

Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 293—309.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(75):293—309.

ЭКОЛОГИЯ. ОБЗОР

Научная статья
УДК 556.555:574.5
doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-293-309

Оценка экологического статуса водоемов на основе построения композитных индексов: методика, результаты, перспективы

***Василий Васильевич Дмитриев, Виктор Юрьевич Третьяков,
Дарья Сергеевна Зырянова, Анаит Арамовна Овсепян,
София Юрьевна Почепко, Анастасия Владимировна
Немчинова, Михаил Олегович Каспин***

Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле,
Санкт-Петербург, Россия, v.dmitriev@spbu.ru

Аннотация. Разработаны новые модели-классификации интегральной оценки экологического статуса водоема. В оценку экологического статуса включены 11 критериев оценки трофности водоема, 14 критериев оценки качества и токсического загрязнения воды, 30 критериев оценки потенциальной устойчивости водоема к изменению параметров естественного режима. Оценка устойчивости водоема выполнена на основе последней авторской методики оценки потенциальной устойчивости. Приведены рекомендации к построению оценочных шкал исходных параметров и субиндексов. Описаны этапы и технология построения интегральных показателей. Рассмотрены примеры оценки экологического статуса для ключевых водоемов.

Ключевые слова: экологический статус, продуктивность, качество воды, потенциальная устойчивость, интегральная оценка, нечисловая информация.

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

Для цитирования: Дмитриев В. В., Третьяков В. Ю., Зырянова Д. С., Овсепян А. А., Почепко С. Ю., Немчинова А. В., Каспин М. О. Оценка экологического статуса водоемов на основе построения композитных индексов: методика, результаты, перспективы // Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 293—309. doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-293-309.

Original article

Assessment of the ecological status of reservoirs based on the construction of composite indices: methodology, results, prospects Article title***Vasily V. Dmitriev, Victor Yu. Tretiakov, Daria S. Zyryanova, Anayit A. Ovsepyan, Sofia Yu. Pochevko, Anastasia V. Nemchinova, Mikhail O. Kaspin***

St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, St. Petersburg, Russia, earth.spbu.ru

Summary. Theoretical and methodological ideas about the ecological status of a water body have been developed on the basis of: 1 — study of the aquatic ecosystem's ability to produce organic matter; 2 — assessment of changes in water quality and toxic pollution; 3 — assessment of water body stability to changes in natural and anthropogenic regime parameters. The assessment of water body sustainability was carried out on the basis of the last author's methodology for assessing potential sustainability. The assessment of ecological status includes 11 criteria for assessing water body productivity (3 sub-indices IIP1, IIP2, IIP3), 14 criteria for assessing water quality and toxic pollution (3 sub-indices IIQ1, IIQ2, IIQ3), 30 criteria for assessing the potential stability of the water body to changes in the natural regime parameters, including 15 criteria for assessing adaptive stability: IIS1a, IIS2a, IIS3a (3 sub-indices) and 15 — to assess regenerative resilience: IIS1r, IIS2r, IIS3r (3 sub-indices); sub-indices IISa, IISr, IIS and composite index of the last level of convolution IIES. The estimation scales of initial parameters and calculated subindices are given. The stages and technology of II construction are described. On the example of a small lake in the northwestern Ladoga region it is shown that the water body during 6 years kept its ecological status within the limits of II-III classes on the IIES scale under different priorities of subindexes accounting in the IIES assessment. The second object (Nevskaya Bay) was assessed as III-IV classes with the most probable falling into IV class under different assessment priorities.

Keywords: ecological status, productivity, water quality, potential sustainability, integral assessment, non-numerical information.

Acknowledgments: This work was financially supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-27-10011, and by the St. Petersburg Science Foundation.

For citation: Dmitriev V. V., Tretiakov V. Yu., Zyryanova D. S., Ovsepyan A. A., Pochevko S. Yu., Nemchinova A. V., Kaspin M. O. Assessment of the ecological status of reservoirs based on the construction of composite indices: methodology, results, prospects. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(75):293—309. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-293-309.

Введение

В статье обсуждается опыт интегральной оценки экологического статуса водоемов. Оценка состояния сложных систем в природе и обществе, развитие методологии анализа и синтеза показателей, характеризующих это состояние, является актуальной научной проблемой большинства современных научных работ в науках о Земле и окружающей человека природной среде. Эти исследования вплотную соотносятся с развитием методов и моделей оценки воздействия на природные системы и получения ответной реакции системы в целом на оказанное или планируемое воздействие.

Целью работы является обзор и разработка теоретико-методологических основ и новых моделей-классификаций интегральной оценки экологического статуса водоема, совершенствование технологии построения композитных индексов экологического статуса на основе использования нечисловой информации о приоритетах оценивания и учете точности полученных результатов.

Содержанием и задачами исследования являлись:

- 1) разработка и апробация оценочных классификаций для интегральной оценки продуктивности, качества и токсического загрязнения воды, потенциальной устойчивости, экологического благополучия/неблагополучия водных объектов;
- 2) разработка математического аппарата для интегральной оценки экологического статуса водных объектов, их современного и перспективного состояния, тенденций и перспектив их изменения при внешнем воздействии.

Термин «экологический статус» (ЭС) природной системы был предложен нами после получения опыта системных исследований природных объектов. Ранее этот термин можно было встретить в основном в науках об обществе в контексте «экологический статус как часть конституционного статуса гражданина» [1], но чаще упоминался «эколого-правовой статус» при рассмотрении вопросов охраны окружающей среды, экологических прав и обязанностей субъектов — участников экологических правоотношений [2, 3].

В экологической терминологии достаточно давно использовался термин «трофический статус» и «трофический уровень», последний постепенно вытеснил термин «трофический статус» [4, 5]. Да и сам термин «экологическое состояние» при переводе на английский язык определялся как *ecological state* или *environmental status*.

Термин «статус» происходит от латинского *status* — «состояние, положение» и обозначает совокупность стабильных значений параметров объекта (или субъекта). С упрощённой точки зрения статус объекта (субъекта) — это характеристика его состояния, либо позиция, ранг в любой иерархии, структуре, системе, времени. Обращаем внимание на то, что сегодняшний акцент в исследованиях смещается на изучение объекта как системы в целом. Представление природных объектов как сложных систем позволяет нам говорить об оценке статуса как оценке свойства, присущего системе в целом, называемого часто неаддитивным, интегративным, эмерджентным свойством системы, под которым понимается несводимость свойств системы к свойствам её компонентов. Такое сложное свойство нельзя измерить в полевых условиях или свести к покомпонентному анализу изменения во времени и пространстве состава и свойств на уровне отдельных характеристик объекта.

Развитие природного объекта как системы характеризуется системными эффектами — проявлениями эмерджентности на уровне подсистем и их свойств. Системные эффекты сопровождаются изменением системных функций (биопроductiveй, деструкционной и др.). В связи с изменением скоростей процессов массообмена в экосистеме под влиянием большого числа влияющих на них факторов системные функции также обладают эмерджентными свойствами. Результатом этих изменений является трансформация системы. При этом результаты

трансформации могут иметь как положительную, так и отрицательную значимость для развития системы или для человека (общества). Примером отрицательной значимости является антропогенная трансформация системы, рассматриваемая нами как «болезнь» (степень неблагополучия) эко- или геосистемы. Такая оценка должна быть одновременно многокритериальной и полииерархичной (многоуровневой), поскольку использование в оценочных исследованиях только индикаторного подхода (индексологии) не снимает неопределенности в оценке полученных результатов.

При получении неопределенности в результате анализа системы с использованием «целевых индикаторов» исследователь часто «опускает руки» и начинает рассуждать о неприменимости метода или неправомочности его использования. Так, например, поступили авторы в одном из популярных современных зарубежных обобщений [6], в котором было рассмотрено более 1500 работ по индексам, разработанным для оценки «территориальных детерминант» с точки зрения охраны окружающей среды. Они выявили более 20 «пространственно-распределенных композитных индексов», в основе которых содержалась информация о более 300 натуральных характеристик состава и свойств объектов исследования. Авторы сделали вывод, что «это может привести к сильной субъективности и ограничению возможности сопоставления различных оценочных результатов».

На наш взгляд, выводы должны были свидетельствовать о том, что сравнивать оценочные результаты, полученные на разных моделях-классификациях (с учетом целей исследования), по величинам абсолютных значений индексов и субиндексов вообще не имеет смысла, хотя такой результат часто присутствует в современных публикациях. В этих случаях также получается, что исследуемую систему можно отнести к разным классам состояния по разным композитным индексам. В итоге авторы ограничились только первым этапом в исследовании системных свойств — обоснованием выбора оценочных критериев, оставив без обсуждения опыт построения композитных индексов и рекомендации по технологии получения и анализа оценочных результатов.

Отметим, что разные системные свойства, являющиеся часто эмерджентными, всегда можно представить в виде отдельных субиндексов (продуктивности, качества и токсического загрязнения, устойчивости, и др.). В этом случае появляется возможность учитывать приоритеты вклада каждого субиндекса на всех уровнях иерархии в получении итогового интегрального показателя. Затем в серии экспериментов, учитывающих возможные траектории развития системы при разных приоритетах оценивания, можно выявить, способна ли система сохранить свой статус (класс состояния) после оказанного воздействия (изменения приоритетов развития). На всех этапах (уровнях свертки) необходимо предусмотреть оценку точности полученных результатов. Сравнить результаты, полученные по разным оценочным классификациям, можно только по попаданию в определенный класс с учетом расчета точности полученных результатов.

В этом случае исследователь всегда выходит на подтверждение системологических принципов изучения сложных систем: иерархической организации сложной системы (интегративных уровней); контринтуитивного поведения сложной

системы; множественности моделей в изучении сложных систем на основе модельного представления объектов исследования; «относительности конкретного».

Оценить экологическое состояние природного объекта можно в определенный момент времени (экологическая ситуация) или за определенный временной интервал (экологическая обстановка). Это важное замечание выводит нас на рекомендацию, как следует оценивать системные эффекты. Например, химический и биологический состав, токсическое загрязнение воды можно определить в разные моменты времени, а для оценки экологического статуса требуется выполнить оценку для некоторого временного интервала, например, 3—5 лет.

Под экологической оценкой можно понимать параметрическое определение состояния природной среды, обеспечивающего существование живых организмов в условиях естественного и/или антропогенного режимов их развития. Сравнительно недавно в отечественную научную литературу был введен термин «геоэкологическая оценка». В работе [7] под геоэкологической оценкой понимается «многопараметрический анализ природно-ресурсного потенциала естественных и антропогенно-измененных ландшафтов с целью определения их возможности выполнять задаваемые им социально-экономические функции без нарушения функций жизнеобеспечения (средо- и ресурсовоспроизводства). В работе [8] в качестве геоэкологической оценки рассматривается параметрическое определение состояния антропогенно-трансформированной геосистемы, обеспечивающего существование конкретных сообществ живых организмов и человека (общества) с целью выделения антропогенной составляющей и последствий этих изменений на фоне природных процессов. При этом в оценку предлагалось включать две составляющие: 1) «геоэкологическую регламентацию», представляющую собой анализ параметров состояния антропогенно-трансформированной геосистемы, определение интервалов изменений элементов ее режимов (естественного и антропогенного); 2) «геоэкологическое нормирование» и выявление пороговых и критических величин воздействия на систему.

Геоэкологическое нормирование можно рассматривать как нормирование любого антропогенного воздействия на геосистему, при котором можно оценить реакцию геосистемы в целом или какого-либо ее «критического звена» (подсистемы) на это воздействие. Критическим звеном считается наиболее уязвимая («слабое звено») экосистема. Это означает, что нагрузка, допустимая на эту экосистему, принимается в качестве допустимой нагрузки для геосистемы в целом [8]. Под «геоэкологическим мониторингом» рассматривается информационная система наблюдений, оценки и прогноза изменений в состоянии окружающей среды, созданная с целью выделения антропогенной составляющей этих изменений на фоне природных процессов [8].

Под устойчивостью в данной работе понимается способность системы сохранять свои свойства, системные функции и параметры режимов в условиях внутренних и внешних воздействий. Новым является то, что при расчете интегральных показателей устойчивости (ИПУ) реализуется учет двух типов устойчивости: адаптационной и регенерационной. Поясним, что чаще всего в экологической литературе термин *устойчивость* используется в следующих значениях:

— *инертность системы* — способность экосистемы сохранять при внешнем воздействии исходное состояние в течение некоторого времени;

— *пластичность системы* — способность экосистемы переходить из одного состояния равновесия в другое, сохраняя при этом внутренние связи;

— *восстанавливаемость системы* — способность экосистемы возвращаться в исходное состояние после временного внешнего воздействия.

Первые два понятия трактуются как *адаптационная устойчивость*, третье — как *регенерационная* [8].

В наши дни исследования устойчивости системы (объекта) постепенно сместились на оценку только потенциальной устойчивости (устойчивости к изменению параметров естественного режима или устойчивости к изменению физико-географических условий, климатических и гидрологических особенностей объекта) [9]. Одновременный учет потенциальной устойчивости с изменением продуктивности и качества воды отражает способность/неспособность системы сохранять экологический статус системы и выводит исследователя на новый уровень — оценку способности системы сохранять свой экологический статус в естественных и антропогенных условиях развития.

Методика исследования

Решение проблемы оценки экологического статуса водных объектов и выделение экорегионов Европы в странах ЕС было сопряжено с принятием, доработкой и адаптацией 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). Основная цель «Директивы» в ЕС представлялась как достижение экологического благополучия или высокого экологического статуса для всех водных систем [10]. Характерной чертой зарубежных и большинства отечественных публикаций является отказ от экологической квалитметрии (работы со шкалами натуральных значений характеристик, которые чаще всего переводят в баллы). Балльная шкала при этом трансформирует натуральную шкалу, переводя её в линейную равномерную прямую или обратную шкалу. Баллы далее складывают с учетом или без учета веса (технология обоснования весов не раскрывается) и получается сумма баллов, которую можно дальше взять в рейтинг или в работу с ГИС для получения различных тематических карт [11]. При этом в легенде карт часто присутствует несколько цветовых вариантов «патчей», соответствующих классам балльной авторской шкалы, введенной на основе $(max - min)/n$, где *max* и *min* — максимальное и минимальное количество баллов для ИП или какого-либо субиндекса, для которого строится карта; *n* — количество классов, введенное автором.

При оценке экологического статуса водоема нами изначально учитывалось параметрическое многокритериальное и многоуровневое сочетание продукционного потенциала системы (интегральный показатель трофности ИПТ), качества, токсического загрязнения среды (интегральный показатель качества ИПК) и



Рис. 1. Схема построения интегрального показателя экологического статуса водоема.

Fig. 1. Scheme for constructing an integral indicator of the ecological status of a water body.

потенциальной устойчивости водоема (интегральный показатель устойчивости ИПУ), представленное соответствующими субиндексами (рис. 1).

Для построения ИПТ, ИПК, ИПУ и интегрального показателя экологического статуса (ИПЭС) нами применялась АСПИД-методология (Анализ и Синтез Показателей при Информационном Дефиците) с учетом использования нечисловой (а также неполной и неточной) информации (*ннн*-информации) для получения оценочных результатов [12, 13]. В данной статье рассмотрены последние модели-классификации и технология построения ИПТ, ИПК, ИПУ и ИПЭС с учетом новых идей в оценке отдельных субиндексов и, прежде всего, субиндекса потенциальной устойчивости ИПУ.

Результаты исследований

В качестве объекта исследования в работе было выбрано малое озеро в северо-западном Приладжье (оз. Суури, Большое Волковское) [14]. Технология и рекомендации формирования оценочных шкал исходных характеристик, расчета субиндексов и их оценочных шкал по классам экологического статуса по всем уровням свертки показателей для классификации, приведенной на рис. 1, подробно рассмотрены в наших последних публикациях [14—16].

В целом в оценку экологического статуса включены 11 критериев оценки трофности водоема (3 субиндекса), 14 критериев оценки качества и токсического

загрязнения воды (3 субиндекса), 30 критериев оценки потенциальной устойчивости водоема к изменению параметров естественного режима: 15 критериев для оценки адаптационной устойчивости (3 субиндекса) и 15 критериев для оценки регенерационной устойчивости (3 субиндекса) и, соответственно, субиндекс ИПУ и композитный индекс ИПЭС (рис. 1). Всего использовалось 55 критериев, при этом отметим, что критерии для оценки ИПУа и ИПУр, как правило, одноименные, но направленность изменения характеристик задается в зависимости от вида устойчивости и сезона года.

При оценке адаптационной устойчивости (холодное время года) высокая устойчивость в этот период обусловлена «стагнацией» процессов зимой (система «спит»). Физические процессы и процессы массообмена в системе проходят с низкими скоростями. Система очень медленно самоочищается. При оценке регенерационной устойчивости (теплый период года) высокая устойчивость в этот период обусловлена повышенными скоростями массообмена и самоочищения (повышение температуры увеличивает массообмен и естественное самоочищение водоема).

Рассмотрим содержание и характеристику основных этапов построения интегрального показателя экологического статуса водоема.

Этап 1. Выбор и обоснование составляющих (характеристики, блоки, субиндексы, уровни свертки, классы) для оценки ИПЭС. Выбранные характеристики агрегируются в блоки. Каждый блок является основой построения соответствующих субиндексов (ИПТ, ИПК, ИПУ), используемых для интегральной оценки ИПЭС. Субиндекс ИПТ учитывает продуктивность (трофность) водоема, ИПК — качество и токсическое загрязнение воды, ИПУ — потенциальную устойчивость водоема. Для каждого блока (субиндекса) отбираются не более 5—7 критериев, представленных показателями x_1, \dots, x_m , которые образуют группы характеристик для построения субиндексов разных порядков, входящих в ИПТ, ИПК, ИПУ и отражающих связь x_i с соответствующим интегративным свойством водоема (продуктивность, качество, устойчивость).

Для снижения мультиколлинеарности предусмотрено использование небольшого числа слабо коррелируемых критериев в каждой группе. Определяется количество классов, формируются оценочные шкалы для всех критериев для левой и правой границы каждого класса для каждого субиндекса. Устанавливаются предельные значения min_i, \dots, max_i (минимум и максимум, имеющие региональный смысл) для всех характеристик, входящих в субиндексы; вид и монотонность связи всех параметров с оцениваемым свойством водоема.

Каждый субиндекс в соответствии с рис. 1 может быть представлен несколькими субиндексами второго порядка: трофности (ИПТ1, ИПТ2, ИПТ3), качества (ИПК1, ИПК2, ИПК3), устойчивости (ИПУа, ИПУр). Субиндексы ИПУа и ИПУр, в свою очередь, также представлены субиндексами третьего порядка: ИП1а, ИП2а, ИП3а и ИП1р, ИП2р, ИП3р (рис.1). Их содержание раскрыто нами в публикации [9]. Построение ИПУ1, ИПУ2, ИПУ3 для модели адаптационной устойчивости (М1) и регенерационной устойчивости (М2) выполняется с учетом вида связи (прямая/обратная) и линейности/нелинейности связей.

Этап 2. Для каждого субиндекса выполняется нормирование показателей на основе нормирующих функций (1) и (2). Выбор нормирующей функции зависит от вида связи (прямая или обратная, линейная-нелинейная) и предпочтения исследователя в формировании шкал нормированных значений (слева 0 или слева 1).

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 0, & \text{при } x_i \leq \min_i \\ \left(\frac{x_i - \min_i}{\max_i - \min_i} \right)^\lambda, & \text{при } (\min_i < x_i \leq \max_i), \\ 1, & \text{при } x_i > \max_i \end{cases} \quad (1)$$

где q_i — преобразованное значение x_i ; x_i — текущее значение параметра; \min_i — минимальное (фоновое, допустимое и т.п.) значение параметра; \max_i — максимальное значение параметра (лучше ориентироваться на региональные, но не на абсолютные максимумы параметров). Исследователь должен дополнительно выбрать показатель степени λ , определяющий характер и степень выпуклости нормирующей функции $q_i(x_i)$: при $\lambda > 1$ соответствующая нормирующая функция выпукла вниз, а при $\lambda < 1$ — вверх.

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 1, & \text{при } x_i \leq \min_i \\ \left(\frac{\max_i - x_i}{\max_i - \min_i} \right)^\lambda, & \text{при } (\min_i < x_i \leq \max_i). \\ 0, & \text{при } x_i > \max_i \end{cases} \quad (2)$$

В результате нормирования получают безразмерные показатели q_1, \dots, q_m , $0 \leq q_i \leq 1$. Их часто называют *отдельными показателями*. Каждый q_i является функцией исходной характеристики $q_i = q_i(x_i)$ и позволяет оценить ИП с точки зрения i -го критерия. При этом близость величины q_i и ИП к нулю может характеризовать устойчивость как низкую, а близость q_i и ИП к 1 — как высокую. Здесь возможны две ситуации в зависимости от предпочтения автора, который может принять близость q_i и ИП к нулю за высокий класс, а близость q_i и ИП к 1 — за низкий или наоборот. Это отразится на выборе нормирующей функции при расчетах ИП и направленности оценочных шкал (от 0 к 1 или от 1 к 0).

Этап 3. При построении каждого субиндекса выбирается синтезирующая функция $Q(q) = Q(q_1, \dots, q_m)$, агрегирующая нормированные показатели q_1, \dots, q_m в единый интегральный показатель $Q = Q(q)$, сопоставляя j -му свойству (т.е. его оценке $q^{(j)} = (q_1^{(j)}, \dots, q_m^{(j)})$) некоторую числовую оценку $Q^{(j)} = Q(q^{(j)}) = Q(q_1^{(j)}, \dots, q_m^{(j)})$. На синтезирующую функцию, определяющую интегральный показатель, накладываются ограничения: $Q(0, \dots, 0) = 0$; $Q(1, \dots, 1) = 1$; $0 \leq Q \leq 1$. Простейшей синтезирующей функцией, используемой в данной работе, является линейная функция вида:

$$Q = Q(q; w) = Q(q_1, \dots, q_m; w_1, \dots, w_m) = \sum_{i=1}^m q_i w_i.$$

Этап 4. Задание весовых коэффициентов $w = (w_1, \dots, w_m)$ — неотрицательные веса, задающие приоритетность (важность, значимость) нормированных показателей для построения каждого субиндекса. Сумма весов в каждом субиндексе равна 1. Учет *ннн*-информации (экспертной информации) о весах:

1 — нечисловая, ординальная (порядковая) информация – *OI*:

$$OI = \{w_r > w_s, w_u = w_v, \dots r, s, u, v \in \{1, \dots, m\}\}.$$

2 — неточная, интервальная информация о весах – *II*:

$$II = \{0 \leq a_i \leq w_i \leq b_i \leq 1, i \in (1, \dots, m)\}.$$

3 — итоговая информация: $I = OI + II$.

Этап 5. Выполняется построение всех субиндексов и ИПЭС для левой и правой границ классов и для всех уровней свертки ИП. Векторы весовых коэффициентов $w = (w_1, \dots, w_n)$ определяют приоритет (значимость) нормированных показателей для интегральной оценки на всех уровнях свертки.

Этап 6. Переход к средним значениям интегральных показателей и оценка точности расчета ИПЭС выполняется по следующим формулам:

$$\bar{Q}^{(j)}(I) = \bar{Q}(q^{(j)}; I) = \bar{Q}(q^{(j)}, \bar{w}(I)) = \frac{1}{N(m, n; I)} \sum_{t=1}^{N(m, n; I)} Q^{(t)}(q^{(j)}),$$

$$[S^{(j)}(I)]^2 = \frac{1}{N(m, n; I)} \sum_{t=1}^{N(m, n; I)} [Q^{(t)}(q^{(j)}) - \bar{Q}^{(j)}(I)]^2.$$

Для оз. Суури оценка экологического статуса оценивалась по модели-классификации, приведенной на рис. 1, и по более ранней, приведенной в [14].

Результаты построения оценочных шкал ИПЭС для 5 разных вариантов учета приоритетов (весов) на последнем уровне свертки (ИПЭС = ИПТ + ИПК + ИПУ) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты построения оценочных шкал интегрального показателя экологического статуса (ИПЭС) для пяти вариантов учета приоритетов (весов) на последнем уровне свертки

Results of constructing the evaluation scales of the integral indicator of ecological status (IES) for five variants of taking into account priorities (weights) at the last level of convolution

1. Оценочная шкала ИПЭС для равновесных условий ИПТ = ИПК = ИПУ						
ИПТ	0,00—0,230	0,230—0,398	0,398—0,564	0,564—0,800	0,800—1,000	0,333
ИПК	0,000—0,145	0,145—0,308	0,308—0,429	0,429—0,648	0,648—1,000	0,333
ИПУ	0,000—0,137	0,137—0,262	0,262—0,471	0,471—0,735	0,735—1,000	0,333
ИПЭС	0,000—0,171	0,171—0,323	0,323—0,488	0,488—0,728	0,728—1,000	
2. Оценочная шкала ИПЭС для ИПТ > ИПК = ИПУ						
ИПТ	0,000—0,230	0,230—0,398	0,398—0,564	0,564—0,800	0,800—1,000	0,700
ИПК	0,000—0,145	0,145—0,308	0,308—0,429	0,429—0,648	0,648—1,000	0,150
ИПУ	0,000—0,137	0,137—0,262	0,262—0,471	0,471—0,735	0,735—1,000	0,150
ИПЭС	0,000—0,203	0,203—0,364	0,364—0,530	0,530—0,767	0,767—1,000	

Окончание табл. 1

3. Оценочная шкала ИПЭС для ИПК > ИПТ = ИПУ						
ИПТ	0,000—0,230	0,230—0,398	0,398—0,564	0,564—0,800	0,800—1,000	0,150
ИПК	0,000—0,145	0,145—0,308	0,308—0,429	0,429—0,648	0,648—1,000	0,700
ИПУ	0,000—0,137	0,137—0,262	0,262—0,471	0,471—0,735	0,735—1,000	0,150
ИПЭС	0,000—0,157	0,157—0,315	0,315—0,456	0,456—0,684	0,684—1,000	
4. Оценочная шкала ИПЭС для ИПУ > ИПТ = ИПК						
ИПТ	0,000—0,230	0,230—0,398	0,398—0,564	0,564—0,800	0,800—1,000	0,150
ИПК	0,000—0,145	0,145—0,308	0,308—0,429	0,429—0,648	0,648—1,000	0,150
ИПУ	0,000—0,137	0,137—0,262	0,262—0,471	0,471—0,735	0,735—1,000	0,700
ИПЭС	0,000—0,152	0,152—0,289	0,289—0,479	0,479—0,732	0,732—1,000	
5. Оценочная шкала ИПЭС для ИПУ > ИПК > ИПТ						
ИПТ	0,000—0,230	0,230—0,398	0,398—0,564	0,564—0,800	0,800—1,000	0,086
ИПК	0,000—0,145	0,145—0,308	0,308—0,429	0,429—0,648	0,648—1,000	0,277
ИПУ	0,000—0,137	0,137—0,262	0,262—0,471	0,471—0,735	0,735—1,000	0,636
ИПЭС	0,000—0,147	0,147—0,287	0,287—0,467	0,467—0,716	0,716—1,000	

Примечание. В последней колонке указан вес субиндекса в свертке при получении ИПЭС.

В табл. 2 приводятся результаты интегральной оценки ЭС оз. Суури при разных приоритетах свертки ИП на последнем уровне по рассмотренной выше классификации. Анализ таблицы показал, что при всех 5 рассмотренных вариантах изменения приоритетов водоем по величине ИПЭС попадает в II (варианты 2 и 3 — IIп) и III (вариант 1 — IIIл, 5 — IIIс, 4 — IIIп) классы экологического статуса. При этом субиндексы ИПТ и ИПК дают IIс, а вклад ИПУ — IVл. Интересно, что вариант 1 (равновесомость) отличается от варианта 5 (приоритет — устойчивость) на полкласса (IIIл и IIIс соответственно).

Таблица 2

Интегральный показатель экологического статуса (ИПЭС) для оз. Суури при разных приоритетах на последнем уровне свертки субиндексов трофности, качества, устойчивости

Integral indicator of ecological status (IIES) for Lake Suuri at different priorities at the last stage of convolution of sub-indices of productivity, quality, sustainability

Номер варианта и приоритет ИП	ИПЭС по вариантам ИПТ = 0,341 (IIс) ИПК = 0,238 (IIс) ИПУ = 0,509 (IVл)	Водоем первой категории I	Водоем второй категории II	Водоем третьей категории III	Водоем четвертой категории IV	Водоем пятой категории V
1. ИПТ = ИПК = ИПУ	0,341×0,333+ 0,238×0,333+ 0,509×0,333 = 0,362	0,000— 0,171	0,171—0,323	<u>0,323—0,488^л</u> 0,406 0,362(IIIл)	0,488— 0,728	0,728— 1,000
2. ИПТ > ИПК = ИПУ	0,341×0,700+ 0,238×0,150+ 0,509×0,150 = 0,351	0,000— 0,203	<u>0,203—0,364</u> 0,284 0,351(IIп)	0,364—0,530	0,530— 0,767	0,767— 1,000
3. ИПК > ИПТ = ИПУ	0,341×0,150+ 0,238×0,700+ 0,509×0,150 = 0,294	0,000— 0,157	<u>0,157—0,315</u> 0,236 0,294(IIIп)	0,315—0,456	0,456— 0,684	0,684— 1,000

Номер варианта и приоритет ИП	ИПЭС по вариантам ИПТ = 0,341 (IIIc) ИПК = 0,238 (IIIc) ИПУ = 0,509 (IVл)	Водоем первой категории I	Водоем второй категории II	Водоем третьей категории III	Водоем четвертой категории IV	Водоем пятой категории V
4. ИПУ > ИПТ = ИПК	0,341×0,150+ 0,238×0,150+ 0,509×0,700 = 0,443	0,000— 0,152	0,152—0,289	<u>0,289—0,479</u> 0,384 0,443(IIIп)	0,479— 0,732	0,732— 1,000
5. ИПУ > ИПК > ИПТ	0,341×0,086+ 0,238×0,277+ 0,509×0,636 = 0,419	0,000— 0,147	0,147—0,287	<u>0,287—0,467</u> 0,377 0,419(IIIc)	0,467— 0,716	0,716— 1,000

Примечание. 1) в первой строке таблицы даны левая и правая границы классов; ниже — середина класса; еще ниже — результат оценки ИПЭС. В скобках римской цифрой дан класс с указанием близости к левой (л), правой (п) границе или к середине (с) класса.

Оценка точности при моделировании весов w_i на основе задания нечисловой информации в вариантах 1—5 приведена в табл. 3.

Таблица 3

Оценка точности расчета w_i для пяти вариантов задания приоритетов при расчете интегральных показателей экологического статуса водоема
Assessment of accuracy of w_i calculation for five variants of prioritization in calculation of integral indicators of ecological status of a water body

Номер варианта и приоритет ИП	w_1	w_2	w_3
1. ИПТ = ИПК = ИПУ	0,333±0,253	0,333±0,253	0,333±0,253
2. ИПТ > ИПК = ИПУ	0,700±0,200	0,150±0,100	0,150±0,100
3. ИПК > ИПТ = ИПУ	0,150±0,100	0,700±0,200	0,150±0,100
4. ИПУ > ИПТ = ИПК	0,150±0,100	0,150±0,100	0,700±0,200
5. ИПУ > ИПК > ИПТ	0,086±0,076	0,277±0,102	0,636±0,139

В табл. 4 приведена точность расчета ИПЭС вариантов 1—5 для правых границ всех классов в оценочной классификации ИПЭС (этап 6).

В публикации [14] было показано, что в течение 5 лет оз. Суури было способно сохранить свой ЭС в пределах III класса, ближе к левой границе класса. Полученные в настоящей статье результаты подтверждают и уточняют данный вывод.

Таблица 4

Среднеквадратическое отклонение ИПЭС для правых границ классов в оценочных шкалах
Standard deviation of IIES for right class boundaries in the estimation scales

Номер варианта и приоритет ИП	Водоем первой категории I	Водоем второй категории II	Водоем третьей категории III	Водоем четвертой категории IV	Водоем пятой категории V
1. ИПТ = ИПК = ИПУ	0,023	0,030	0,030	0,033	0,000
2. ИПТ > ИПК = ИПУ	0,018	0,023	0,023	0,022	0,000
3. ИПК > ИПТ = ИПУ	0,008	0,004	0,018	0,024	0,000

Окончание табл. 4

Номер варианта и приоритет ИП	Водоем первой категории I	Водоем второй категории II	Водоем третьей категории III	Водоем четвертой категории IV	Водоем пятой категории V
4. ИПУ > ИПТ = ИПК	0,010	0,018	0,005	0,002	0,000
5. ИПУ > ИПК > ИПТ	0,007	0,012	0,008	0,009	0,000

Вторым ключевым объектом являлась Невская губа восточной части Финского залива. Результаты интегральной оценки ИПЭС для этого объекта приведены в табл. 5. При построении ИПЭС нами использовались рекогносцировочные данные для задания характеристик при расчетах субиндексов ИПТ, ИПК, ИПУ различных районов Невской губы. Было выполнено несколько вариантов оценочных расчетов, отличающихся заданием величин расчетных характеристик. Пример расчета приведен в табл. 5.

Таблица 5

Интегральный показатель экологического статуса для характерных условий района Невской губы Финского залива при разных приоритетах в свертки субиндексов
Integral indicator of ecological status for characteristic conditions of the Nevskaya Bay of the Gulf of Finland at different priorities in convolution of sub-indices

Номер варианта и приоритет ИП	Водоем первой категории I	Водоем второй категории II	Водоем третьей категории III	Водоем четвертой категории IV	Водоем пятой категории V
1. ИПТ = ИПК = ИПУ	0,000—0,171	0,171—0,323	0,323—0,488	0,488—0,728 ¹⁾ 0,608 0,495 (IVл)	0,728—1,000
2. ИПТ > ИПК = ИПУ	0,000—0,203	0,203—0,364	0,364—0,530 0,447 0,494 (IIIп)	0,530—0,767	0,767—1,000
3. ИПК > ИПТ = ИПУ	0,000—0,157	0,157—0,315	0,315—0,456 0,389 0,435 (IIIп)	0,456—0,684	0,684—1,000
4. ИПУ > ИПТ = ИПК	0,000—0,152	0,152—0,289	0,289—0,479	0,479—0,732 0,606 0,560 (IVл)	0,732—1,000
5. ИПУ > ИПК > ИПТ	0,000—0,147	0,147—0,287	0,287—0,467	0,467—0,716 0,592 0,561 (IVс)	0,716—1,000

Примечание. 1) в первой строке таблицы даны левая и правая границы классов; ниже — середина класса; еще ниже — результат оценки ИПЭС. В скобках римской цифрой дан класс с указанием близости к левой (л), правой (п) границе или к середине (с) класса

Из табл. 5 следует, что ИПЭС Невской губы для пяти вариантов задания приоритетов (весов) на последнем уровне свертки (ИПЭС = ИПТ + ИПК + ИПУ) в трех вариантах относится к левой границе — середине IV класса и в двух вариантах — к правой границе III класса. В последнем случае с учетом среднеквадратического отклонения ИПЭС также попадает в IV класс.

Заключение

Усовершенствованы теоретико-методологические представления об экологическом статусе водоема на основе:

— исследования способности водной экосистемы продуцировать органическое вещество;

— оценки изменения качества и токсического загрязнения воды;

— оценки устойчивости водного объекта к изменению параметров естественного и антропогенного режимов.

Потенциальная устойчивость водоема оценивалась на основе авторской методики оценки устойчивости к изменению естественного режима или устойчивости к изменению физико-географических условий, климатических и гидрологических особенностей объекта. В работе приведен опыт одновременного учета потенциальной устойчивости, продуктивности, качества и токсического загрязнения воды при построении интегрального показателя экологического статуса (ИПЭС) водоема. В оценку экологического статуса включены 11 критериев оценки трофности водоема (3 субиндекса ИПТ1, ИПТ2, ИПТ3), 14 критериев оценки качества и токсического загрязнения воды (3 субиндекса ИПК1, ИПК2, ИПК3), 30 критериев оценки потенциальной устойчивости водоема к изменению параметров естественного режима. При этом используются 15 критериев для оценки адаптационной устойчивости: ИП1а, ИП2а, ИП3а (3 субиндекса) и 15 — для оценки регенерационной устойчивости: ИП1р, ИП2р, ИП3р (3 субиндекса); субиндексы ИПУа, ИПУр, ИПУ и композитный индекс последнего уровня свертки ИПЭС. Получены и приведены в статье все оценочные шкалы рассчитанных субиндексов. Описаны этапы и технология построения ИП. Для построения субиндексов применялась АСПИД-методология (Анализ и Синтез Показателей при Информационном Дефиците) с учетом использования нечисловой информации для получения оценочных результатов. На примере малого озера в северо-западном Приладожье (оз. Суури) показано, что водоем в течение 6 лет сохранял свой экологический статус в пределах II—III классов по шкале ИПЭС при разных приоритетах учета субиндексов в оценке ИПЭС. Второй объект (Невская губа) оценен III—IV классами с наиболее вероятным попаданием в IV класс.

В результате выполненной работы показана возможность оценки экологического статуса водоема на основе построения композитных индексов с учетом использования нечисловой информации при моделировании весов (приоритетов) на последнем уровне свертки субиндексов. Выполнена оценка точности расчета приоритетов (весов) и значений ИПЭС в рассмотренных примерах и вариантах.

Список литературы

1. Studbooks.net: [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://studbooks.net/882915/pravo/ekologicheskiy_status_chast_konstitutsionnogo_statusa_grazhdanina (дата обращения: 02.05.2024).
2. Солнцев А. М. Защита экологических прав человека: учебное пособие. / 3-е изд., перераб. и доп. Москва: РУДН. 2021. 516 с.
3. Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года (утв. Президентом РФ 30.04.2012). 2012. 12 с.

4. Адамович Б. В. Трофический статус как важный показатель экологического состояния водных экосистем / Сахаровские чтения 2021 года: экологические проблемы XXI века: материалы 21-й международной научной конференции, 20—21 мая 2021 г., Минск, Республика Беларусь: в 2 ч. 2021. Ч. 2. С. 153—155.
5. Dodds W. K., Cole J. J. Expanding the concept of trophic state in aquatic ecosystems: It's not just the autotrophs // *Aquatic Science*. 2007. V. 69. P. 427—439.
6. Brousmichea D., Occellia F., Geninb M. et al. Spatialized composite indices to evaluate environmental health inequalities: Meeting the challenge of selecting relevant variables. *Ecological Indicators*. 2020;(111) 106023. URL.: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106023>. (дата обращения: 03.02.2020).
7. Осипов А. Г. Интегральная оценка устойчивости ландшафтов при создании сельскохозяйственных угодий природно-аграрных систем // *Вестник СПбГУ. Серия 7. Геология. География*. 2016. Вып. 3. С. 140—162. doi: 10.21638/11701/spbu07.2016.312.
8. Александрова Л. В., Васильев В. Ю., Дмитриев В. В. и др. Многокритериальные географо-экологические оценки состояния и устойчивости природных и урбанизированных систем. / Под ред. В. В. Дмитриева и Н. В. Хованова. Деп. ВИНТИ 01.09.2000, № деп.2342В00, 275 с.
9. Овсепян А. А., Панютин Н. А., Дмитриев В. В. Потенциальная устойчивость водоема: от балльно-индексных оценок к интегральной оценке на основе композитных индексов // *Международный студенческий научный вестник*. 2024. № 1. doi: 10.17513/msnv.21434.
10. 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. 73 p.
11. Istak A., Nibedita D., Jatan D. et al. Flood hazard zonation using GIS-based multi-parametric Analytical Hierarchy Process Geosystems and Geoenvironment Volume 3, Issue 2, May 2024, 100250. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772883823000730?via%3Dihub>.
12. Хованов Н. В. Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. СПб: Изд-во СПбГУ, 1996. 196 с.
13. Корников В. В., Хованов Н. В., Юдаева М. С. Многокритериальная классификация в условиях дефицита числовой информации // *Труды Карельского научного центра РАН* № 5. 2012. С. 38—43.
14. Архипов Д. Э., Едемский К. Е., Кожевникова С. И. и др. Развитие мониторинга водных объектов на основе интегральной оценки экологического статуса и моделирования экологических функций // *Европейский журнал естественной истории*. 2022. №2. С. 31—37.
15. Зырянова Д. С., Немчинова А. В., Дмитриев В. В. Пространственно-временная изменчивость химического и биологического состава и физических свойств водной экосистемы малого озера в северо-западном Приладожье // *Международный студенческий научный вестник*. 2024. № 1. doi: 10.17513/msnv.21433.
16. Почепко С. Ю., Каспин М. О., Дмитриев В. В. Оценка влияния факторов на экологические функции и продукционно-деструкционные отношения в водной экосистеме // *Международный студенческий научный вестник*. 2024. № 1. doi: 10.17513/msnv.21435.

References

1. Studbooks.net: [Electronic resource]. Access mode: https://studbooks.net/882915/pravo/ekologicheskij_status_chast_konstitutsionnogo_statusa_grazhdanina (access date: 02.05.2024).
2. Solntsev A. M. *Zashchita ekologicheskikh prav cheloveka: uchebnoye posobiye = Protection of environmental human rights: textbook*. / 3rd ed., revision and addendum. Moscow: PFUR, 2021: 516 p. (In Russ.)
3. Fundamentals of state policy in the field of environmental development of the Russian Federation for the period up to 2030 (approved by the President of the Russian Federation 30.04.2012). 2012; 12 p. (In Russ.)
4. Adamovich B. V. Trophic status as an important indicator of the ecological state of aquatic ecosystems / *Sakharov Readings 2021: environmental problems of the XXI century: proceedings of the 21st International Scientific Conference, May 20-21. 2021, Minsk, Republic of Belarus: in 2 parts. 2021; PART 2: (153—155)*. (In Russ.)

5. Dodds W. K., Cole J. J. Expanding the concept of trophic state in aquatic ecosystems: It's not just the autotrophs. *Aquatic Science*. 2007; (69): 427—439.
6. Brousmichea D., Occellia F., Geninb M. et al. Spatialized composite indices to evaluate environmental health inequalities: Meeting the challenge of selecting relevant variables. *Ecological Indicators*. 2020; (111) 106023. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.106023.
7. Osipov A. G. Integrated assessment of sustainability of landscapes in the creation of agricultural land natural agricultural systems. *Vestnik VGU, Seriya: Geology. Geography = VSU Bulletin, Series: Geology. Geography*, 2016; (3): (140—162). (In Russ.). doi: 10.21638/11701/spbu07.2016.312.
8. *Multicriteria geographic and ecological assessments of the state and sustainability of natural and urbanized systems*. Edited by V. V. Dmitriev and N. V. Hovanov. Deposited to VINITI on 01.09.2000, dep. 2342B00, 275 p. <https://proxy.library.spbu.ru:3693/item.asp?id=30689943> (дата обращения: 28.11.2020) (In Russ.).
9. Ovsepyan A. A., Panyutin N. A., Dmitriev V. V. Potential water body stability: from point-index assessments to integral assessment based on composite indices. *Mezhdunarodnyy studentcheskiy nauchnyy vestnik = International Student Scientific Bulletin*. 2024; 1. doi: 10.17513/msnv.21434 (in Russ.).
10. 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. 73 p.
11. Istak A., Nibedita D., Jatan D. et al. Flood hazard zonation using GIS-based multi-parametric Analytical Hierarchy Process Geosystems and Geoenvironment 2024; 3(2): 100250. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772883823000730?via%3Dihub>
12. Hovanov N. V. *Analiz i sintez pokazateley pri informatsionnom defitsite = Analysis and synthesis of indicators for information deficit*. SPb. Publishing house of SPb University. 1996: 196 p. (In Russ.).
13. Kornikov B. V., Hovanov N. V., Yudaeva M. S. Multicriteria classification under conditions of numerical information deficit. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012; 5: (48—43). (In Russ.).
14. Arkhipov D. E., Edemsky K. E. E., Kozhevnikova S. I. et al. Development of monitoring of water bodies on the basis of integral assessment of ecological status and modeling of ecological functions. *Yevropeyskiy zhurnal yestestvennoy istorii = European Journal of Natural History*. 2022; (2): (31—37). (In Russ.).
15. Zyryanova D. S., Nemchinova A. V., Dmitriev V. V. Spatial and temporal variability of chemical and biological composition and physical properties of aquatic ecosystem of a small lake in the northwestern Priladozhye. *Mezhdunarodnyy studentcheskiy nauchnyy vestnik = International Student Scientific Bulletin*. 2024; 1. doi: 10.17513/msnv.21433 (in Russ.).
16. Pochepko S. Y., Kaspin M. O., Dmitriev V. V. Assessment of the influence of factors on ecological functions and production-destruction relations in aquatic ecosystem. *Mezhdunarodnyy studentcheskiy nauchnyy vestnik = International Student Scientific Bulletin*. 2024; 1. doi: 10.17513/msnv.21435 (in Russ.).

Информация об авторах

Василий Васильевич Дмитриев, доктор географических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, профессор, v.dmitriev@spbu.ru.

Виктор Юрьевич Третьяков, кандидат географических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, доцент, v_yu_tretyakov@mail.ru.

Дарья Сергеевна Зырянова, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, студент, evienche13@gmail.com.

Анайит Арамовна Овсеян, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, студент, annahit2002@mail.ru.

София Юрьевна Почепко, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, студент, roschepkosofia@gmail.com.

Анастасия Владимировна Немчинова, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, студент, st086233@student.spbu.ru.

Михаил Олегович Каспин, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, студент, st087575@student.spbu.ru.

Information about authors

Vasily V. Dmitriev, Doctor of Geographical Sciences, Professor, St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Professor, v.dmitriev@spbu.ru.

Victor Yu. Tretyakov, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Associate Professor, v_yu_tretyakov@mail.ru.

Daria S. Zyryanova, St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, student, evienche13@gmail.com.

Anayit A. Ovsepyan, St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, student, anna-hit2002@mail.ru.

Sofia Yu. Pochepko, St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, student, pochepko-sofia@gmail.com.

Anastasia V. Nemchinova, St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, student, st086233@student.spbu.ru.

Mikhail O. Kaspin, St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, student, st087575@student.spbu.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 01.05.2024

Принята к печати после доработки 30.05.2024

The article was received on 01.05.2024

The article was accepted after revision on 30.05.2024