биогенных элементов, органики и токсикантов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-05-00683-А «Теоретико-методологическое обоснование, математический аппарат и модели интегральной оценки экологического статуса и экологического благополучия водных объектов».

#### Литература

1. Меншуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н. Моделирование экосистем пресноводных озёр (обзор) 2. Модели экосистем пресноводных озёр // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 1. С. 32-45. [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_20915592\\_14987466.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_20915592_14987466.pdf)
2. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Математическое моделирование как основа планирования рационального использования водных ресурсов // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2017. № 48. С. 85-93. [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_30744921\\_42100350.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_30744921_42100350.pdf)
3. Фруммин Г.Т., Пашукова Ю.В. Динамика поступления биогенных элементов в Псковское озеро со стоком реки Великая // Экологическая химия. 2018. Т. 27. № 2. С. 86-91.
4. Владимирова О.М., Еремина Т.Р., Исаев А.В., Рябченко В.А., Савчук О.П. Модельные оценки составляющих баланса азота и фосфора в экосистеме Финского залива // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2018. № 53. С. 72-82. [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_36928471\\_57467477.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36928471_57467477.pdf)

## **Methodology of aquatic objects parameters selection for integral assessment of the objects ecological status on the base of computer simulation**

**Tretyakov V.Yu.<sup>1,2</sup>, Dmitriev V.V.<sup>1</sup>, Klubov S.M.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> – *Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

<sup>2</sup> – *Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia*

*v\_yu\_tretyakov@mail.ru*

Abstract. There are considered methodology of computer simulation of aquatic ecosystems functioning application for selection of the ecosystems parameters, which are the most informative ones for the ecological status assessment.

Key words: parameters of ecosystems integral assessment, computer simulation