

Системное нормирование воздействий на водный объект: экологический статус водоема и его изменение при естественном и антропогенном воздействии

В.В. Дмитриев¹, В.Ю. Третьяков^{1,2}, Е.А. Примак², С.А. Седова¹, Е.А. Васькова³,
Е.С. Дудоркин¹, Н.А. Панютин¹, Э.В. Акулич¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

²Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Россия

³Акционерное общество Группа компаний Шанэко Москва, Россия

Аннотация. Рассматриваются теоретико-методологические положения, метод и примеры интегральной оценки экологического статуса водоемов. Под экологическим статусом (ЭС) понимается эмерджентное (интегративное) свойство водного объекта, характеризующее сочетание его способностей: 1 - продуцировать органическое вещество (продукционный потенциал, трофность, трофический статус); 2 – изменять химический и биологический состав, качество и токсическое загрязнение воды; 3 – сохранять потенциальную устойчивость (устойчивость к изменению физико-географических параметров, климатических особенностей, гидрологического режима). В качестве методов интегральной оценки использовались: метод сводных показателей (композитных индексов) и метод рандомизированных сводных показателей (с использованием системы поддержки принятия решений "АСПИД-3W" - многокритериальная оценка вероятностей на основе экспертных нечисловых, неточных и неполных знаний). На основе формулировки и проверки ряда гипотез рассматривается совершенствование технологии построения интегральных показателей экологического статуса (ИПЭС). Формулируется представление о «норме воздействия» на водную экосистему. Предложена методика оценки нормы воздействия и/или проверки допустимости воздействия на основе сравнения ИПЭС до и после воздействия. ИПЭС после воздействия рассчитываются в примерах на основе гипотетических сценариев или по результатам имитационного моделирования водных экосистем. Рассмотрены этапы оценки воздействия на водную экосистему на основе сочетания методов имитационного моделирования и метода сводных показателей.

Ключевые слова: экологический статус, экологическое благополучие, интегральная оценка, системное нормирование.

System regulation of impacts on a water body: the ecological status of a reservoir and its change under natural and anthropogenic impacts

V.V. Dmitriev¹, V.Yu.Tretyakov^{1,2}, E.A. Primak², S.A. Sedova¹, E.A. Vaskova³, E.S.
Dudorkin¹, N.A. Panyutin¹, E.W. Akulich¹

¹St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

²Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

³Joint Stock Company Shaneco Group of Companies Moscow, Russia

*v.dmitriev@spbul.ru

Abstract. Theoretical and methodological provisions, method and examples of the integral assessment of the ecological status of water bodies are considered. Under the ecological status (ES), we mean the emergent (integrative) property of a water body, which characterizes the combination of its abilities: 1 - to produce organic matter (productive potential, trophic status); 2 - change the chemical and biological composition, quality and toxic pollution of water; 3 - maintain potential stability (resistance to changes in physical and geographical parameters, climatic features, and hydrological regime). The following methods of integral assessment were used: the method of summary indicators (composite indices) and the method of randomized summary indicators (using the decision support system "ASPID-3W" – multicriteria estimation of probabilities on basis of expert non-numeric, non-exact and non-complete knowledge). Based on the formulation and testing of a number of hypotheses, the improvement of the technology for constructing integral indicators of ecological status (IIES) is considered. The concept of the "norm of impact" on the aquatic ecosystem is formulated. A technique for assessing the exposure rate and/or testing the acceptability of exposure based on a comparison of IIES before and after exposure is proposed. Post-impact IIES are calculated in the examples based on hypothetical scenarios or from simulations of aquatic ecosystems. The stages of assessing the impact on the aquatic ecosystem based on a combination of simulation modeling methods and the method of composite indices are considered.

Keywords: ecological status, ecological well-being, integrated assessment, system rationing.

Введение

Актуальность проблемы обусловлена выполнением Распоряжения Правительства РФ от 27.08.2009 N 1235-р (ред. от 17.04.2012) "Об утверждении "Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года" [1], разработкой "Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642" [2]; систематизацией знаний, практик разработки, экспертизы и реализации проектов, связанных с преобразованием и управлением водными объектами в связи с развитием цифровизации в науках о Земле, природе, обществе. Решение подобной проблемы в странах ЕС с начала 2000-х гг. сопряжено с принятием, доработкой и адаптацией Европейской Рамочной Водной Директивы или Директивы Европейского парламента и Совета по установлению рамок действий Сообщества в области водной политики (Directive of the European Parliament and of the Council on setting the framework for Community action in the field of water policy) [3]. Основная цель Директивы в ЕС представляется, как достижение экологического благополучия или высокого экологического статуса для всех водных систем. Эта задача реализуется в виде разработки интегрированного подхода к решению проблемы оценки современного и перспективного состояния водных объектов (речных бассейнов), выделения экорегионов в странах ЕС.

Целью работы является разработка теории, методологии, математического аппарата и моделей интегральной оценки экологического статуса и экологического благополучия водных объектов для оценки их современного и перспективного состояния, выделения экорегионов и степени антропогенной трансформации водных объектов и их экосистем. Методология исследований базируется на авторском подходе к исследованию сложных систем в природе и обществе, их эмерджентных свойств и функций; методах построения композитных индексов и субиндексов, анализе и синтезе показателей в условиях дефицита информации о критериях и приоритетах оценивания (АСПИД- и APIS- методологии), методах имитационного моделирования водных экосистем, разноаспектной ГИС-визуализации полученных результатов.

В перечень задач исследования входят следующие основные задачи: 1 - обоснование теоретико-методологических положений интегральной оценки экологического/геоэкологического статуса (ЭС/ГС) и экологического благополучия (ЭБ) водных объектов; 2 - разработка и апробация моделей интегральной оценки трофического статуса, качества и токсического загрязнения воды, потенциальной устойчивости, ЭБ водных объектов; 3 - разработка математического аппарата и моделей интегральной оценки экологического и/или геоэкологического статуса и экологического благополучия водных объектов для оценки их современного и перспективного состояния; 4 – проверка выдвигаемых гипотез о достаточности интегральной оценки трофического статуса, качества воды, потенциальной устойчивости для формирования представлений об ЭС водного объекта; 5 - проверка выдвигаемых гипотез о необходимости привлечения дополнительных параметров (субиндексов) для интегральной оценки ГС и ЭБ водных объектов с учетом их типа и специфики; 6 - разработка подходов к выявлению пределов устойчивости водных объектов к изменению параметров естественного режима и антропогенному эвтрофированию; 7 - разработка подходов к выявлению пределов устойчивости водных объектов к изменению параметров естественного режима и качества воды; 8 - разработка подходов к выявлению пределов устойчивости водных объектов к изменению ЭС и ЭБ при естественном развитии и внешнем воздействии на водный объект; 9 – разработка моделей учета экологических функций водных объектов, в первую очередь, продукционной и деструкционной, исследование их изменений при антропогенной трансформации водных экосистем; 10 - разработка рекомендаций и примеров учета приоритетов (отдельных субиндексов) в интегральной оценке системных свойств и функций; разноаспектной ГИС-визуализации результатов оценочных исследований ЭС и ЭБ.

Материалы и методы исследования

Рассмотрение большого количества документов, публикаций и обобщений по теме исследования, приведенных в [4,5] показало, что в большинстве случаев подходы к оценке экологического состояния и качества окружающей человека природной и антропогенно-трансформированной среды не содержат теоретико-методологических обобщений и методов интегральной оценки сложных систем в природе и обществе и их эмерджентных (интегративных) свойств, характеризующих системные свойства и системные функции, их пространственно-временные проявления (эффекты). Индексология и индикаторный подход присутствуют в большинстве исследований на уровне индексов-маркеров, аналитических индексов (простые аналитические - результат нормирования; условные функционалы – индексы разнообразия и сходства; экспертные индексы – индексы качества среды; функция Харрингтона и ее аналоги, отражающие эффект триггерности). Таким образом, в основе большинства оценочных исследований содержатся многокритериальные оценки, недостатком которых является неопределенность интерпретации полученных результатов, когда по одному индексу (субиндексу) система попадает в один класс (продуктивности, качества, устойчивости, благополучия и др.), а по другим индексам (субиндексам) – в другой или другие классы. Системы индикаторов, которые используются управленческими структурами в зарубежных и отечественных оценочных исследованиях сложных природных (и общественных) систем также порождают неопределенность в результатах оценивания временной динамики развития системы. Процесс управления такими системами, основанный на мониторинге факторных показателей, расчете некоторых упомянутых индексов (зачастую, неоправданно большого их количества с представлением итогового результата в виде балльной оценки), их анализе с учетом влияния на целевой индикатор на основе различных авторских подходов, прогнозе возможных изменений выбранных показателей не дает должного эффекта. В результате, по одному индикатору (набору

индикаторов) выявляется положительная динамика развития, а по другому (другим) - стагнация (деградация, спад и т.п.) или негативные системные эффекты. В связи с этим следует признать, что реализация конкретных целей деятельности органов государственной власти в сфере планирования устойчивого развития регионов часто не является эффективной. Это также подтверждается имеющимися зарубежными публикациями. В одном из современных зарубежных обобщений, посвященных обзору более 1500 работ по индексам, разработанным для оценки «территориальных детерминант» с точки зрения охраны окружающей среды, авторами было выявлено более 20 пространственно-распределенных композитных индекса, в основу которых заложена информация о более 300 переменных. С точки зрения авторов статьи, это «может привести к сильной субъективности и ограничению возможности сопоставления различных оценочных результатов» [4].

Основы методики наших исследований были заложены в конце 1990-х гг [6]. В авторских обобщениях и многочисленных примерах, рассмотренных и реализованных нами в серии публикаций, акцент в создании классификаций ЭС и ЭБ был сделан на разработку оценочных классификаций (моделей-классификаций) на основе обобщенных функций желательности, которые дают возможность одновременно отразить многокритериальность оценок и иерархичность сложной системы на основе иерархии субиндексов интегративных свойств с учетом недостатка информации о критериях и приоритетах оценивания. Исследовались, главным образом, водные экосистемы и геосистемы, их эмерджентные (сложные, неаддитивные, интегративные) свойства и функции, характеризующие системы в целом (современный или ретроспективный статус системы, ее системное благополучие, степень трансформации системы, устойчивость/уязвимость системы, и др.) в условиях достаточного информационного обеспечения или недостатка информации (с использованием неполной, неточной, нечисловой информации, т.н. «*ннн*-информации») о критериях и приоритетах в планировании управления системами. Также впервые были разработаны новые методы оценки воздействия на системы и их ответной реакции на воздействие. При решении этой проблемы исследователь нацелен на прогнозирование состояния сложной системы (и ее подсистем) на основе моделей системной динамики (имитационных моделей) и моделей интегрального оценивания. Совмещение подходов, позволило разработать новые методики системного нормирования воздействия на водные объекты [7-9].

Результаты и выводы

В качестве примера рассмотрим некоторые полученные результаты. Сформулированы и проверены следующие научные гипотезы.

Гипотеза 1 - о достаточности интегральной оценки трофического статуса, качества воды (и донных отложений), устойчивости водного объекта для формирования представлений об ЭС водного объекта [7,9].

Гипотеза 2 - о необходимости привлечения дополнительных параметров для интегральной оценки ЭБ водных объектов с учетом их типа и специфики. Например, под экологически благополучной природной системой понималась система, способная: 1- продуцировать органическое вещество в соответствии с исторической фазой развития; 2-выполнять социально-экономические функции и функции жизнеобеспечения (средо- и ресурсовоспроизводство); 3-являющаяся разнообразной по составу биоты и абиотической среды; 4-чистой по химическому составу воды и гидробиологическим критериям качества воды; 5-устойчивой к изменению параметров естественного (и антропогенного) режимов; 6-способной к самоочищению; 7-обладающей низкой скоростью загрязнения, acidификации; 8-способной сохранять названные свойства и функции достаточно долго в изменяющихся условиях среды и жизни организмов. Перечисленные свойства, учитываемые в оценочных классификациях, в других случаях,

потребовали разработки дополнительных субиндексов и их учете в сводной оценке. В некоторых случаях количество учитываемых параметров обоснованно уменьшалось в связи с недостаточным информационным обеспечением работ. В любом варианте делалась попытка объединить био- и антропоцентризм в подходах к исследованию ЭБ [5,8].

Гипотеза 3 - об использовании разных шкал устойчивости и разных моделей при оценке ЭС и ЭБ водоемов [5-9].

Гипотеза 3.1. Шкала потенциальной устойчивости, построенная для оценки ЭС, изменяется от неустойчивого класса (I класс) до устойчивого класса (V класс). При этом в первый класс по остальным группам признаков (трофический статус, качество воды) включаются параметры, характеризующие высокий ЭС водоема. Устойчивость в этом случае будет следовать принципу Ле Шателье-Брауна. При этом система постепенно адаптируется к новым условиям (устойчивость I типа, адаптационная). Следствием этого будет положение, при котором при прочих неизменных условиях более продуктивная экосистема малого водоема может оказаться более устойчивой к эвтрофированию, а более сапробная (токсобная) экосистема – более устойчивой к загрязнению. В этом случае устойчивая экосистема не должна ассоциироваться с экологическим благополучием (или высоким ЭС).

Гипотеза 3.2. При оценке ЭС больших водоемов, шкала потенциальной устойчивости будет изменяться от устойчивого класса (I класс) до неустойчивого класса (V класс). Гипотеза построена на предположении о том, что большие по площади и объему воды озера, а также глубокие водоемы, как правило, являются более устойчивыми к изменению параметров естественного режима (потенциальная устойчивость).

Гипотеза 3.3. *A priori* принимается предположение о том, что при оценке ЭС и ЭБ для любых водоемов, устойчивость будет изменяться, аналогично гипотезе 3.2, от устойчивый (I класс) до неустойчивый (V класс). В этом случае большая устойчивость водоема всегда будет свидетельствовать о его высоком ЭБ. При этом на второй план уходит то, что малые водоемы по результатам оценки, скорее всего, никогда не смогут характеризоваться I-м (наиболее устойчивым) классом.

Гипотеза 3.4. Интегральные оценки эмерджентных свойств и системных эффектов, выполненные на основе разных моделей-классификаций по одним исходным данным должны давать близкие результаты. Модели-классификации, в которых в качестве наилучшего класса используется близость результата нормирования к «0» и модели-классификации, в которых в качестве наилучшего класса используется близость результата нормирования к «1», должны давать один класс ЭС реального водоема.

Гипотеза 3.5. Учет в оценке ЭС потенциальной устойчивости на основе адаптационного подхода (I тип, непроточный водоем) и регенерационного подхода (II тип, с учетом проточности) не должен приводить к разным результатам.

Гипотеза 3.6. Модель-классификация оценки ЭС, построенная в предположении, что наиболее высокому статусу (I класс) в пределах Северо-Запада РФ должны соответствовать олиго-мезотрофные условия первичного продуцирования органического вещества в водоеме, наилучшее качество воды и наибольшая потенциальная устойчивость (принцип – «высокий статус – высокая устойчивость») и модель-классификация оценки ЭС, построенная в предположении, что наиболее высокому статусу (I класс) должны соответствовать олиго-мезотрофные условия первичного продуцирования органического вещества в водоеме, наилучшее качество воды и низкая потенциальная устойчивость (на том основании, что чистые и малопродуктивные водоемы уязвимы к загрязнению и антропогенному эвтрофированию) не должны давать противоречивых результатов.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-27-10011, и при финансовой поддержке Санкт-Петербургского научного фонда.

Acknowledgments

The work was supported by Russian Science Fund, grant No. 23-27-10011, and by Saint Petersburg Science Fund.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства РФ от 27.08.2009 N 1235-р (ред. от 17.04.2012) "Об утверждении "Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года" <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-pravitelstva-rf-ot-27082009-n-1235-r/>
2. Указ Президента РФ от 1 декабря 2016 г. N 642 "О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации" (с изменениями и дополнениями). Указ Президента РФ от 1 декабря 2016 г. N 642 "О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации" <https://base.garant.ru/71551998/>
3. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy Official Journal L 327, 22/12/2000. P. 1-73.
4. Brousmichea D., Occellia F., Geninb M., Cunya D., Derama A., Lanier C. Spatialized composite indices to evaluate environmental health inequalities: Meeting the challenge of selecting relevant variables. Ecological Indicators. 111 (2020) 106023. URL.: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106023>. (дата обращения: 03.02.2020).
5. Dmitriev V. V., Terleev, V. V., Nikonorov, A. O., Ogurtsov, A. N., Osipov, A. G., Sergeev, Y. N., Kulesh, V. P., Fedorova, I. V. (2020). Global Evaluation of the Status and Sustainability of Terrestrial Landscapes and Water Bodies. Landscape Modelling and Decision Support, 231–253. doi:10.1007/978-3-030-37421-1_12
6. 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 2342V00, 2000 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/G5sC2> (дата обращения: 17.05.2019).
7. Седова С.А., Дмитриев В.В. Интегральная оценка экологического статуса водоема и нормы воздействия на его водную экосистему: Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод. Сборник статей, посвященный 100-летию со дня образования Гидрохимического института. Ростов-на-Дону, 2020. С. 254-259.
8. Седова С.А., Дмитриев В.В., Третьяков В.Ю., Глушко А.А., Пленкина А.К. Оценка воздействия на водную экосистему и ее эмерджентные свойства на основе результатов имитационного моделирования и построения композитных индексов. Успехи современного естествознания. 2021. № 6. С. 132-142. DOI: 10.17513/use.37652
9. Архипов Д.Э., Едемский К.Е., Кожевникова С.И., Дмитриев В.В. Развитие мониторинга водных объектов на основе интегральной оценки экологического статуса и моделирования экологических функций. European Journal of Natural History. 2022. №2. С. 31-37.