

УДК 504.05

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СТАТУСА С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ И ЭМЕРДЖЕНТНЫМИ СВОЙСТВАМИ ВОДНОГО ОБЪЕКТА

Н. А. Панютин^{1*}, В. В. Дмитриев¹, Е. А. Примак²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет (Университетская набережная, 7-9, Санкт-Петербург, Россия, 199034), *nic9898@yandex.ru

² Российский государственный гидрометеорологический университет (Воронежская ул., 79, Санкт-Петербург, Россия, 192007)

Актуальность исследования определяется необходимостью совершенствования современных методов оценки экологического и геоэкологического статуса природных объектов как сложных систем при различном сочетании их состава, свойств и приоритетов оценочных исследований. Традиционно при решении проблемы выбора нормирующей функции как этапа построения интегральных показателей в научных публикациях не обсуждаются вид связи (прямая или обратная) и возможность учета нелинейности связи параметров с оцениваемым системным свойством. В работе продемонстрировано сравнение результатов интегральной оценки экологического статуса, полученных с помощью различных моделей-классификаций, с учетом использования в нормирующих функциях как линейных, так и нелинейных способов отображения взаимосвязи между параметрами и свойствами системы. Сравнение выполнено на уровне количественной оценки субиндексов и итогового значения интегрального показателя экологического статуса водоема (ИПЭС) в реализованных вариантах. В качестве ключевого водоема выбрано озеро Волковское (Суури) на севере Карельского перешейка. Для озера собрана обширная база данных по физическим, химическим и биологическим параметрам, связанным с определением трофности, качества и токсического загрязнения воды, потенциальной устойчивости водоема, позволившим оценить его экологический статус. Первая задача исследования – установить, сильно ли изменятся значения субиндекса трофности (ИПТ) с введением нелинейной связи между критериями оценки и индексом трофности. Варианты изменения значений, учитывающих степень нелинейности λ в приведенных в статье нормирующих функциях, включали только положительные значения: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0. Основная задача исследователя – в будущих оценках обосновать значение данного параметра для каждого учитываемого критерия. Эксперименты проводились в упрощенном варианте. Параметр λ задавался одним для всех критериев, входящих в субиндекс ИПТ. Вторая задача – выяснить, насколько изменится ИПЭС с учетом нелинейности связи в индексе ИПТ и изменения приоритетов (весов) учета субиндекса ИПТ на последнем этапе свертки. При этом для остальных учитываемых субиндексов (субиндекс качества воды ИПК и субиндекс потенциальной устойчивости ИПУ) сохранялась линейная связь параметров с оцениваемым свойством на всех этапах свертки показателей. Расчеты представлены в графической и табличной форме.

В результате исследования выявлено, что изменение параметра λ в сторону уменьшения степени нелинейности дает в итоге сдвиг вправо по оценочной шкале ИПЭС, а при увеличении этого параметра отмечено, что значения ИПЭС сдвигаются влево по оценочной шкале. Рассмотрены варианты изменения степени нелинейности и приоритета (веса) ИПТ в оценке ИПЭС.

Ключевые слова: экологический статус; трофический статус; интегральная оценка; нормирующие функции; показатель степени нелинейности λ

Для цитирования: Панютин Н. А., Дмитриев В. В., Примаков Е. А. Интегральная оценка экологического статуса с учетом нелинейности взаимосвязи между параметрами и эмерджентными свойствами водного объекта // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 6. С. 119–130. doi: 10.17076/lim2210

Финансирование. 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» СПбГУ. Регистрационный номер НИОКТР: АААА-А19-119022790015-9.

N. A. Paniutin^{1*}, V. V. Dmitriev¹, E. A. Primak². INTEGRAL ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATUS TAKING INTO ACCOUNT THE NONLINEAR RELATIONSHIP BETWEEN PARAMETERS AND EMERGENT PROPERTIES OF THE WATER BODY

¹ St. Petersburg State University (7-9 Universitetskaya Nab., 199034 St. Petersburg, Russia), *nic9898@yandex.ru

² Russian State Hydrometeorological University (79 Voronezhskaya St., 192007 St. Petersburg, Russia)

The study is warranted by the need to improve the methods for assessing the ecological and geoecological status of natural features as complex systems for various combinations of their composition, properties, and priorities of evaluative research. Traditionally, when solving the problem of selecting a normalization function as a stage in constructing integral indicators, scientific publications do not discuss the nature of the relationship (direct or inverse) or the possibility of accounting for nonlinearity between the system's parameters and the property under assessment. This paper demonstrates a comparison of the results of an integrated ecological status assessment obtained by various classification models, taking into account both linear and nonlinear methods of representing the relationship between parameters and system properties in normalization functions. The comparison was performed at the level of quantitative estimates of sub-indices and the final value of the integrated water body ecological status indicator (IESI). The key water body selected for this study is Lake Volkhovskoe (Suuri) on northern Karelian Isthmus. An extensive database was compiled for this lake, including physical, chemical, and biological parameters related to the trophic status, water quality, toxic contamination, and potential resilience, which allowed for an assessment of its ecological status. The first task was to determine how much the values of the trophic sub-index (TSI) would change upon factoring in a nonlinear relationship between evaluation criteria and the trophic index. The variants considering different degrees of nonlinearity λ in the normalization functions presented in this paper included only positive values: 0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 3.0. The main challenge for future assessments is to substantiate an appropriate value for this parameter for each criterion considered. Experiments were conducted in a simplified form. The parameter λ was set to a single value for all criteria included in the TSI sub-index. The second task was to determine how much the IESI would change when accounting for nonlinearity in the TSI index and adjusting the priorities (weights) assigned to TSI during the final convolution stage. Meanwhile, linear relationships between parameters and system properties were maintained for other sub-indices (water quality sub-index WQTP1 and potential resilience sub-index WBRI) throughout all convolution steps. The calculations are presented both graphically and in tabular form. The study revealed that a reduction in λ , and thus in nonlinearity, shifts values on the IESI evaluation scale to the right, while an increasing in λ causes a shift to the left on this scale. Variations in both nonlinearity degree and priority (weight) assigned to TSI during IESI assessment were considered.

Keywords: ecological status; trophic status; integral assessment; normalization functions; nonlinearity degree parameter λ

For citation: Paniutin N. A., Dmitriev V. V., Primak E. A. Integral assessment of the ecological status taking into account the nonlinear relationship between parameters and emergent properties of the water body. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 6. P. 119–130. doi: 10.17076/lim2210

Funding. The study was supported by RFBR grant #19-05-00683-a “Theoretical methodological rationale, mathematical toolkit and models for integral assessment of the ecological status and ecological wellbeing of water bodies” to St. Petersburg State University. R&D action ID: AAAA-A19-119022790015-9.

Введение

Многокритериальные и интегральные оценки экологического состояния наземных и водных экосистем, их интегративных (эмерджентных) свойств и функций, факторов, влияющих на них, получили большое распространение в научных публикациях конца XX – начала XXI в. Особый интерес со стороны научного сообщества и общественности вызывают такие интегративные свойства, как продуктивность, качество и токсическое загрязнение среды, устойчивость (уязвимость) наземных экосистем и водных объектов суши, особенно объектов с замедленным водообменом – озер и водохранилищ, находящихся в существующих или планируемых местах влияния на них общества и использующихся им как источники чистой и пресной воды.

Теоретико-методологические подходы к оценке интегративных свойств и функций сложных систем в природе и обществе в условиях дефицита информации и неопределенности суждений об их составе и свойствах заложены в конце 1990-х гг. и приводятся в трудах проф. СПбГУ Н. В. Хованова, его соавторов и учеников [Хованов, 1996, 1998; Александрова и др., 2000; Мякишева, 2009; Корников и др., 2012 и др.].

В последние годы широкое развитие получила идея оценки экологического (ЭС) и геоэкологического (ГЭС) статуса природных объектов (в англоязычной литературе этот термин чаще употребляется как «ecological status»). В литературе их определение имеет множество смысловых значений и коннотаций. В первом примере авторы нацеливаются прежде всего на оценку качества среды всех геосфер Земли [Brousseau et al., 2020], в другом случае на первый план выходит оценка устойчивости системы, поскольку авторы считают, что «здоровая система» прежде всего должна быть устойчивой к изменению своих свойств и параметров режимов («здоровье экосистемы», по их мнению, связано с устойчивостью: если устойчивость нарушена, то такая экосистема теряет свой

исходный (здоровый) статус) [Haskell et al., 1992; Meyer, 1997; Chessman, 2002], в третьем случае для оценки геоэкологического статуса водоемов авторы рекомендуют прежде всего оценивать загрязнение донных отложений водоемов [Даувальтер, 2012].

Актуальность исследования определяется необходимостью совершенствования современных методов оценки ЭС и ГЭС природных объектов как сложных систем при различном сочетании их состава, свойств и приоритетов оценочных исследований.

Одно из последних определений ЭС авторов статьи для оценки интегративных свойств водных объектов сформулировано следующим образом: экологический статус водоема – это его интегративное свойство, которое определяется сочетанием его способностей: 1 – продуцировать органическое вещество (в работе эта способность будет характеризоваться как «трофность» (кормность) и выражаться субиндексом ИПТ – интегральный показатель трофности); 2 – изменять химический и биологический состав, качество и токсическое загрязнение воды (субиндекс ИПК); 3 – сохранять потенциальную устойчивость (ИПУ), под которой понимается устойчивость к изменению физико-географической среды, климатических и гидрологических характеристик и элементов режимов [Панютин, Дмитриев, 2024]. Ранее нами в оценку экологического состояния были введены два этапа: *экологическая регламентация* и *экологическое нормирование*; позднее определены *геоэкологическая регламентация*, под которой понимался анализ параметров состояния антропогенно трансформированной геосистемы, определение интервалов изменений элементов ее режимов (естественного и антропогенного), выявление пороговых и критических величин этих параметров, и *геоэкологическое нормирование* антропогенного воздействия на геосистему, при котором можно оценить реакцию системы в целом или какого-либо ее критического звена на это воздействие. Под критическим

звеном понималась наиболее уязвимая (слабая) экосистема. Это означало, что допустимая нагрузка на эту экосистему принимается в качестве допустимой нагрузки для геосистемы в целом [Дмитриев, 2020].

Работа с оценочными шкалами, выбранными для построения субиндексов (экологическая квалиметрия), предполагает работу с ГОСТами, авторскими шкалами, с последующим переходом от натуральных значений характеристик x_i к их нормированным значениям q_i или $q_i(x_i)$. Для этого предлагались разные нормирующие функции, от простейшей функции «минимакса» вида $x_i/\max_i$ до различных аналитических функций, приведенных в [Воробейчик и др., 1994]. Однако эти и близкие к ним функции традиционно не учитывают нелинейность связи характеристик с оцениваемым свойством и вид связи (прямая – обратная). Чаще всего такие возможности вообще не оговариваются авторами или подразумевается, что все x_i положительно связаны с изменением оцениваемого свойства или состояния системы. Не все нормирующие функции включают в себя $\min$, $\max$ и дополнения, позволяющие работать со значениями $<\min$ и $>\max$. В связи с этим в наших исследованиях, по рекомендации Н. В. Хованова [1996], q_i предлагается получать с помощью нормирующих функций вида (1) и (2):

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

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

Графически они имеют вид, представленный на рис. 1.

Функция (1) используется в случае, если увеличение значения i -й исходной характеристики не приводит к снижению интегративного свойства (качества), оцениваемого с точки зрения i -го критерия. При этом всем параметрам x_i с показателями, не превосходящими некоторого фиксированного уровня $\min_i$, приписывается минимальное значение i -го нормированного показателя, а параметрам со значениями x_i , превосходящими фиксированный уровень, приписывается $\max_i$ – максимальное значение этого показателя. Исследователь также должен задать показатель степени λ , который определяет характер и степень выпуклости нормирующей функции $q_i(x_i)$. В случае неубывающей функции (1) при $\lambda > 1$ нормирующая функция выпукла вниз, а при $\lambda < 1$ – вверх. Последнее требование, как правило, либо не оговаривается авторами, либо во всех случаях принимается $\lambda = 1$ на том основании, что на первом этапе исследований будем исходить из того, что все x_i линейно связаны с оцениваемым свойством. После этого логично показать, насколько сильно изменится полученный результат с учетом нелинейности взаимосвязи между параметрами и оцениваемым свойством природного объекта (системы). Но в подавляющем

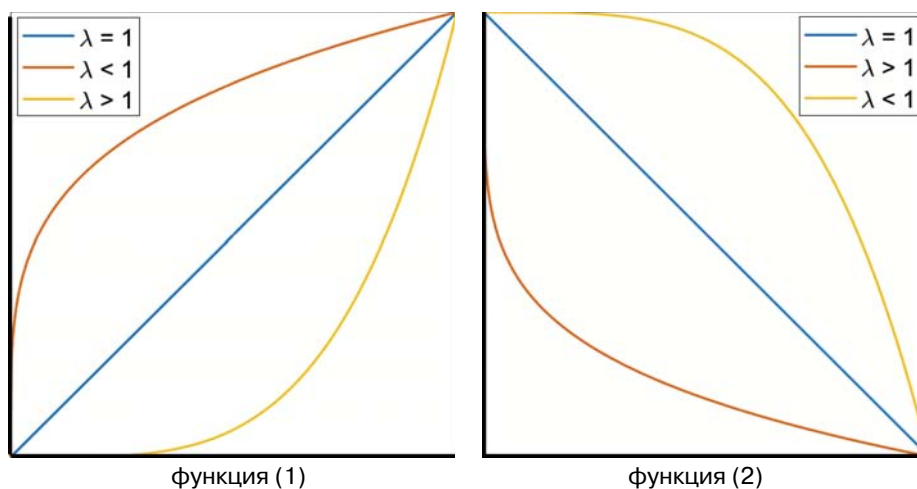


Рис. 1. Примеры возрастающей (1) и убывающей (2) нормирующих функций, использующихся для получения нормированных значений исходных показателей

Fig. 1. Increasing (1) and decreasing (2) normalization functions used to obtain normalized values of the initial indicators

большинстве случаев этого не делается. Более подробно использование нормирующих функций описано в работе [Novanov et al., 2009].

Целью работы является сравнение результатов интегральной оценки ЭС, полученных на разных моделях-классификациях при условии использования в нормирующих функциях линейного представления взаимосвязи параметров с исследуемым свойством системы и нелинейным представлением этой связи. Также работа нацелена на сравнение количественной оценки субиндексов и конечного результата расчетов интегрального показателя экологического статуса водоема (ИПЭС) в этих подходах. По опыту исследований ранее нами отмечено, что многие связи между параметром и оцениваемым свойством в природных системах являются нелинейными, но, как правило, это не учитывается при нормировании. Отмечено также, что их использование позволяет привести оценочные шкалы к более равномерному виду, при этом устраняется часто встречающаяся проблема, когда в один класс входит 50–70 % от всей оценочной шкалы, поскольку, например, максимум значения одной или нескольких характеристик в шкалах был задан неоправданно высоким [Примаков, 2009]. В другом случае авторы предлагают решать эту проблему на основе других приемов [Фрумин, Малышева, 2020].

В статье рассмотрены сценарии, при которых λ имеет различные значения, определяемые видом связи (1) или (2). На примере расчета интегрального показателя трофического статуса (ИПТ), входящего в качестве одного из трех

субиндексов в модель-классификацию интегрального показателя экологического статуса (ИПЭС), будут также получены сравнительные оценки влияния λ на изменение ИПЭС водоема.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбрана экосистема малого озера в Северо-Западном Приладожье (оз. Волковское, или Суури), находящегося в северо-восточной части Карельского перешейка (Приозерский муниципальный район Ленинградской области) (рис. 2). Озеро Волковское связано с крупнейшим озером Европы – Ладожским – через ручей Мянтылампи. Расстояние до Ладоги составляет 1,5 км. Озеро небольшое: его площадь около 0,3 км² (без учета островов), максимальная глубина – 5,5 м [Кузнецов, Субетто, 2019].

На западном берегу озера находится учебно-научная база Санкт-Петербургского государственного университета «Приладожская». На базе с 1986 по 2023 г. проводились учебные практики по дисциплинам, связанным с оценкой экологического состояния водных объектов. В результате собрана обширная информационная база по параметрам и создана «База данных для выявления экологического статуса и факторов массообмена в водной экосистеме на примере озера Суури (LAKE-SUURI-ECOSYSTEM)» [Седова и др., 2019]. На основе информации, содержащейся в БД, подготовлена серия статей с характеристикой экологического состояния водоема в разные годы [Dmitriev et al., 2020].

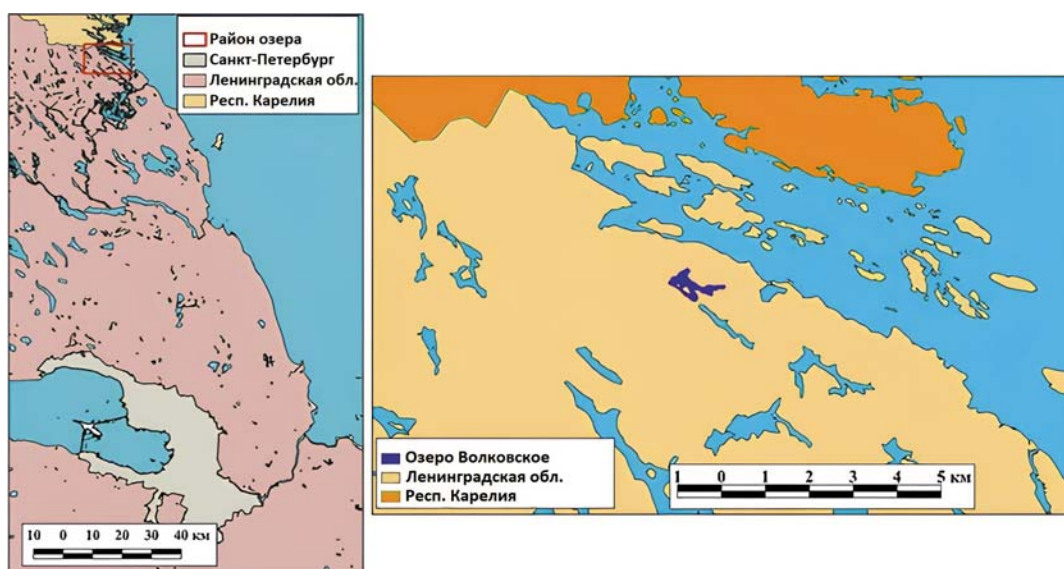


Рис. 2. Картосхема расположения оз. Волковское (Суури)

Fig. 2. Schematic map of the location of Lake Volkovskoye (Suuri)

Для определения ИПТ водных объектов были построены три авторских модели-классификации, одна из которых приведена в табл. 1. Внешний вид всех оценочных шкал для других моделей-классификаций представлен ранее в работе [Почепко и др., 2024].

Данная модель включает 16 параметров, объединенных в три субиндекса. Первый субиндекс представлен интегральным показателем трофности. Он, в свою очередь, включал три субиндекса второго порядка – ИПТ1, ИПТ2, ИПТ3. В состав ИПТ1 вошли 4 гидрофизических критерия; в ИПТ2 включены 5 гидрохимических параметров; в ИПТ3 вошли 7 гидробиологических характеристик. В табл. 1 приведены оценочные шкалы для субиндексов. Для субиндекса ИПТ1 выбраны: 1 – прозрачность воды по белому диску, м; 2 – отношение прозрачности к глубине; 3 – взвешенные вещества, мг/дм³; 4 – электропроводность, мкСм/см. Для ИПТ2 выбраны: 5 – рН при 100% насыщении воды кислородом; 6 – концентрация растворенного кислорода, в % насыщения; 7 – БПК₅, мг О₂/л; 8 – концентрация общего азота, N_{общ}, мкг/л; 9 – концентрация общего фосфора, P_{общ}, мкг/л. Для ИПТ3 выбраны: 10 – продукция фитопланктона, мг С/л · сут; 11 – скорость фотосинтеза, мг О/л · сут; 12 – концентрация хлорофилла а, мкг/л; 13 – разность суточной продукции и деструкции (Ф–Д), мг О₂/л · сут; 14 – средняя биомасса фитопланктона в период вегетации, мг/л; 15 – фильтрационная активность зоопланктона, сут⁻¹; 16 – время осветления воды зоопланктоном, сут.

В модели класс «мезотрофия» разделен авторами на два (мезотрофия-1 и мезотрофия-2), поскольку в большинстве случаев в исследуемых водоемах встречаются различные оттенки мезотрофии. Большинство озер Северо-Запада России также попадает в мезотрофный класс. Кроме того, для большинства наших моделей-классификаций используется 5 классов трофности, качества воды, устойчивости. Такой прием позволил и в данном случае также сохранить 5 классов для ИПТ и других субиндексов при оценке ИПЭС.

В ИПТ ряд шкал (например, шкала прозрачности и концентрации хлорофилла а) получены путем предварительного равновесного сложения нескольких известных авторских шкал. После этого они были включены в представленную модель-классификацию.

Для построения ИПТ необходимо принять решение о количестве классов оценивания и о том, какой результат нормирования характеристик будет соответствовать нулю и какой – единице. В наших моделях ноль чаще соответствует левой границе первого класса, а единица – правой границе последнего класса. Но это зависит от предпочтений авторов. Если, например, первый класс является наиболее продуктивным (а в оценке качества воды – наиболее чистым), то, по логике других авторов, следует приписать левому значению первого класса результат нормирования равный 1,0. В нашем случае, напротив, минимальному значению $q_i = 0$ соответствует левая граница первого (олиготрофного) класса, а максимальному значению трофности соответствует $q_i = 1$ (правая граница

Таблица 1. Модель-классификация интегральных показателей ИПТ1, ИПТ2, ИПТ3 при равных приоритетах учета исходных характеристик в субиндексах

Table 1. Model-classification of the integral indicators TSI1, TSI2, and TSI3 with equal priorities (weights) of the initial characteristics in sub-indices

	Тип трофии Trophic type				
	Олиготрофия Oligotrophy	Мезотрофия-1 Mesotrophy-1	Мезотрофия-2 Mesotrophy-2	Эвтрофия Eutrophy	Гипертрофия Hypertrophy
ИПТ1 TSI1	0,000–0,284	0,284–0,421	0,421–0,580	0,580–0,733	0,733–1,000
ИПТ2 TSI2	0,0–0,137	0,137–0,283	0,283–0,435	0,435–0,679	0,679–1,000
ИПТ3 TSI3	0,000–0,067	0,067–0,209	0,209–0,351	0,351–0,671	0,671–1,000
ИПТ TSI	0,000–0,163 Δ = 0,163 0,082	0,163–0,304 Δ = 0,141 0,234	0,304–0,455 Δ = 0,151 0,380	0,455–0,694 Δ = 0,239 0,574	0,694–1,000 Δ = 0,306 0,847

Примечание. Здесь и далее: ИПТ – интегральный показатель трофности. В верхней строке ИПТ даны левая и правая границы классов; Δ – разница между правой и левой границами; в нижней строке – значение ИПТ для середины класса.
 Note. Here and hereinafter: TSI – integral assessment of production potential. The left and right class boundaries are given in the top row of the TSI; Δ – difference between the right and left boundaries; the IPT value for the middle of the class – in the bottom row.

гипертрофии). При этом автор должен при построении модели выбирать всегда один из двух подходов, не меняя выбора при переходе к другим субиндексам. Также необходимо проверять правильность выбора нормирующей функции при переходе от первого варианта ко второму.

Этап нормирования включает в себя также выбор (обоснование) параметра λ , если учитывается нелинейность взаимосвязи параметра с оцениваемым свойством системы. Именно этот параметр определяет конкретный вид функции и степень ее нелинейности. В данной статье авторы не дают рекомендаций по определению указанного параметра на основе имеющейся у исследователя информации. Этот вопрос будет рассмотрен в других публикациях. Самый простой прием – подбор λ вручную или на основе стандартной или авторской компьютерной программы по имеющейся у исследователя натурной информации. Отметим, что выявленная на основе одного водоема нелинейная связь не является универсальной и пригодной для задания в других водоемах. Однако опыт, полученный при подборе λ , будет полезен при работе

с другими водоемами. Как указано выше, самое простое построение нормирующих кусочно-линейных функций получается при подстановке в формулы (1) и (2) $\lambda = 1$. Результаты этого варианта представлены в табл. 1.

Результаты

Рассмотрим изменение кривых значений q_i для середин классов трофности (олиготрофия, мезотрофия, эвтрофия, гипертрофия) при задании разных значений параметра λ (рис. 3). Для лучшей иллюстрации два класса мезотрофии объединены в один, а граница между ними выбрана как середина класса. Анализ рис. 3 позволяет прийти к выводу, что для положительных значений λ при $\lambda < 1$ функция выпукла вверх (в экспериментах также добавлены следующие значения λ : 0,25; 0,1; 0,05; 0,01), а при $\lambda > 1$ функция выпукла вниз. Чем сильнее отличие от 1,0 параметра λ в обе стороны, тем кривые более выпуклые. Ниже приведены также значения в виде схем (для середин классов) и в табличной форме (табл. 2).

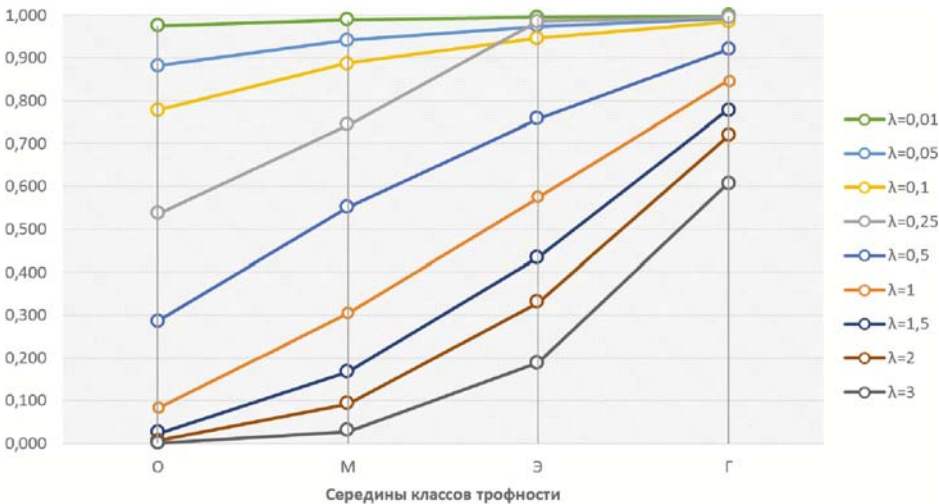


Рис. 3. Кривые нормированных значений для середин классов трофности при различных λ

Fig. 3. Curves of normalized mean trophic class values at different λ values

Таблица 2. Средние значения классов ИПТ при разных λ для нормированных шкал

Table 2. Average TSI class values at different λ for normalized scales

Показатель λ Index λ	Тип трофии Trophic type				
	Олиготрофия Oligotrophy	Мезотрофия-1 Mesotrophy-1	Мезотрофия-2 Mesotrophy-2	Эвтрофия Eutrophy	Гипертрофия Hypertrophy
0,5	0,231	0,413	0,562	0,736	0,918
1	0,072	0,208	0,360	0,565	0,844
1,5	0,026	0,118	0,249	0,448	0,779
2	0,011	0,073	0,180	0,364	0,722
3	0,002	0,031	0,101	0,254	0,623

Далее был рассчитан субиндекс ИПТ для разных вариантов, которые затем использовались в расчетах ИПЭС. Наиболее простой вариант, при котором $\lambda = 1$, показывает, что оз. Волковское попадает во II класс трофности (ИПТ = 0,285), ближе к середине класса (т. е. в нашей классификации относится к классу «мезотрофия-1»). В этом варианте задания ИПТ индекс ИПЭС получается равным 0,344 и озеро попадает в левую границу III класса.

Затем необходимо было ответить на вопрос, как изменится ИПЭС при изменении приоритетов на последнем уровне свертки субиндексов. В табл. 3 приведены результаты расчета оценочных шкал для трех различных

вариантов свертки показателя ИПЭС: равно-весомый вариант ИПТ = ИПК = ИПУ, вариант ИПТ > ИПК = ИПУ и вариант ИПТ > ИПК > ИПУ. Данные варианты выбраны авторами для наглядности демонстрации степени влияния параметра λ на ИПТ и через него на ИПЭС.

Построение оценочных шкал, приведенных в табл. 3, является необходимым этапом работы, поскольку изменение приоритетов учета субиндексов в сводной оценке требует своей оценочной шкалы ИПЭС. В этом случае сравнивать результаты разных вариантов необходимо не по абсолютным значениям ИПЭС, а по попаданию в определенный класс экологического статуса.

Таблица 3. Результаты построения оценочных шкал интегрального показателя экологического статуса (ИПЭС) для трех вариантов учета приоритетов (весов) на последнем уровне свертки показателей

Table 3. Results of constructing the evaluative scales for the integrated environmental status indicator (IPEC) for three priority weighting options at the final level of indicator aggregation

	Водоем первой категории (I класс) Water body of the first category (Class I)	Водоем второй категории (II класс) Water body of the second category (Class II)	Водоем третьей категории (III класс) Water body of the third category (Class III)	Водоем четвертой категории (IV класс) Water body of the fourth category (Class IV)	Водоем пятой категории (V класс) Water body of the fifth category (Class V)	Вес субиндекса при расчете ИПЭС Weight of the sub-index in the calculation of the IPEC
Вариант 1. Оценочная шкала ИПЭС для равновесных условий ИПТ = ИПК = ИПУ Version 1. Evaluative scale of the IPEC for equilibrium conditions where TSI = WQTPI = WBRI						
ИПТ TSI	0,000–0,180	0,180–0,335	0,335–0,500	0,500–0,745	0,745–1,000	0,333
ИПК WQTPI	0,000–0,193	0,193–0,408	0,408–0,599	0,599–0,802	0,802–1,000	0,333
ИПУ WBRI	0,000–0,150	0,150–0,264	0,264–0,468	0,468–0,725	0,725–1,000	0,333
ИПЭС IPEC	0,000–0,174	0,174–0,336	0,336–0,522	0,522–0,757	0,757–1,000	
Вариант 2. Оценочная шкала ИПЭС для ИПТ > ИПК = ИПУ Version 2. Evaluative scale of the IPEC for equilibrium conditions where TSI > WQTPI = WBRI						
ИПТ TSI	0,000–0,180	0,180–0,335	0,335–0,500	0,500–0,745	0,745–1,000	0,700
ИПК WQTPI	0,000–0,193	0,193–0,408	0,408–0,599	0,599–0,802	0,802–1,000	0,150
ИПУ WBRI	0,000–0,150	0,150–0,264	0,264–0,468	0,468–0,725	0,725–1,000	0,150
ИПЭС IPEC	0,000–0,177	0,177–0,335	0,335–0,510	0,510–0,751	0,751–1,000	
Вариант 3. Оценочная шкала ИПЭС для ИПТ > ИПК > ИПУ Version 3. Evaluative scale of the IPEC for equilibrium conditions where TSI > WQTPI > WBRI						
ИПТ TSI	0,000–0,180	0,180–0,335	0,335–0,500	0,500–0,745	0,745–1,000	0,636
ИПК WQTPI	0,000–0,193	0,193–0,408	0,408–0,599	0,599–0,802	0,802–1,000	0,277
ИПУ WBRI	0,000–0,150	0,150–0,264	0,264–0,468	0,468–0,725	0,725–1,000	0,086
ИПЭС IPEC	0,000–0,181	0,181–0,349	0,349–0,526	0,526–0,758	0,758–1,000	

Таблицы 4–6 демонстрируют результаты расчета ИПЭС на последнем уровне свертки по приведенным выше вариантам задания приоритетов для субиндексов. В этих таблицах приведены ИПЭС для пяти разных вариантов учета приоритетов (весов) на последнем уровне свертки (ИПЭС = ИПТ + ИПК + ИПУ), при которых параметр λ имеет значения 0,5; 1; 3. В отдельных ячейках также приведены все оценочные шкалы

для субиндексов и ИПЭС для всех трех вариантов заданных приоритетов. Близость результатов оценки к левой границе, середине класса или правой границе класса задается буквами «л», «с», «п» соответственно. Отметим, что наибольший вес ИПТ в оценке экологического статуса имеет в варианте 2, а наименьший – в варианте 1 (основной, равновесный вариант). В варианте 2 вес ИПТ в 2,1 раза выше, чем в варианте 1.

Таблица 4. Интегральный показатель экологического статуса (ИПЭС) для озера Волковское (Суури) при разных приоритетах на последнем уровне свертки субиндексов трофности, качества и устойчивости для ИПТ при $\lambda = 1$

Table 4. The integrated environmental status indicator (IPEC) for Lake Volkovskoe (Suuri) under different priority settings at the final level of sub-index aggregation for trophic status, quality, and sustainability at $\lambda = 1$ for TSI

Номер варианта и приоритет интегрального показателя Option number and priority of the integral indicator	Расчет ИПЭС по вариантам Calculation of IPEC by options	Водоем первой категории (I класс) Water body of the first category (Class I)	Водоем второй категории (II класс) Water body of the second category (Class II)	Водоем третьей категории (III класс) Water body of the third category (Class III)	Водоем четвертой категории (IV класс) Water body of the fourth category (Class IV)	Водоем пятой категории (V класс) Water body of the fifth category (Class V)
1. ИПТ = ИПК = ИПУ 1. TSI = WQTPI = WBRI	$0,285 \times 0,333$ $+0,238 \times 0,333$ $+0,509 \times 0,333 = 0,291$	0,000–0,174	0,174–0,336	0,336–0,522* 0,429 0,344 (IIIл)	0,522–0,757	0,757–1,000
2. ИПТ > ИПК = ИПУ 2. TSI > WQTPI = WBRI	$0,285 \times 0,700$ $+0,238 \times 0,150$ $+0,509 \times 0,150 = 0,312$	0,000–0,177	0,177–0,335 0,256 0,312 (IIп)	0,335–0,510	0,510–0,751	0,751–1,000
3. ИПТ > ИПК > ИПУ 3. TSI > WQTPI > WBRI	$0,285 \times 0,636$ $+0,238 \times 0,277$ $+0,509 \times 0,086 = 0,291$	0,000–0,181	0,181–0,349 0,265 0,291 (IIс)	0,349–0,526	0,526–0,758	0,758–1,000

Примечание. *Здесь и далее: в первой строке даны левая и правая границы классов; во второй – середина класса; в нижней – результат оценки ИПЭС. В скобках римской цифрой определен класс с указанием близости к левой (л), правой (п) границе или к середине (с) класса.

Note. *Hereinafter: the first row provides the left and right boundaries of the classes; below are the class midpoints; further, the result of the IPEC assessment is given. In parentheses, a Roman numeral indicates the class, specifying its proximity to the left (л), right (п), or middle (с) of the class.

Таблица 5. Интегральный показатель экологического статуса (ИПЭС) для озера Волковское (Суури) при разных приоритетах на последнем уровне свертки субиндексов трофности, качества и устойчивости для ИПТ при $\lambda = 0,5$

Table 5. The integrated environmental status indicator (IPEC) for Lake Volkovskoe (Suuri) under different priority settings at the final level of sub-index aggregation for trophic status, quality, and sustainability at $\lambda = 0,5$ for TSI

Номер варианта и приоритет интегрального показателя Option number and priority of the integral indicator	Расчет ИПЭС по вариантам Calculation of IPEC by options	Водоем первой категории (I класс) Water body of the first category (Class I)	Водоем второй категории (II класс) Water body of the second category (Class II)	Водоем третьей категории (III класс) Water body of the third category (Class III)	Водоем четвертой категории (IV класс) Water body of the fourth category (Class IV)	Водоем пятой категории (V класс) Water body of the fifth category (Class V)
1. ИПТ = ИПК = ИПУ 1. TSI = WQTPI = WBRI	$0,534 \times 0,333$ $+0,238 \times 0,333$ $+0,509 \times 0,333 = 0,427$	0,000–0,174	0,174–0,336	0,336–0,522 0,429 0,427 (IIIс)	0,522–0,757	0,757–1,000
2. ИПТ > ИПК = ИПУ 2. TSI > WQTPI = WBRI	$0,534 \times 0,700$ $+0,238 \times 0,150$ $+0,509 \times 0,150 = 0,486$	0,000–0,177	0,177–0,335	0,335–0,510 0,422 0,486 (IIIп)	0,510–0,751	0,751–1,000
3. ИПТ > ИПК > ИПУ 3. TSI > WQTPI > WBRI	$0,534 \times 0,636$ $+0,238 \times 0,277$ $+0,509 \times 0,086 = 0,449$	0,000–0,181	0,181–0,349	0,349–0,526 0,526 0,449 (IIIс)	0,526–0,758	0,758–1,000

Таблица 6. Интегральный показатель экологического статуса (ИПЭС) для озера Волковское (Суури) при разных приоритетах на последнем уровне свертки субиндексов трофности, качества и устойчивости для ИПТ при $\lambda = 3$
 Table 6. The integrated environmental status indicator (IPEC) for Lake Volkovskoe (Suuri) under different priority settings at the final level of sub-index aggregation for trophic status, quality, and sustainability at $\lambda = 3$ for TSI

Номер варианта и приоритет интегрального показателя Option number and priority of the integral indicator	Расчет ИПЭС по вариантам Calculation of IPEC by options	Водоем первой категории (I класс) Water body of the first category (Class I)	Водоем второй категории (II класс) Water body of the second category (Class II)	Водоем третьей категории (III класс) Water body of the third category (Class III)	Водоем четвертой категории (IV класс) Water body of the fourth category (Class IV)	Водоем пятой категории (V класс) Water body of the fifth category (Class V)
1. ИПТ = ИПК = ИПУ 1. TSI = WQTPI = WBRI	$0,023 \times 0,333 + 0,238 \times 0,333 + 0,509 \times 0,333 = 0,257$	0,000–0,174	0,174–0,336 0,255 0,257 (IIC)	0,336–0,522	0,522–0,757	0,757–1,000
2. ИПТ > ИПК = ИПУ 2. TSI > WQTPI = WBRI	$0,023 \times 0,700 + 0,238 \times 0,150 + 0,509 \times 0,150 = 0,128$	0,000–0,177 0,088 0,128 (IC)	0,177–0,335	0,335–0,510	0,510–0,751	0,751–1,000
3. ИПТ > ИПК > ИПУ 3. TSI > WQTPI > WBRI	$0,023 \times 0,636 + 0,238 \times 0,277 + 0,509 \times 0,086 = 0,124$	0,000–0,181 0,090 0,124 (IC)	0,181–0,349	0,349–0,526	0,526–0,758	0,758–1,000

Также обратим внимание на то, что по сравнению с основным вариантом в варианте с $\lambda = 0,5$ изменение статуса происходит внутри одного класса, а при $\lambda = 3,0$ класс статуса озера изменяется. При этом в первом случае статус снижается (примерно на полкласса), а во втором – повышается (примерно на класс).

Анализ таблиц показал, что при малых значениях (0,5; 0,25; 0,1; 0,05; 0,01) параметра λ озеро Волковское попадает в более низкий класс ИПЭС по сравнению с основным вариантом $\lambda = 1$ (из категории IIIл оз. Волковское переходит в IIIс). При больших значениях параметра λ ($\lambda = 3$) озеро по величине ИПЭС попадает в IC–IIC классы статуса.

С введением нелинейной связи в рассмотренных вариантах (табл. 4–6) значения ИПЭС изменяются (от 0,083 до 0,184), что в итоге влияет на переход водоема в другой класс (категорию) экологического статуса.

Заключение

Основным итогом работы стало сравнение результатов интегральной оценки экологического статуса оз. Волковское (Суури), полученных на разных моделях-классификациях при учете использования в нормирующих функциях как линейного представления взаимосвязи параметров с исследуемым свойством системы, так и нелинейного вида этой связи. Варианты сравнений выполнены на уровне количественной оценки субиндексов и итогового значения интегрального показателя экологического статуса водоема (ИПЭС) в реализованных вариантах. Установлено, насколько сильно изменяется значение

субиндекса трофности (ИПТ) с введением нелинейной связи между критериями оценки и индексом трофности. Варианты изменения значений, учитывающих степень нелинейности λ , включали только положительные значения: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0 (были учтены также значения 0,01; 0,05; 0,1 и 0,25). Другие возможные значения степенных функций планируется рассмотреть в будущих исследованиях. Эксперименты проводились по упрощенному способу, при котором параметр λ задавался одним значением для всех критериев, входящих в субиндекс ИПТ. Выявлено, что при увеличении показателя степени λ значение ИПТ оз. Волковское также увеличилось (от 0,285 при $\lambda = 1,0$ до 0,534 при $\lambda = 1,5$). Графически получилась выпуклая вниз функция. Обратный результат получен при увеличении степени λ (ИПТ = 0,152 при $\lambda = 1,5$; ИПТ = 0,081 при $\lambda = 2,0$; ИПТ = 0,023 при $\lambda = 3,0$). Графически получена выпуклость вниз. Следующей задачей было выяснение того, насколько изменится интегральный показатель экологического статуса (ИПЭС) с учетом нелинейности связи в индексе ИПТ и изменении приоритетов (весов) учета субиндекса ИПТ на последнем этапе свертки. При этом в остальных субиндексах была сохранена линейная связь параметров с оцениваемым свойством. В результате исследования выявлено, что изменение параметра λ в сторону уменьшения степени нелинейности дает в итоге сдвиг ИПЭС вправо по оси ЭС: ИПЭС = 0,344 при $\lambda = 1,0$, ИПЭС = 0,427 при $\lambda = 0,5$ для варианта ИПТ = ИПК = ИПУ; ИПЭС = 0,312 при $\lambda = 1,0$, ИПЭС = 0,486 при $\lambda = 0,5$ для варианта ИПТ > ИПК = ИПУ; ИПЭС = 0,291 при $\lambda = 1,0$, ИПЭС = 0,449 при $\lambda = 0,5$ для варианта ИПТ > ИПК > ИПУ.

Наиболее заметные изменения происходят при варианте весов ИПТ > ИПК = ИПУ. При увеличении веса ИПТ отмечено уменьшение значения ИПЭС системы. Для ИПТ = ИПК = ИПУ: при $\lambda = 1,5$ ИПЭС = 0,300; при $\lambda = 2,0$ ИПЭС = 0,276; при $\lambda = 3,0$ ИПЭС = 0,257.

Для варианта ИПТ > ИПК = ИПУ: при $\lambda = 1,5$ ИПЭС = 0,219; при $\lambda = 2,0$ ИПЭС = 0,169; при $\lambda = 3,0$ ИПЭС = 0,128.

Для ИПТ > ИПК > ИПУ: при $\lambda = 1,5$ ИПЭС = 0,169; при $\lambda = 2,0$ ИПЭС = 0,161; при $\lambda = 3,0$ ИПЭС = 0,124.

Опыт, полученный в результате реализованных экспериментов, показывает, что недоучет нелинейности взаимосвязи параметров, выбранных для оценки ИПЭС, даже в случае одного из трех субиндексов (в представленном случае это ИПТ) может занижить оценку ИПЭС при слабо выраженной нелинейности в пределах до половины класса по сравнению с основным вариантом. В случае сильно выраженной нелинейности это может привести к завышению результата оценки ИПЭС в пределах одного класса.

Изменение приоритетов в свертке субиндексов на фоне учета нелинейности может усилить отмеченный выше результат в том случае, если больший вес будет присвоен субиндексу, содержащему учет нелинейности в параметрах оценивания.

Литература

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. СПб.: СПбГУ, 2000. 275 с. (Депонировано в ВИНТИ № 2342-B00).

Воробейчик Е. Л., Садыков О. Ф., Фарафонов М. Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). Екатеринбург: УИФ «Наука», 1994. 280 с.

Даувальтер В. А. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: МГТУ, 2012. 242 с.

Дмитриев В. В. Оценка состояния и устойчивости наземных и водных геосистем. Учеб.-метод. пособие. СПб.: Медианапир, 2020. 200 с. doi: 10.17513/nr.419

Корников В. В., Хованов Н. В., Юдаева М. С. Многокритериальная классификация в условиях дефицита числовой информации // Труды Карельского научного центра РАН. 2012. № 5. С. 38–43.

Кузнецов Д. Д., Субетто Д. А. Стратиграфия донных отложений озер Карельского перешейка. М.: ГЕОС, 2019. 120 с.

Мякишева Н. В. Многокритериальная классификация озер. СПб.: РГГМУ, 2009. 160 с.

Панютин Н. А., Дмитриев В. В. Моделирование экологического статуса водных объектов // Современные проблемы ландшафтоведения и геоэкологии: Мат.-лы VII Междунар. науч. конф., посв. 90-летию кафедры географической экологии БГУ (Минск, 11–15 ноября 2024 г.). Минск, 2024. С. 155–159.

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. С. 46. doi: 10.17513/msnv.21435

Примаек Е. А. Интегральная оценка устойчивости и экологического благополучия водных объектов: Дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2009. 188 с.

Седова С. А., Дмитриев В. В., Четверова А. А. База данных для выявления экологического статуса и факторов массообмена в водной экосистеме на примере озера Суури (LAKE-SUURI-ECOSYSTEM). Патент России RU 2019621679. 2019.

Фрумин Г. Т., Малышева Н. А. Динамика качества воды Псковского озера (2000–2018 гг.) // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 4. С. 32–40. doi: 10.17076/lim1133

Хованов Н. В. Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. СПб.: СПбГУ, 1996. 196 с.

Хованов Н. В. Математические модели риска и неопределенности. СПб.: СПбГУ, 1998. 204 с.

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 // Ecol. Indic. 2020. Vol. 111. Art. 106023. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.106023

Chessman B. Assessing the conservation value and health of New South Wales rivers: The PBH (Pressure-Biota-Habitat) Project, NSW Department of Land and Water Conservation, Sydney, Australia. 2002.

Dmitriev V., Sedova S., Plenkina A., Khomiakova V., Avdeevich D., Ladanova V., Ukis A., Paniutin N., Makarieva O., Post D. Development of monitoring of water bodies ecological status by the example of small lakes in the North-Western Ladoga region // E3S Web of Conferences. 4th Vinogradov conference 'Hydrology: from learning to worldview' in memory of outstanding Russian hydrologist Yury Vinogradov. 2020. Vol. 163. Art. 03002. doi: 10.1051/e3sconf/202016303002

Haskell B. D., Norton B. G., Costanza R. Introduction: What is ecosystem health and why should we worry about it? // Ecosystem Health – New Goals for Environmental Mangement. Washington: Island Press, 1992. 269 p.

Hovanov N., Yudaeva M., Hovanov K. Multicriteria estimation of probabilities on basis of expert non-numeric, non-exact and non-complete knowledge // Eur. J. Oper. Res. 2009. Vol. 195(3). P. 857–863. doi: 10.1016/j.ejor.2007.11.018

Meyer J. L. Stream health: incorporating the human dimension to advance stream ecology // J. North Am. Benthol. Soc. 1997. Vol. 16(2). P. 439–447.

References

Aleksandrova L. V., Vasil'ev V. Yu., Dmitriev V. V., Myakisheva N. V., Ogurtsov A. N., Tret'yakov V. Yu., Khovanov N. V. Multi-criteria geographic and ecological assessment of the condition and sustainability of natural and urbanized systems. St. Petersburg: SPbGU; 2000. 275 p. (Deposited at VINITI under No. 2342-B00) (In Russ.)

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. *Ecol. Indic.* 2020;111:106023. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.106023

Chessman B. Assessing the conservation value and health of New South Wales rivers: The PBH (Pressure-Biota-Habitat) Project, NSW Department of Land and Water Conservation, Sydney, Australia. 2002.

Dauval'ter V. A. Geocology of lake bottom sediments. Murmansk: MGTU; 2012. 242 p. (In Russ.)

Dmitriev V. V. Assessment of the state and sustainability of terrestrial and aquatic geosystems: an educational and methodological manual. St. Petersburg: Mediapapir; 2020. 200 p. (In Russ.) doi: 10.17513/np.419

Dmitriev V., Sedova S., Plenkina A., Khomiakova V., Avdeevich D., Ladanova V., Ukis A., Paniutin N., Markarieva O., Post D. Development of monitoring of water bodies ecological status by the example of small lakes in the North-Western Ladoga region. *E3S Web of Conferences*. 4th Vinogradov conference 'Hydrology: from learning to worldview' in memory of outstanding Russian hydrologist Yuri Vinogradov. 2020;163:03002. doi: 10.1051/e3sconf/202016303002

Frumin G. T., Malysheva N. A. Water quality dynamics of Lake Pskov (2000–2018). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2020;4:32–40. (In Russ.) doi: 10.17076/lim1133

Haskell B. D., Norton B. G., Costanza R. Introduction: What is ecosystem health and why should we worry about it? *Ecosystem Health – New Goals for Environmental Management*. Washington: Island Press; 1992. 269 p.

Hovanov N., Yudaeva M., Hovanov K. Multicriteria estimation of probabilities on basis of expert non-numeric, non-exact and non-complete knowledge. *Eur. J. Oper. Res.* 2009;195(3):857–863. doi: 10.1016/j.ejor.2007.11.018

Khovanov N. V. Analysis and synthesis of indicators under the conditions of information deficit. St. Petersburg: SPbGU; 1996. 196 p. (In Russ.)

Khovanov N. V. Mathematical models of risk and uncertainty. St. Petersburg: SPbGU; 1998. 204 p. (In Russ.)

Kornikov V. V., Khovanov N. V., Yudaeva M. S. Multicriteria classification under the conditions of numerical

information deficit. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2012;5:38–43. (In Russ.)

Kuznetsov D. D., Subetto D. A. Stratigraphy of lake sediments of the Karelian Isthmus. Moscow: GEOS; 2019. 120 p. (In Russ.)

Meyer J. L. Stream health: incorporating the human dimension to advance stream ecology. *J. North Am. Benthol. Soc.* 1997;16(2):439–447.

Myakisheva N. V. Multicriteria classification of lakes. St. Petersburg: RGGU; 2009. 160 p. (In Russ.)

Panyutin N. A., Dmitriev V. V. Modeling the ecological status of water bodies. *Sovremennye problemy landshaftovedeniya i geoekologii: Mat-ly VII Mezhdunar. nauch. konf., posv. 90-letiyu kafedry geograficheskoi ekologii BGU (Minsk, 11–15 noyabrya 2024 g.) = Modern problems in landscape science and geoecology: Proceed. VII int. sci. conf. dedicated to the 90th anniversary of the Department of Geographic Ecology at Belarusian State University (Minsk, Nov. 11–15, 2024)*. Minsk; 2024. P. 155–159. (In Russ.)

Pochepko S. Yu., Kaspin M. O., Dmitriev V. V. Assessment of the factors impact on ecological functions and production-decomposition relationships in a water ecosystem. *Mezhdunarodnyi studencheskii nauchnyi vestnik = International Student Journal*. 2024; 1:46. (In Russ.) doi: 10.17513/msnv.21435

Primak E. A. Integral assessment of the sustainability and ecological well-being of water bodies: Summary of PhD (Cand. of Geogr.) thesis. St. Petersburg; 2009. 188 p. (In Russ.)

Sedova S. A., Dmitriev V. V., Chetverova A. A. Database for identifying the ecological status and mass exchange factors in an aquatic ecosystem: a case study of Lake Suuri (LAKE–SUURI–ECOSYSTEM). Russian patent RU 201921679. 2019. (In Russ.)

Vorobeichik E. L., Sadykov O. F., Farafontov M. G. Environmental norming of anthropogenic pollution in terrestrial ecosystems (the local level). Yekaterinburg: UIF «Nauka»; 1994. 280 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 05.09.2025; принята к публикации / accepted: 22.09.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Панютин Николай Алексеевич

аспирант кафедры гидрологии суши
Института наук о Земле

e-mail: nic9898@yandex.ru

Дмитриев Василий Васильевич

д-р геогр. наук, профессор кафедры гидрологии суши
Института наук о Земле

e-mail: v.dmitriev@spbu.ru

Примак Екатерина Алексеевна

канд. геогр. наук, доцент кафедры прикладной
и системной экологии

e-mail: primak-rshu@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Paniutin, Nikolai

Doctoral Student, Department of Land Hydrology,
Institute of Earth Sciences

Dmitriev, Vasily

Dr. Sci. (Geog.), Professor, Department of Land Hydrology,
Institute of Earth Sciences

Primak, Ekaterina

Cand. Sci. (Geog.), Associate Professor,
Department of Applied and Systems Ecology