

УДК 502.52

## Интегральная оценка экологического благополучия природно-техногенной системы «водосбор – водохранилище» Иваньковского водохранилища

Васькова Е. А.<sup>1,2</sup>, Дмитриев В. В.<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Акционерное общество «Группа компаний Шанэко»  
Москва, Россия  
[ecologvaskovaea@gmail.com](mailto:ecologvaskovaea@gmail.com); [v.dmitriev@spbu.ru](mailto:v.dmitriev@spbu.ru)

На основе аксиологического подхода формируется авторское представление об экологическом благополучии (ЭБ) системы «водоем – водосбор». Задача оценки ЭБ природно-техногенной системы (ПТС) рассматривается как задача анализа и синтеза показателей на основе разработки многокритериальных и многоуровневых моделей-классификаций, в которых предложены классификационные оценочные шкалы по классам благополучия для территориальных детерминант, характеризующих благополучие наземных и водных геосистем. Цель работы – оценить ЭБ ПТС «водосбор – водохранилище» на примере Иваньковского водохранилища для периода 2018–2021 годов. Для оценки введены 5 классов экологического благополучия, используется 3 уровня свертки показателей, в которых выполняются расчеты 9 субиндексов. Первый уровень – качество среды водосбора 3 субиндекса, потенциальная устойчивость водосбора – 1 субиндекс, потенциальная устойчивость водоема – 1 субиндекс, качество воды водоема: – 1 субиндекс, продуктивность водоема – 1 субиндекс. Второй уровень – экологическое благополучие водосбора 2 субиндекса: 1 – потенциальная устойчивость и качество среды водосбора; 2 – экологическое благополучие водоема: продуктивность, качество воды и потенциальная устойчивость водоема; третий уровень – экологическое благополучие водосбора и экологическое благополучие водоема. В результате апробации методологии для ПТС «водосбор – водохранилище» для Иваньковского водохранилища с использованием мониторинговых данных за период 2018–2021 годов выполнена серия расчетов композитного индекса ЭБ. В расчетных сценариях исследовалась равновесность/неравновесность задания приоритетов (весовых множителей) внутри субиндексов и на последнем уровне свертки, изменение территориальных детерминант. В целом, получено, что в данный период ЭБ ПТС по величине интегрального показателя последнего уровня свертки оценено III-м классом (левая граница ближе к середине класса) – «Средняя степень ЭБ».

*Ключевые слова:* экологическое благополучие, природно-техногенная система, Иваньковское водохранилище, водосбор Иваньковского водохранилища.

### ВВЕДЕНИЕ

Система «водосбор – водохранилище» является природно-техногенной системой (ПТС), обеспечение экологического благополучия (ЭБ) которого является неотъемлемым условием средо- и ресурсовоспроизводства и благосостояния населения регионов, сохранения качества среды в них и сбалансированного экономического роста страны в целом.

При оценке ЭБ ПТС исследователь сталкивается с такими проблемами, как многокритериальность и мультиколлинеарность факторов и/или учет нелинейности их влияния на оцениваемое интегративное свойство, репрезентативность выбранных факторов, весомость вклада каждого фактора в интегральную оценку; вид синтезирующей функции, описывающей полученный результат. Необходимо отметить, что большинство оценочных отечественных исследований эмерджентных свойств сложных природных и общественных систем выполнялось до недавнего времени на покомпонентной основе, с использованием балльного, балльно-индексного или комплексного подходов. Обобщение исследований по пространственным составным индексам для оценки неравенств в отношении качества окружающей среды, выполненное в последние годы российскими (Dmitriev et al., 2020) и зарубежными (Delphine Brousmichea et al., 2020) исследователями показало, что в более 1500 зарубежных исследований и в на порядок меньшем количестве отечественных работ по индексам, разработанным для оценки «территориальных детерминант» с точки зрения охраны

окружающей среды, авторами выявлены несколько десятков пространственно-распределенных композитных индекса, в основу которых заложена информация о более чем 300 переменных. Это разнообразие, с точки зрения авторов, характеризует отсутствие методологической основы и может привести к субъективности и ограничению возможности сопоставления различных оценочных результатов. С другой стороны, системологический принцип множественности моделей сложных систем и их эмерджентных свойств подтверждает необходимость разработки разных моделей для исследования интегративных свойств сложных систем. При этом оценивать успешность полученных результатов можно не по самим значениям интегральных показателей, а по их попаданию в один класс оцениваемых сложных свойств.

Заметно, также, что большая часть подходов не нацелена на совершенствование и развитие геоэкологического мониторинга, не позволяет на интегральной основе количественно оценивать неаддитивные (эмерджентные) свойства геосистем с учетом влияния физико-географических условий, факторов естественного и антропогенного режимов на их развитие, не используются методы геосистемного и геоэкологического подхода, геоситуационного подхода и геоэкологического анализа. В итоге отсутствует нацеленность на разработку информационных систем наблюдения, оценки и прогноза изменений в состоянии окружающей среды с целью выделения антропогенной составляющей этих изменений на фоне природных процессов.

В качестве решения данной проблемы авторами в данной статье предлагается использовать аксиологический подход, методы интегрального оценивания (МСП, МРСР, АСПИД-методология) сложных (эмерджентных) систем, которые позволяют разрабатывать модели-классификации интегрального оценивания их состояния и интегративных свойств (продуктивность, устойчивость, экологическое благополучие и др.) систем в условиях достаточного информационного обеспечения и недостатка информации о критериях и приоритетах оценивания. Эти свойства систем неаддитивны по отношению к их компонентному составу и физическим свойствам среды, но при интегральной оценке они используются для характеристики аддитивных (масса, биомасса, численность, концентрация, объем и др.) и неаддитивные (автономность, устойчивость, благополучие, надежность) свойств природных систем.

Цель работы – провести интегральную оценку экологического благополучия природно-техногенной системы «водосбор – водохранилище» на примере Иваньковского водохранилища.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Аксиологический подход и квалиметрический анализ, методы интегрального оценивания (Хованов, 1996) сложных систем позволяют разрабатывать модели-классификации интегрального оценивания их благополучия.

Методология оценки экологического благополучия природно-техногенной системы «водосбор – водохранилище» включает последовательность следующих этапов, рассмотренных ниже.

1. Отбор обоснованной системы  $m$  исходных критериев  $X_1, \dots, X_m$  (вектор исходных характеристик) диагностики экологического благополучия ПТС «водосбор - водохранилище» (интегральный показатель ЭБ ПТС – ИПЭБПТС), входящих в композитные индексы КИПУЛ, КИКП, КИКВ, КИКАВ, КИПУВ, КИК, КИПВ.

$$\begin{pmatrix} x_1^{(1)}, \dots, x_i^{(1)}, \dots, x_m^{(1)} \\ x_1^{(j)}, \dots, x_i^{(j)}, \dots, x_m^{(j)} \\ x_1^{(k)}, \dots, x_i^{(k)}, \dots, x_m^{(k)} \end{pmatrix} \quad (1),$$

где  $x_i^{(j)}$  – значение  $i$ -й характеристики ( $i = 1, 2, 3, 4, \dots, m$ ) благополучия или свойства  $j$ -го объекта.

При выборе критериев следует стремиться к тому, чтобы каждый из них был необходим, а вся их совокупность была достаточна для описания рассматриваемой системы или ее свойства. Следует уточнить, что существуют характеристики (критерии), увеличение значений которых приводит к повышению качества системы (первый тип), а также характеристики, увеличение значений которых приводит к его снижению (второй тип). Одновременно с обоснованным выбором системы критериев вводятся классы ЭБ и формируются оценочные шкалы измерения для каждого критерия. Сводка критериев оценивания представлена в таблицах 1 и 2.

Таким образом, на первом этапе происходит обоснование теоретико-методологических положений для оценки современного и перспективного состояния системы с учетом неопределенности задания критериев и приоритетов оценивания.

2. Выбор нормирующих функций и нормирование исходных показателей. Исключение размерности исходных характеристик (критериев) с условием, при котором высокой степени ЭБ соответствовало бы значение 0, а низкой степени ЭБ значение равное 1 (можно наоборот). При этом, значение  $q_i$  лежит в диапазоне  $0 \leq q_i \leq 1$ . Нормирование показателей осуществляется на основе функций «минимакса», учитывающих вид связи (прямая/обратная) и ее линейность/нелинейность. Неубывающая кусочно-степенная функция вида:

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

используется в случае, если увеличение  $i$ -й исходной характеристики не влечет снижения благополучия, оцениваемого по  $i$ -му критерию. При этом, если увеличение  $i$ -й исходной характеристики эмерджентного свойства, оцениваемого по  $i$ -му критерию, ЭБ не возрастает, и используется невозрастающая кусочно-степенная функция вида:

$$q_i = q_i(x)_i = \begin{cases} 1, & x_i \leq \min_i \\ \left( \frac{\max_i - x_i}{\max_i - \min_i} \right)^\alpha, & \min_i < x_i \leq \max_i \\ 0, & x_i > \max_i \end{cases} \quad (3)$$

где:  $q_i(x)_i$  – результат нормирования;  $x_i$ ,  $\min_i$  – минимальное значение критерия;  $\max_i$  – максимальное значение критерия;  $\alpha$  – показатель степени, определяющий вид и степень нелинейности связи параметра с оцениваемым свойством. В нашем случае  $\alpha = 1,0$ , что оправдано на начальном этапе исследований.

В результате, строится вектор отдельных (нормированных) показателей  $q_1, \dots, q_m$  и формируется матрица вида:

$$\begin{vmatrix} q_1^{(1)}, \dots & q_i^{(1)}, \dots & q_m^{(1)} \\ q_1^{(j)}, \dots & q_i^{(j)}, \dots & q_m^{(j)} \\ q_1^{(k)}, \dots & q_i^{(k)}, \dots & q_m^{(k)} \end{vmatrix} \quad \dots \dots \quad \dots \quad (4)$$

где:  $q_i^{(j)}$  – значение  $i$ -го отдельного показателя ( $i = 1, 2, 3, 4 \dots m$ ) благополучия для  $j$ -го объекта ( $j = 1 \dots k$ ).

3. Решение проблемы выбора весовых коэффициентов. Вводится интерпретирующая (синтезирующая) функция  $I = I(q, w)$ , преобразующая  $q_i^{(j)}$  с учетом их приоритетности в

сводной оценке в виде  $w_i$  - весовых коэффициентов, в единый интегральный показатель. В качестве выражения для КИПУЛ, КИКП, КИКВ, КИКАВ, КИПУВ, КИК, КИПВ, ИПЭБПТС была выбрана линейная свертка вида:

$$I = I(q; w) = I(q_1, \dots, q_m; w_1, \dots, w_m) = \sum_{i=1}^m q_i w_i \quad (5)$$

Задание весовых коэффициентов  $w = (w_1, \dots, w_m)$  – неотрицательные «веса», определяющие значимость (приоритет) отдельных критериев для оцениваемого свойства, может быть реализовано на основе формализации неполной, неточной, нечисловой информации (*ннн-информации*) или экспертным путем. При этом элементы вектора весовых коэффициентов должны удовлетворять условиям:  $w_1 + \dots + w_m = 1$ ,  $0 \leq w_i \leq 1$ .

4. Выбор синтезирующей функции и оценка точности полученных результатов. Переход к интегральной оценке  $I = I(q, w) = MI(q, w)$ :

$$\bar{I}^{(j)}(w) = \bar{I}(q^j, w) = \frac{1}{N(m, n, w)} \sum_{t=1}^{N(m, n, w)} Q^t(q^j) \quad (6)$$

Оценка точности полученных результатов рассмотрена нами в большом количестве работ, приведенных в списке литературы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ниже представлены результаты выборки основных критериев для оценки ЭБ ПТС «водосбор – водохранилище» на основе накопленного опыта (Шитиков, 2003; Дмитриев, 2010; Огурцов, 2016; Севастьянов, 2016), а также фондовых данных мониторинга (табл. 3) (Ахметьева, 2007; Корнева, 2015; Минеева, 2016; Григорьева, 2018; Законнов, 2018; Кирпичникова, 2021; Лазарева, 2018; Минеева, 2019; Боршунова, 2021; Юрова, 2021). В качестве объекта апробации выбрана ПТС «водосбор – водохранилище» для Ивановского водохранилища, расположенного в Тверской и Московской областях. Ивановское водохранилище является основным источником питьевого водоснабжения, поэтому оценивание ЭБ и его изменение является стратегически важной задачей государственного уровня.

На основе разработанной модели-классификации выполнена оценка ЭБ системы «водосбор – водоем» и разработан подход для оценки нормы воздействия на систему и ее подсистемы.

Оценка нормы воздействия и его допустимости состоит в определении положительной или отрицательной значимости оказанного воздействия на систему на основе расчетов ИПЭБ до воздействия и после него и сопоставления интегральных показателей с их значениями, принимаемыми за норму (или за период, предшествующий воздействию). В случае, если система по величине интегрального показателя переходит в другой класс состояния, то воздействие считается нежелательным или недопустимым. Управление процессом осуществляется на основе мониторинга факторных показателей (критериев, признаков), формирующих сводный целевой показатель (индикатор, композитный индекс).

Перечень исходных критериев и их размерности представлены ниже (табл. 1). Интегральное оценивание ЭБ на основе метода сводных показателей (МСП) осуществлялось для двух уровней свертки показателей. На первом уровне реализовано построение ИП при равновесном значении исходных параметров внутри субиндексов. На первом уровне свертки реализовано построение композитных индексов потенциальной устойчивости ландшафта (КИПУЛ), качества водных объектов водосбора (КИКВ), качества почвы (КИКПВ), качества атмосферного воздуха (КИКАВ), качества воды (КИКВ), продуктивности водоема (КИПВ), потенциальной устойчивости (КИПУ). На втором уровне свертки производился расчет интегральных показателей экологического благополучия водосбора (ИПЭБВС) и водохранилища (ИПЭБВХ). На третьем уровне свертки рассчитывался интегральный

показатель экологического благополучия природно-техногенной системы «водосбор – водохранилище» (ИПЭБПТС) в целом на основе интегральных показателей первого и второго уровня свертки. В рассмотренном здесь примере расчет ИП производился при равенстве приоритетов (весовых коэффициентов).

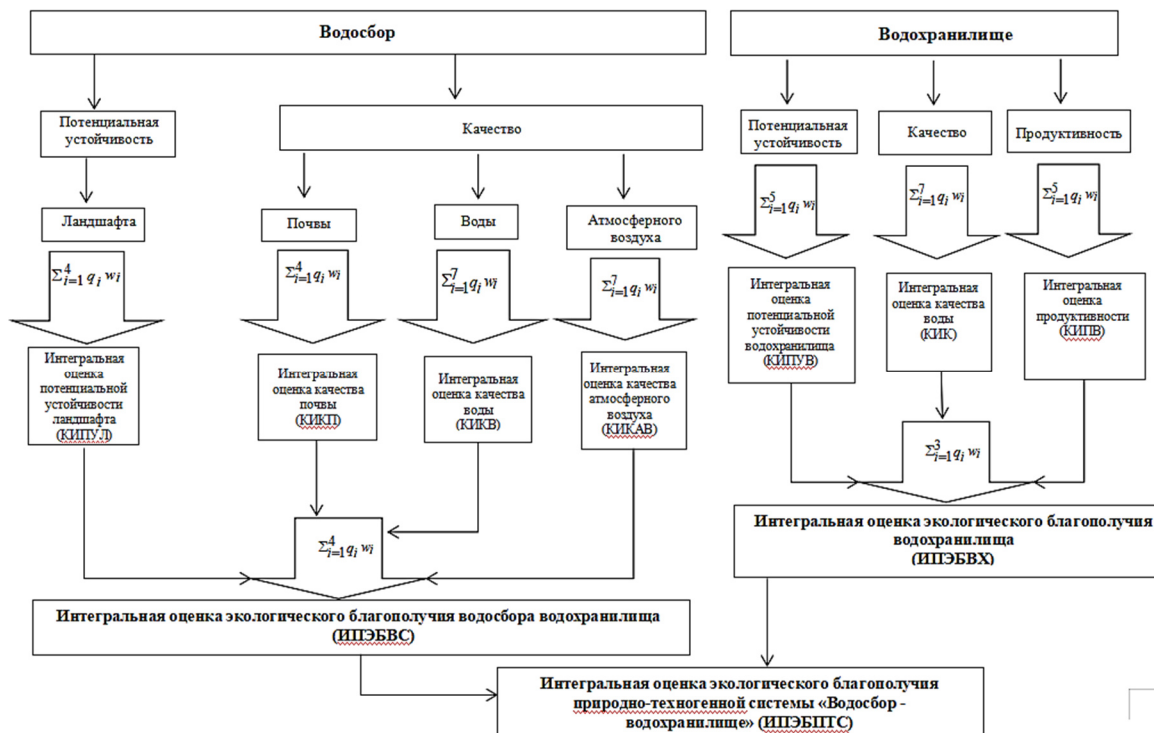


Рис. 1. Алгоритм получения интегрального показателя эмерджентного свойства природно-техногенной системы «водосбор – водохранилище»

Таблица 1

Критерии оценки экологического благополучия природно-техногенной системы «водосбор – водохранилище» для Иваньковского водохранилища

Наименование субиндексов	Территориальные детерминанты, включенные в субиндексы
1	2
<b>Водосбор</b>	
Потенциальная устойчивость ландшафтов водосбора	Оценивается по величине композитного индекса потенциальной устойчивости ландшафта (КИПУЛ) для 5 классов по 4 критериям: радиационный баланс (ккал/см <sup>2</sup> год), радиационный индекс сухости (К), ветровой режим: количество дней с сильными ветрами (баллы), индекс биологической эффективности климата (ТК)
Качество водных объектов водосбора	Оценивается по величине композитного индекса качества водных объектов водосбора (КИКВ) для 5 классов и включает 7 критериев: цветность (град), перманганатная окисляемость (мгО/л), концентрация Mn (мг/л), концентрация Fe (мг/л), концентрация Р <sub>общ</sub> (мгР/л), концентрация РО <sub>4</sub> (мгР/л), концентрация нитритного азота NO <sub>3</sub> (мг/л)
Качество почвы	Оценивается по величине композитного индекса качества почвы (КИКПВ) для 5 классов и включает 4 оценочных критерия: суммарный показатель загрязнения (Zс) (ед.), индекс БГКП, яйца и личинки гельминтов (жизнеспособных), коли-титр.

Таблица 1 (продолжение)

1	2
Качество атмосферного воздуха	Оценивается по величине композитного индекса качества атмосферного воздуха (КИКАВ) для 5 классов по 7 критериям: концентрация взвешенных веществ (дПДК), концентрация SO <sub>2</sub> (дПДК), концентрация NO <sub>2</sub> (дПДК), концентрация NO (дПДК), концентрация CO (дПДК), концентрация формальдегида (дПДК), концентрация бенз(а)пирена (дПДК)
Водохранилище	
Качество воды водохранилища	Оценивается по величине композитного индекса качества воды (КИКВ) для 5 классов по 7 критериям: водородный показатель (рН единиц), электропроводность (мкСм/см), прозрачность по диску Секки (SD) (м), цветность (град), БПК <sub>5</sub> (мгО <sub>2</sub> /л), концентрация азота аммонийного (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) (мгN/л), концентрация меди (мг/л), хлорофилл «a» (мкг/л)
Продуктивность водоема	Оценивается по величине композитного индекса продуктивности воды (КИПВ) для 5 классов и включает 4 критерия: концентрация общего фосфора (P) (мгк/л), насыщенность кислородом (%), отношение биомассы зоопланктона к биомассе фитопланктона (доли ед.), биомасса фитопланктона (г/м <sup>3</sup> )
Потенциальная устойчивость водоема	Оценивается по величине композитного индекса потенциальной устойчивости (КИПУ) для 5 классов по 6 критериям: наличие сезонной стратификации (баллы), вертикальное перемешивание, количество раз за год (баллы), условия проточности водоема (баллы), водообмен в год (ед.), характер регулирования стока (баллы)

Шкала интегрального показателя ЭБ последнего уровня свертки представлена ниже (табл. 2). Выделены пять классов ЭБ (I – высокая степень ЭБ, II – нормальная степень ЭБ, III – средняя степень ЭБ, IV – низкая степень ЭБ, V – чрезвычайно низкая степень ЭБ). Названия классов могут быть изменены (уточнены) по желанию пользователей.

Таблица 2

Оценочная шкала интегрального показателя экологического благополучия природно-техногенной системы «водосбор – водохранилище» (второй уровень свертки)

Класс экологического благополучия	I Высокая степень ЭБ	II Нормальная степень ЭБ	III Средняя степень ЭБ	IV Низкая степень ЭБ	V Чрезвычайно низкая степень ЭБ
Интегральный показатель экологического благополучия природно-техногенной системы «водосбор – водохранилище» (ИПЭБПТС)	0,00–0,16	0,16–0,33	0,33–0,51	0,51–0,75	0,75–1,00
Δ <sub>ИПЭБПТС</sub>	0,16	0,17	0,18	0,24	0,25
Δ̄ <sub>ИПЭБПТС</sub>	0,08	0,085	0,09	0,12	0,13
Середина (ИПЭБПТС)	0,08	0,25	0,42	0,63	0,88

В результате апробации рассмотренной выше методики ИПЭБПТС составил 0,41. Таким образом, по величине ИП ПТС «водосбор – водохранилище» для Ивановского водохранилища следует отнести к III классу ЭБ (левая граница класса, ближе к середине класса), и соответствует по введенной классификации средней степени ЭБ (границы ИП для класса 0,33–0,51).

Таблица 3

Исходные данные для оценки экологического благополучия природно-техногенной системы «водосбор – водохранилище» по материалам натуральных наблюдений 2018–2021 годов и результаты их нормирования (первый и второй уровни свертки)

Наименование критерия	Рекогносцировочное значение	Нормированное значение
1	2	3
Водохранилище		
Водородный показатель, рН единиц	8,20	0,00
Прозрачность по диску Секки (SD), м	1,7	0,68
Цветность, град	85	0,85
БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /л	1,9	0,19
Концентрация азота аммонийного (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ), мгN/л	0,32	0,064
Концентрация меди, мг/л	0,006	0,00
Концентрация железа, мг/л	0,95	0,00
КИК	-	0,25
Хлорофилл <i>a</i> , мкг/л	20,7	0,37
Концентрация общего фосфора, мгк/л	0,04	1,00
Насыщенность кислородом	72,4	0,20
Отношение биомассы зоопланктона к биомассе фитопланктона	0,82	0,20
Биомасса фитопланктона, г/м <sup>3</sup>	5,2	0,052
КИПВ	-	0,36
Наличие сезонной стратификации, баллы	2	0,20
Вертикальное перемешивание, количество раз за год, баллы	1	0,800
Условия проточности водоема, баллы	4	0,6
Водообмен в год, ед.	8,3	0,83
Характер регулирования стока, баллы	4	0,60
КИПУВ	-	0,61
ИПЭБВ	-	0,41
Водосбор		
Радиационный баланс (ккал/см <sup>2</sup> год)	33,10	1,0
Радиационный индекс сухости (К)	0,77	1,0
Ветровой режим: количество дней с сильными ветрами (баллы)	27	1,0
Индекс биологической эффективности климата (ТК)	6	0,30
КИПУЛ	-	0,83
цветность (град)	263,8	1,0
перманганатная окисляемость (мгО/л)	36,2	1,0
концентрация Mn (мг/л)	0,03	0,0
концентрация Fe (мг/л)	0,66	0,66
концентрация P <sub>общ</sub> (мгP/л)	0,11	0,10
концентрация PO <sub>4</sub> (мгP/л)	0,09	0,15
концентрация нитритного азота NO <sub>2</sub> (мг/л)	0,51	0,13
КИКВ	-	0,43
суммарный показатель загрязнения (Z <sub>c</sub> ), ед.	25	0,20
индекс БГКП, ед.	1	0,00
яйца и личинки гельминтов (жизнеспособных)	не обнаружено	0,00

Таблица 3 (продолжение)

1	2	3
коли-титр	не обнаружено	0,00
КИКП	-	0,05
концентрация взвешенных веществ (дПДКс.с.)	1,4	0,70
концентрация SO <sub>2</sub> (дПДКс.с.)	0,1	0,05
концентрация NO <sub>2</sub> (дПДКс.с.)	0,7	0,35
концентрация NO (дПДКс.с.)	0,4	0,20
концентрация CO (дПДКс.с.)	0,4	0,20
концентрация формальдегида (дПДКс.с.)	0,4	0,20
концентрация бенз(а)пирена (дПДКс.с.)	0,8	0,40
КИКАВ	-	0,30
ИПЭБВ	-	0,40

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы на основе литературных обобщений выделены признаки (критерии) для оценки ЭБ ПТС «Водосбор Ивановского водохранилища – Ивановское водохранилище», выделены классы ЭБ ПТС, собраны данные мониторинговых исследований за 2018–2021 годы; рассчитаны интегральные показатели ЭБ ПТС при условии равенства весов (приоритетов) внутри групп и между группами критериев в предположении линейного характера связей между индикаторами и оцениваемым свойством. Использование методологии построения ИП на основе МСП позволило получить интегральную оценку ЭБ ПТС и далее в серии экспериментов исследовать поведение системы при внешних воздействиях на нее. Для 2018–2021 годов ЭБ ПТС оценено III-м классом (левая граница ЭБ ближе к середине) – средняя степень ЭБ.

### Список литературы

- Ахметьева Н. П. Экологическое состояние природных вод водосбора Ивановского водохранилища и пути по сокращению их загрязнения. – Москва: Изд-во ЛКИ, 2007. – 223 с.
- Боршунова Д. В. Оценка степени загрязнения почвы по микробиологическим и паразитологическим показателям от объекта размещения отходов (ОРО), расположенного по адресу: Тверская обл., Калининский р-н, Славновское с/п, 21 км автодороги Тверь-Бежецк // Вестник научных конференций. – 2021. – № 7-2 (71). – С. 25–30.
- Григорьева И. Л., Комиссаров А. Б., Чекмарёва Е. А. Трансформация качества воды Ивановского водохранилища и его малых притоков за многолетний период под воздействием природных и антропогенных факторов // Вопросы географии. Русское географическое общество. Сб. 145. Гидрологические изменения. – 2018. – С. 337–347.
- Григорьева И. Л., Чекмарева Е. А. Влияние рекреационного водопользования на качество воды Ивановского водохранилища // Известия РАН. Серия географическая. – 2013. – № 3. – С. 63–70
- Дмитриев В. В., Федорова И. В., Бирюкова А. С. Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. Часть IV. Интегральная оценка экологического благополучия наземных и водных геосистем // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. – 2016. – № 2. – С. 37–53.
- Дмитриев В. В., Огурцов А. Н. Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. III. Интегральная оценка устойчивости почвы и наземных геосистем // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. Серия 7. Геология. География. – 2014. – № 4. – С. 114–130.
- Дмитриев В. В. Интегральные оценки состояния сложных систем в природе и обществе // Биосфера. – 2010. – Т. 2, № 3, – С. 507–520.
- Законнов В. В., Григорьева И. Л., Законнова А. В. Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 5. Донные отложения и качество воды Ивановского водохранилища // Водное хозяйство России. – 2018. – Т. 35, № 3. – С. 48.



Кирпичникова Н. В., Полянин В. О., Курбатова И. Е., Черненко Ю. Д. Критерии оценки экологического состояния водосборов малых рек и выноса биогенных веществ в Иваньковское водохранилище // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2021. – № 6. – С. 81–105.

Корнева Л. Г. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги / [Ред. А. И. Копылов]. – Кострома : Костромской печатный дом, 2015. – 284 с.

Лазарева В. А., Сибитова Р. З., Быкова С. В., Жданова С. М., Соколова Е. А. Распределение летнего зоопланктона в каскаде водохранилищ Волги и Камы // Труды ИБВВ РАН. – 2018. – Вып. 83 (86), – С. 62–83.

Минеева Н. М., Корнева Л. Г., Соловьева В. В. Влияние факторов среды на фотосинтетическую активность фитопланктона водохранилищ реки Волги // Биология внутренних вод. – 2016. – № 3. – С. 47–56.

Минеева Н. М. Содержание фотосинтетических пигментов в водохранилищах верхней Волги (2005–2016 гг.) // Биология внутренних вод. – 2019. – № 2. – С. 33–41.

Многокритериальные географо-экологические оценки состояния и устойчивости природных и урбанизированных систем. Деп. ВИНТИ 01.09.2000. № деп.2342В00, 275 с.

Хованов Н. В. Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. – СПб.: СПбГУ, 1996. – 195 с.

Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. – Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. – 436 с.

Юрова О. В. Состояние вод в зоне Иваньковского водохранилища и влияние на водные биологические ресурсы // Материалы Международной научно-практической конференции. Инновационные технологии в АПК: проблемы и перспективы, Тверь, 2021. – С. 137–141.

Brousmichea D., Occellia F., Geninb M., Cunya D., Derama A., Lanier C. Spatialized composite indices to evaluate environmental health inequalities: Meeting the challenge of selecting relevant variables. *Ecological Indicators*. 111 (2020) 106023. URL.: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106023>. (дата обращения: 03.02.2020).

Dmitriev V. V., Terleev, V. V., Nikonorov, A. O., Ogurtsov, A. N., Osipov, A. G., Sergeev, Y. N., Kulesh, V. P., Fedorova, I. V. (2020). Global Evaluation of the Status and Sustainability of Terrestrial Landscapes and Water Bodies. *Landscapes Modelling and Decision Support*, 231–253. doi:10.1007/978-3-030-37421-1\_12

**Vaskova E. A., Dmitriev V. V. Integral assessment of the ecological well-being of the natural-technogenic system "catchment - reservoir" of the Ivankovo reservoir // *Ekosistemy*. 2023. Iss. 34. P. 21–29.**

Based on the axiological approach, the author's idea of the ecological well-being (EW) of the "reservoir-catchment" system is formed. The goal of assessing the EW of a natural-technogenic system (NTS) is considered as a task of analyzing and synthesizing indicators based on the development of multi-criteria and multi-level classification models, in which classification assessment scales are proposed according to well-being classes for territorial determinants that characterize the well-being of terrestrial and aquatic geosystems. The purpose of the work: to assess the EW of the NTS "catchment – reservoir" on the example of the Ivankovskoye reservoir for the period 2018–2021. For the assessment, 5 classes of environmental well-being are introduced, 3 levels of convolution of indicators are used, in which 9 sub-indices are calculated. The first level is the quality of the watershed environment – 3 sub-indexes, the potential sustainability of the watershed – 1 sub-index, the potential sustainability of the reservoir – 1 sub-index, the water quality of the reservoir: – 1 sub-index, the productivity of the reservoir – 1 sub-index. The second level is the ecological well-being of the watershed 2 sub-indices: 1 – potential sustainability and quality of the watershed environment; 2 – ecological well-being of the reservoir: productivity, water quality and potential sustainability of the reservoir: the third level – the ecological well-being of the watershed and the ecological well-being of the reservoir. As a result of approbation of the methodology for the PTS "catchment – reservoir" for the Ivankovskoye reservoir using monitoring data for the period 2018–2021, a series of calculations of the composite EB index was performed. In the calculation scenarios, the equilibrium/nonequilibrium setting of priorities (weight factors) within the sub-indices and at the last level of convolution, the change in territorial determinants, was studied. In general, it was found that in this period, the PTS EB was assessed by the value of the integral indicator of the last convolution level as the III-rd class (the left border is closer to the middle of the class) – “Average degree of EW”.

*Key words:* ecological well-being, natural-technogenic system, Ivankovskoye reservoir, catchment area of Ivankovskoye reservoir.

*Поступила в редакцию 03.12.22*

*Принята к печати 25.01.23*