

УДК 556.5:504.455

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СТАТУСА ВОДОЕМОВ НА ОСНОВЕ ПОСТРОЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ИНДЕКСОВ

Пленкина А.К., Дмитриев В.В., Федорова И.В., Огурцов А.Н.

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург,
e-mail: akuloda@mail.ru, v.dmitriev@spbu.ru, i.fedorova@spbu.ru, aogurcov@yandex.ru

Статья посвящена рассмотрению возможности использования композитных индексов и субиндексов для разработки подходов к оценке интегративных свойств водных объектов и оценке их экологического состояния в целом. Интерес к использованию композитных индексов и субиндексов для оценки экологического статуса водного объекта связан с развитием экологического мониторинга водных объектов и оценкой их неаддитивных свойств на основе методов интегрального оценивания, а также трансформаций этих свойств под влиянием естественных изменений и внешних воздействий; выделением экорегионов на основе интегральных оценок. В работе приводятся этапы и результаты построения субиндексов оценки продуктивности, качества и токсического загрязнения воды, устойчивости для получения композитного индекса экологического статуса водоемов на примере г. Санкт-Петербурга. Композитный индекс экологического статуса (КИЭС) водоема представляет собой результат трехуровневой свертки показателей по трем субиндексам: 1 – продуктивности, 2 – качества, 3 – устойчивости. Одновременно вводились пять классов, характеризующих экологический статус по величине рассчитанного индекса КИЭС. На данном этапе также вводились правила нормирования показателей и выбора приоритетов (весов) для построения субиндексов и композитного индекса, рассчитывалась оценочная шкала индекса. На втором уровне свертки в один субиндекс объединялись блоки 2, 3, 4. На последнем уровне вводился итоговый композитный индекс, агрегирующий все субиндексы. На заключительном этапе выполнялись расчеты на основе натурных данных, собранных в полевых условиях, и ранжирование водоемов на основе полученных интегральных показателей для последнего уровня свертки. Рассмотрены этапы и некоторые результаты интегральной оценки по материалам натурных наблюдений на городских водоемах.

Ключевые слова: интегральная оценка, композитный индекс, интегральный показатель, оценочная шкала, продуктивность, качество воды, устойчивость

ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATUS OF WATER BODIES BASED ON THE CONSTRUCTION OF COMPOSITE INDEXES

Plenkina A.K., Dmitriev V.V., Fedorova I.V., Ogurtsov A.N.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Saint-Petersburg State University», St. Petersburg, e-mail: akuloda@mail.ru,
v.dmitriev@spbu.ru, i.fedorova@spbu.ru, aogurcov@yandex.ru

The article considers the possibility of using composite indices and sub-indices to develop approaches to assessing the integrative properties of water objects and assessing their environmental condition as a whole. Interest in the use of composite indices and sub-indices to assess the ecological status of the water facility is related to the development of environmental monitoring of water objects and the evaluation of their non-additive properties based on methods of integral assessment, as well as transformations of these properties under the influence of natural changes and external influences. The paper presents the stages and results of constructing sub-indices for assessing the productivity, quality and toxic pollution of water, resistance to obtain a composite index of the ecological status of water bodies on the example of St. Petersburg. The composite index of the ecological status (CIES) of a water body is the result of a three-level convolution of indicators for three sub-indices: 1-productivity, 2-quality, 3-sustainability. Five classes were introduced that characterize the environmental status of the largest calculated CIES index. At this stage, rules were also introduced for rationing of indicators and choice of priorities (weights) and was calculated the index's rating scale. On the second level of the bundles in one sub-index were combined blocks. At the last level, a final composite index was introduced, aggregating all sub-indices. At the final stage, calculations were performed on the basis of field data and the ranking of reservoirs based on the obtained integral indicators for the last convolution level.

Keywords: integral assessment, composite index, integral indicator, rating scale, productivity, water quality, sustainability

Водные объекты являются важнейшей составляющей окружающей человека природной среды. Водные экосистемы находятся в состоянии равновесия с условиями внешней среды и имеют сложную структуру, нарушаемую под воздействием антропогенных факторов. Современная глобальность и интенсивность антропогенной деятельности, негативные последствия

природных катаклизмов и климатические изменения приводят к нарушению интегративных свойств водных экосистем (продуктивность, качество и токсическое загрязнение, устойчивость, благополучие и др.).

В рамках реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.» предусматривается реализация мероприятий по совершенствованию нормативной базы

в сфере использования и охраны водных объектов [1]. В связи с этим в последние годы актуальными остаются вопросы совершенствования водно-экологического мониторинга, в который предлагается включать оценку состояния водных объектов на основе построения композитных индексов, характеризующих химический и биологический состав и физические свойства воды, донных отложений, состояние береговой зоны, устойчивость водоема [2].

Теоретические аспекты и методологические основы изучения экологического состояния водных объектов обобщены в трудах отечественных авторов: В.К. Шитикова, Г.С. Розенберга, Т.Д. Зинченко [3–5] и др. В последние годы акцентируются подходы к интегральной оценке состояния водных объектов и их интегративных свойств [6–8]. В зарубежных публикациях с конца 1980-х гг. рассматривался подход к разработке экологических паспортов водных объектов, а начиная с [6], акцентировались биоцентризм и индикаторный подход в оценке качества воды и состояния водных объектов [6; 9; 10]. В этот период в отечественной литературе появились такие термины, как «экологическое качество воды», «хорошее экологическое качество воды» и т.п., ранее не применявшиеся в российских исследованиях, о чем мы писали в [4; 8]. Во многом этому способствовал выход в свет монографии [7], по-видимому, требовавшей научного редактирования для сопоставления традиционной для РФ и зарубежной терминологии. В современных зарубежных публикациях все чаще идет речь об использовании пространственно-распределенных или изменяющихся во времени индексах, разработанных на основе территориальных детерминант, которые используются авторами для формирования будущих ожиданий и принятия обоснованных решений в области оценки воздействия на природные объекты и геосистемы [9; 10]. Термин «композитный индекс», используемый нами в статье, пришел в зарубежную и отечественную терминологию из экономики (см., например, *англ. Composite Index of Leading Indicators*), а точнее из теории экономических индексов [11; 12], которые включают в себя несколько экономических компонентов (подындексов, или субиндексов, *англ. specific sub-index* или *sub-index*), изменения которых обуславливают изменения в экономике в целом или предшествуют изменениям в ней.

Цель исследования: развитие оценочных исследований экологического состояния

(экологического статуса) водных объектов на основе построения композитных индексов, отражающих их состав, простые и сложные (неаддитивные, эмерджентные) свойства.

Решение данной проблемы за рубежом в последние годы связано с внедрением и доработкой «Европейской рамочной водной директивы» (Water Framework Directive; WFD), основной целью которой «является достижение экологического благополучия или высокого экологического статуса» для всех водных систем [6; 7].

Реализация WFD и «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года» [1; 6] повлекла за собой активизацию разработки и развития гидрологического и гидроэкологического инжиниринга (ГИ и ГЭИ), под которыми нами подразумевается «систематизация и алгоритмизация знаний, создание и внедрение практик, экспертизы и реализации проектов, связанных с реформированием и управлением водными объектами» [2; 4]. Развитие ГИ предусматривает инжиниринговые исследования в системе «водный объект – человек (общество)» (антропоцентризм); совершенствование ГЭИ – в системе «водный объект – организмы-гидробионты» (биоцентризм), и в водных экосистемах и геосистемах в целом [4].

В современной зарубежной литературе эти исследования близки к направлению, получившему название «экогидрология». Maciej Zalewski и соавторы писали о том, что «концепция междисциплинарного подхода, которую все чаще именуют «экогидрологией», создает необходимые социально-экономические обратные связи и совмещает (гармонизирует) гидрологические, экологические и социально-экономические процессы в масштабах бассейна для экосистем и общества» [13]. Необходимость развития исследований интегративных свойств эко- и геосистем обсуждается нами в [2].

Материалы и методы исследования

Под «экологическим статусом» (далее – ЭС) нами понимается эмерджентное свойство водного объекта, характеризующее сочетание: 1 – способности создавать органическое вещество (продуктивность, продукционный потенциал); 2 – качества и токсического загрязнения воды; 3 – потенциальной устойчивости водоема [2]. Для этих блоков исследований в работе разработаны соответствующие субиндексы.

Наиболее оптимальным подходом к оценке экологического статуса водных эко-

систем, на наш взгляд, можно считать разработку композитных индексов для блоков характеристик и последнего уровня свертки показателей, так как они позволяют последовательно объединить в одно целое полученные ранее результаты с учетом их вклада в общую оценку. Методика построения композитных индексов реализована нами на основе «метода сводных показателей» (МСП) и его современных версий, история создания которого уходит корнями в начало XX века [11; 12]. Данный метод используется нами в разных версиях с конца 1990 гг. как рабочий инструмент для синтеза информации о различных свойствах и состояниях сложных систем и их интегративных (эмерджентных) свойствах как в условиях достаточного информационного обеспечения, так и в условиях недостатка информации о критериях и приоритетах оценивания [2; 8; 14].

В связи с вышеизложенным оценка ЭС выполняется в несколько этапов, представленных на рис. 1.

Первым этапом является оценка продуктивности водоема (субиндекс ИПТ). Для этого оценивается трофический статус водоема, который представляет собой харак-

теристику, отражающую его интегративное свойство – биопродуктивность. Это свойство определяется сочетанием большого количества факторов, оказывающих влияние на гидробионтов, обитающих в водоеме, его лимнологическими характеристиками, характером водосбора, особенностями гидрографической сети и др.

Вторым этапом является определение качества и токсического загрязнения воды (субиндекс ИПК). В работе при оценке качества воды принято сочетание антропоцентризма и биоцентризма и двухуровневое построение субиндекса качества.

На третьем этапе строился субиндекс устойчивости водоема (ИПУ). В работе оценивалась так называемая потенциальная устойчивость, под которой понималась устойчивость системы к изменению элементов естественного режима (морфометрических и климатических параметров, физико-географических характеристик, а также гидрологических особенностей водоема).

Последним этапом работы является построение индекса и оценочной шкалы экологического статуса водоема (композитный индекс КИЭС).

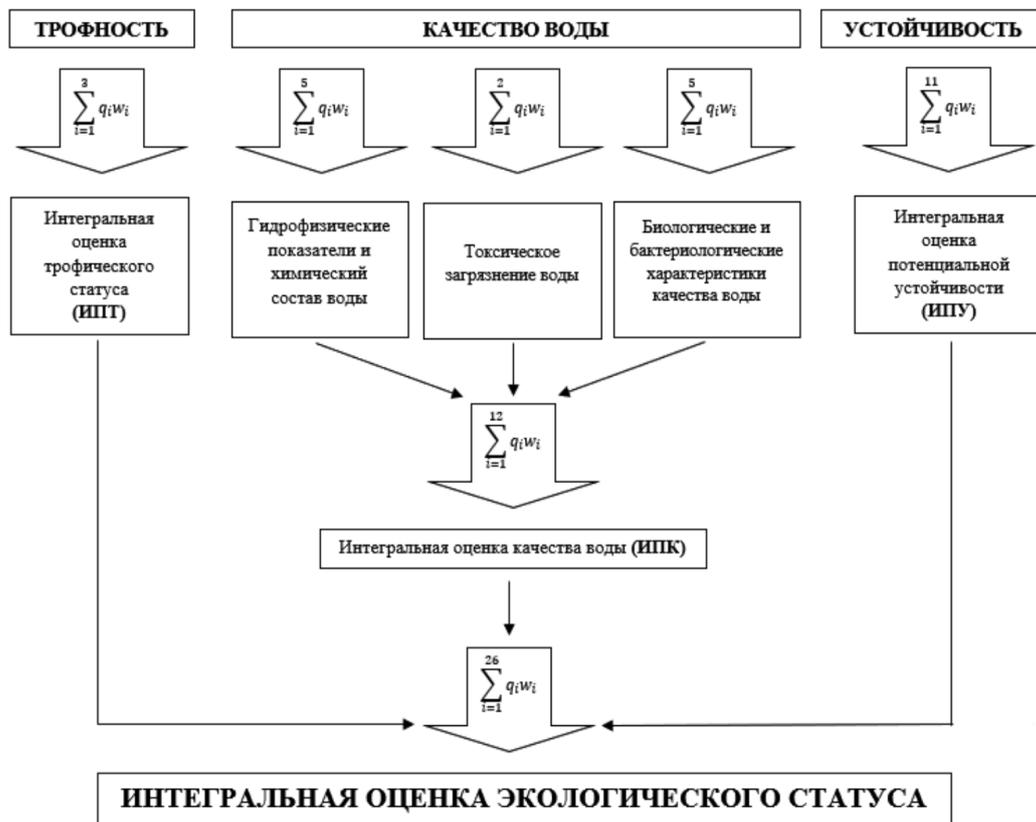


Рис. 1. Схема этапов оценочных исследований при построении субиндексов ИПТ, ИПК, ИПУ и композитного индекса КИЭС

Таблица 1

Классификация для оценки экологического статуса водоемов

Группы индексов, класс ЭС	Классы экологического статуса водоема				
	I	II	III	IV	V
Продуктивность (субиндекс ИПТ)	Олиготрофия	Мезотрофия-1	Мезотрофия-2	Эвтрофия	Гипертрофия
Качество и токсическое загрязнение воды (субиндекс ИПК)	Чистые	Слабо загрязненные	Загрязненные	Грязные	Очень грязные
Потенциальная устойчивость (субиндекс ИПУ)	Высокоустойчивый (слабо уязвимый)	Устойчивость выше среднего	Среднеустойчивый (средне уязвимый)	Устойчивость ниже среднего	Низкоустойчивый (высоко уязвимый)
Экологический статус водоема (композитный индекс КИЭС)	Экологический статус первой категории (высокий)	Экологический статус второй категории (выше среднего)	Экологический статус третьей категории (средний)	Экологический статус четвертой категории (ниже среднего)	Экологический статус пятой категории (низкий)

В итоге были разработаны субиндексы ИПТ, ИПК, ИПУ и композитный индекс КИЭС (рис. 1) и оценочные классификации для всех субиндексов и композитного индекса, агрегирующего в себе с определенным приоритетом (весом) все субиндексы. Критерии оценки отбирались с учетом действующих государственных стандартов, руководящих документов и рекомендаций [15], а также разработанных авторских классификаций (табл. 1). Построение оценочных шкал для композитных индексов по классам ЭС описано нами в публикациях [2; 4; 14] и др.

Процесс построения КИЭС включал в себя следующие этапы.

1. Отбор критериев оценивания, входящих в субиндексы ИПТ, ИПК, ИПУ. Введение классов КИЭС. Построение оценочных шкал для субиндексов и КИЭС.

В современных публикациях [9; 10] авторы обращают внимание на то, что корреляция независимых переменных затрудняет оценку и анализ полученного результата. Когда независимые переменные коррелируют друг с другом, говорят о возникновении мультиколлинеарности факторов. В этом случае математическая модель регрессии содержит избыточные переменные, а это значит, что: 1 – параметры регрессии теряют смысл, и следует пересмотреть состав переменных, отобранных для построения субиндекса; 2 – оценки параметров ненадежны из-за больших стандартных ошибок, которые меняются с изменением объема наблюдений и затрудняют использование модели регрессии для прогнозирования; 3 – необходимо вводить оценку точности и достоверности полученных результатов.

2. Выбор и/или построение оценочных шкал для исходных параметров оценивания. Использовался опыт, полученный нами ранее и описанный в [2; 4; 14] и др.

3. Выбор нормирующих функций, учитывающих вид и нелинейность связи выбранного параметра с оцениваемым свойством, и реализация процедуры нормирования исходных характеристик. Нормирующие функции и выполнение процедуры нормирования описаны нами в большом количестве публикаций, например в [2; 5; 14].

4. Выбор вида композитного индекса и субиндексов. В качестве выражения для ИПТ, ИПК, ИПУ и КИЭС была выбрана линейная свертка показателей вида:

$$I = I(q; w) = I(q_1, \dots, q_n; w_1, \dots, w_n) = \sum_{i=1}^n q_i w_i, i = 1, \dots, n,$$

где n – число критериев оценивания [11].

5. Задание или моделирование приоритетов (весовых коэффициентов w_i) учитывает возможность их моделирования на основе *ннн*-информации [11; 14]. На первом этапе нами во всех блоках и между блоками реализовывалось равновесное задание параметров.

6. Разработка сценариев учета приоритетов внутри блоков и при расчете КИЭС. Построение оценочных шкал для каждого сценария на основе выбранного метода [11; 12].

7. Расчет ИПТ, ИПК, ИПУ и КИЭС для водоемов по полученным мониторинговым данным.

**Результаты исследования
и их обсуждение**

На основе изложенного в предыдущих разделах подхода и этапов построения субиндексов и КИЭС были проведены расчеты КИЭС для некоторых водоемов, расположенных на территории г. Санкт-Петербурга за 2019 г. Названия водоемов приведены в примечании к рис. 2.

В табл. 2 приведен перечень параметров для построения субиндексов и индекса КИЭС. Все параметры, необходимые для расчета, получены в период выполнения мониторинговых исследований на водоемах в рамках выполнения проекта «Комплексное экологическое обследование водоемов Санкт-Петербурга» (договор СПбГУ № 241-18 с Комитетом по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности г. Санкт-Петербурга, 2018).

В результате выполнения описанных построений были получены оценочные шкалы для субиндексов ИПТ, ИПК, ИПУ и индекса КИЭС. На всех уровнях свертки показателей задавались одинаковые приоритеты оценивания внутри блоков и между ними (рис. 1).

Все оценочные шкалы приведены в табл. 3, которая содержит информацию о ширине классов в каждом субиндексе и КИЭС при равенстве весов (приоритетов) оценивания.

После получения оценочных шкал, приведенных в табл. 3, выполнялись расчеты ИПТ, ИПК, ИПУ и КИЭС для водоемов г. Санкт-Петербурга в 2019 г. Полученные результаты позволили выявить три группы водоемов (рис. 2): 1 – водоемы II класса со значениями КИЭС «выше среднего» (16 водоемов); 2 – водоемы III класса со «средними» значениями КИЭС (26 водоемов); 3 – водоемы IV класса со значениями КИЭС «ниже среднего» (1 водоем).

Таблица 2

Состав параметров для расчета ИПТ, ИПК, ИПУ и КИЭС водоемов г. Санкт-Петербурга в 2019 г.

№ п/п	Субиндексы и композитный индекс экологического статуса	Состав параметров
1	Продуктивность (субиндекс ИПТ)	Оценивался по величине ИПТ для 4 классов трофности по 3 критериям: Сl «а» (мкг/л), P _{общ} (мкг P/л), средняя биомасса фитопланктона, Vf (мг/л)
2	Качество и токсическое загрязнение воды (субиндекс ИПК)	Оценивался по величине интегрального показателя качества воды ИПК для 5 классов качества по 12 критериям: цветность по Pt-Co шкале, рН воды, N-NO ₂ (мг N/л), P _{общ} (мг P/л), среднегодовое содержание растворенного кислорода O ₂ (% насыщения), H ₂ S (мг/л), CH ₄ (мг/л), биомасса фитопланктона (мг/л), Сl «а» (мкг/л), индекс сапробности, степень токсичности проб воды А (%), число сапрофитных бактерий (1000 клеток/мл)
3	Потенциальная устойчивость (субиндекс ИПУ)	Оценивался по балльно-индексному методу [8] и балльной шкале, которая нормированием переводилась в интегральный показатель адаптационной устойчивости ИПУ
Экологический статус водоема (композитный индекс КИЭС)		Оценивался в предположении равенства весов ИПТ + ИПК + ИПУ на третьем уровне свертки

Таблица 3

Оценочные шкалы ИПТ, ИПК, ИПУ и КИЭС для равновесного сценария оценивания экологического состояния водоемов

Группы индексов, класс ЭС	Классы экологического статуса водоема				
	Экологический статус первой категории (высокий)	Экологический статус второй категории (выше среднего)	Экологический статус третьей категории (средний)	Экологический статус четвертой категории (ниже среднего)	Экологический статус пятой категории (низкий)
	I	II	III	IV	V
1	2	3	4	5	6
Продуктивность (субиндекс ИПТ)	0,00–0,084	0,084–0,172	0,172–0,260	0,260–0,762	0,762–1,00

Окончание табл. 3					
1	2	3	4	5	6
Качество и токсическое загрязнение воды (субиндекс ИПК)	0,00–0,099	0,099–0,152	0,152–0,311	0,311–0,571	0,571–1,00
Потенциальная устойчивость (субиндекс ИПУ)	0,00–0,250	0,250–0,406	0,406–0,625	0,625–0,781	0,781–1,00
Экологический статус водоема (композитный индекс КИЭС)	0,00–0,144	0,144–0,243	0,243–0,399	0,399–0,705	0,705–1,00

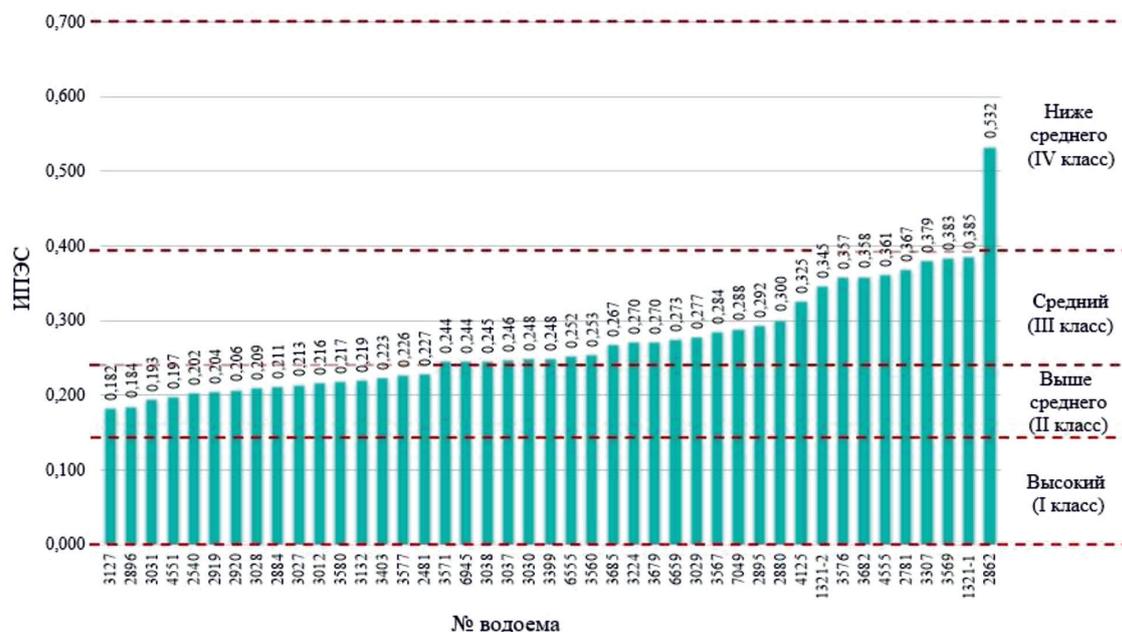


Рис. 2. Оценка экологического статуса водоемов г. Санкт-Петербурга в 2019 г. на основе композитного индекса КИЭС и их ранжирование

Примечание. Номера на рисунке указаны: 1321-1, 1321-2 – запруды на р. Дачная; 2481 – пруд Генеральский; 2540 – пруд Красный; 2880 – пруд Дубовый; 2884 – пруд Церковный; 2895 – пруд Треугольный; 2896 – пруд Шапка Наполеона; 3127 – пруд Рубаха Наполеона; 2919 – пруд Пихтовый; 2990 – пруд Лошадиный; 3037 – пруд Серебряный; 3224 – пруды Таврического сада; 3399, 3403 – пруды у дачи Бенуа; 3685 – пруд Колонистский; 2781, 2862, 3012, 3027, 3028, 3029, 3030, 3031, 3038, 3132, 3307, 3560, 3567, 3571, 3576, 3577, 4555, 3580, 3679, 7049, 3682, 4125, 4551, 6555, 6659, 6945 – пруды без названия [2; 15].

Выводы

В результате выполнения работы предложена методика оценки экологического статуса водоемов на основе построения композитного индекса КИЭС, включающего в себя субиндекс продуктивности (ИПТ), субиндекс качества и токсического загрязнения воды (ИПК) и субиндекс потенциальной устойчивости водоема (ИПУ).

Предложены классы, уровни обобщения данных, блоки, этапы исследования. Для построения КИЭС выбраны параметры оце-

нивания, сформированы оценочные шкалы и получена шкала для КИЭС для сценария с равновесным заданием приоритетов внутри блоков и между ними.

В целом индекс КИЭС рассматривается как отражение интегративного свойства водоема, характеризующее его продукционный потенциал, качество и загрязнение воды, а также способность водоема сохранять свои свойства и элементы режимов при естественных изменениях и внешних воздействиях на него.

Проведены расчеты КИЭС для некоторых водоемов (прудов) г. Санкт-Петербурга для 2019 г. в предположении равенства приоритетов на всех уровнях обобщения данных. Полученные результаты интегральной оценки экологического статуса и их ранжирование позволили выявить три группы водоемов: 1 – водоемы II класса со значениями КИЭС «выше среднего» (16 водоемов); 2 – водоемы III класса со «средними» значениями КИЭС (26 водоемов); 3 – водоемы IV класса со значениями КИЭС «ниже среднего» (1 водоем). Таким образом, выявлено отсутствие водоемов I и V классов. Практически все водоемы, отнесенные ко II классу по величине КИЭС, находятся близко от границы с III классом. Водоемы, отнесенные к III классу, равномерно распределены внутри класса. Достаточно близко к границе III-IV классов находятся 8 городских водоемов (рис. 2).

Исследования выполнялись при поддержке грантов РФФИ № 19-05-00683 а; 18-05-60291 Арктика.

Список литературы / References

1. Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 августа 2009 г. № 1235-р (ред. от 17.04.2012 г.). [Электронный ресурс]. URL: <http://government.ru/docs/all/69408> (дата обращения: 17.10.2020).
2. Дмитриев В.В., Федорова И.В., Огурцов А.Н., Седова С.А., Пленкина А.К. «Гидрология», «экология» и «геоэкология» в современных исследованиях водных объектов суши: акценты, проблемы, решения // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению: сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова / Под ред. О.М. Макарьевой, А.А. Землянковой. СПб.: Издательство: «ВВМ», 2020. С. 12–33.
3. Шитиков В.К., Розенберг В.К., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.
4. Шитиков В.К., Розенберг В.К., Зинченко Т.Д. Quantitative hydroecology: methods of system identification. Togliatti: IEVB RAS, 2003. 463 p. (in Russian).
5. Дмитриев В.В., Пряхина Г.В., Огурцов А.Н., Примак Е.А., Амаро Медина Д.Р. Оценка эмерджентных свойств водных объектов: трофический статус, устойчивость, экологическое благополучие // Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии: сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова / Под ред. О.М. Макарьевой. СПб.: Издательство: «Наукоемкие технологии», 2018. С. 347–354.
6. Дмитриев В.В., Пряхина Г.В., Огурцов А.Н., Примак Е.А., Амаро Медина Д.Р. Assessment of emergent properties of water bodies: trophic status, sustainability, ecological well-being // Third Vinogradov reading. Edge of hydrology. Collection of reports of the International Scientific Conference in memory of the outstanding Russian hydrologist Yuri Borisovich Vinogradov / Edited by O.M. Makarieva. St. Petersburg: High Technologies, 2018. P. 347–354 (in Russian).
7. Дмитриев В.В., Терлеев В.В., Никоноров А.О., Огурцов А.Н., Осипов А.Г., Сергеев Ю.Н., Кулеш В.П., Федорова И.В. Global Evaluation of the Status and Sustainability of Terrestrial Landscapes and Water Bodies. Landscape Modelling and Decision Support. 2020. P. 231–253. DOI: 10.1007/978-3-030-37421-1_12.
8. 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. 2020. L 327. 73 p.
9. Семенченко В.П., Разлудский В.И. Экологическое качество поверхностных вод. 2-е изд., испр. Минск: Беларус. навука, 2011. 329 с.
10. Semenchenko V.P., Razludskiy V.I. Ecological quality of surface waters. 2nd ed., rev. Minsk: Belarus. Navuka, 2011. 329 p. (in Russian).
11. Дмитриев В.В., Огурцов А.Н. Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. II. Методы интегральной оценки устойчивости наземных и водных геосистем // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2013. № 3. С. 88–103.
12. Dmitriev V.V., Ogurtsov A.N. Approaches to integrated assessment and GIS-mapping of sustainability and ecological well-being of geosystems. II. Methods for the integral assessment of the stability of land and water geosystems // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7. Geologiya. Geografiya. 2013. No. 3. P. 88–103 (in Russian).
13. Leveque J.G., Burns R.C. A Structural Equation Modeling approach to water quality perceptions. J. Environ Manage. 2017. V. 197. P. 440–447. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.04.024.
14. Delfine Brousmichea, Florent Occellia, Michaël Geninb, Damien Cunya, Annabelle Derama, Caroline Lanier Spatialized composite indices to evaluate environmental health inequalities: Meeting the challenge of selecting relevant variables. Ecological Indicators. 2020. V. 111. Article 106023. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.106023.
15. Хованов Н.В. Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. СПб.: Изд-во СПб ун-та, 1996. 196 с.
16. Hovanov N.V. Analysis and synthesis of indicators for information deficit. SPb.: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 1996. 196 p. (in Russian).
17. Хованов Н.В. Оценка сложных экономических объектов и процессов в условиях неопределенности: К 95-летию метода сводных показателей А.Н. Крылова // Вестник СПбГУ. 2005. Сер. 5. Вып. 1. С. 138–144.
18. Hovanov N.V. Assessment of complex economic objects and processes in conditions of uncertainty: To the 95th anniversary of the method of summary indicators of A.N. Krylov // Vestnik SPbGU. 2005. Ser. 5. Issue 1. P. 138–144 (in Russian).
19. Maciej Zalewski, Michael McClain, Saeid Eslamian. Ecohydrology – the background for the integrative sustainability science. 2016. P. 71–73. DOI: 10.1016/j.ecohyd.2016.04.003.
20. 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.
21. 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. 2342В00. 275 p. (in Russian).
22. Об утверждении Перечней водных объектов на территории Санкт-Петербурга, подлежащих региональному государственному надзору в области использования и охраны водных объектов: распоряжение от 15 апр. 2008 г. № 52-р (с изм. на 26 дек. 2019 г.). <http://docs.cntd.ru/document/8472531> (дата обращения: 10.11.2020).
23. On the approval of the Lists of water bodies on the territory of St. Petersburg, subject to regional state supervision in the field of use and protection of water bodies: order dated April 15. 2008 No. 52-r (as amended on December 26, 2019). [Electronic resource]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/8472531> (date of access: 10.11.2020) (in Russian).