

География

УДК 502.55

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО БЛАГОПОЛУЧИЯ
СЛОЖНЫХ СИСТЕМ КАК СПОСОБ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Е. А. ВАСЬКОВА *

АО “ТК ШАНЭКО”, Москва, Россия

В условиях нарастающего антропогенного воздействия на природные и природно-техногенные системы оценка воздействия на окружающую среду требует качественного системного инструментария. Задача определения степени экологического благополучия в условиях оценки воздействия техногенной системы на природу и общество, является основой для выполнения права каждого человека жить в окружающей среде, способствующей его здоровью и благополучию. Цель работы предполагает получение интегральной оценки данного системного свойства – определение воздействия сложной природной, природно-техногенной системы в природе и обществе с позиции экологического благополучия. Для получения такого системного свойства применяется метод сводных показателей, позволяющий преобразовать совокупность критериев в четко сформированный интегральный показатель оцениваемого свойства.

<https://doi.org/10.46991/PYSUC.2025.59.2.201>

Keywords: environmental well-being, natural-technogenic system, emergency situation, Tsimlyansk reservoir.

Введение. Оценка воздействия на окружающую среду основана на принципах международных требований: Декларация по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, 14.06.1992), Парижское соглашение в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата, регулирующее меры по снижению содержания углекислого газа в атмосфере с 2020 г., Конвенция о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния, Конвенция о биологическом разнообразии. Данная оценка предполагает выявление, анализ и учет прямых, косвенных и иных последствий воздействия на окружающую среду планируемой деятельности в целях принятия решения о возможности или невозможности ее осуществления.

Оценка воздействия на окружающую среду несет под собой сохранение экологического благополучия природной и природно-техногенной систем, а также здоровья человека. В результате обзора научно-методических работ [1–7] установлено, что экологическое благополучие (ЭБ) природно-техногенной

* E-mail: ecologvaskovaea@gmail.com

системы (ПТС) должно комплексно учитывать абиотические, биотические и антропогенные факторы с включением социальной и экономической составляющих, а также учитывать присущие ей продуктивность, устойчивость, безопасность, которые в совокупности определяют *экологическое благополучие системы*. Таким образом, оценку ЭБ можно представить как неотъемлемую часть понятийного аппарата в области ЭБ ПТС и выполнения оценки воздействия на окружающую среду.

Интегральная оценка ЭБ ПТС является актуальным вопросом в связи с нарастающим количеством таких эмерджентных систем, как гидротехнические и аналогичные объекты капитального строительства. В экологии и геоэкологии исследователи часто приводят отдельные показатели без формирования в дальнейшем интегральной оценки или же выполняют оценку отдельных компонентов свойства сложной системы относительно значений предельно допустимой концентрации (ПДК), предельно допустимого уровня (ПДУ) и др.

Также при оценках состояния природной, природно-техногенной системы и формирования интегрального показателя системного свойства исследователь может сталкиваться с дефицитом статистической числовой информации. При этом привлечение экспертов к вопросу оценки приводит к ограничению в рамках сравнительных суждений о превосходстве (равенстве) вероятностей принадлежности объекта к разным классам состояния (системного свойства).

На основе обзора основных работ [6, 8–13] в данной области установлено, что метод сводных показателей является наиболее универсальным и позволяет решать ряд проблем для получения интегральной оценки ЭБ ПТС.

Материалы и методы исследования. Классический вариант метода построения (формирования) сводного интегрального показателя Q системного свойства сложного объекта ПТС состоит в определении вектора исходных критериев (характеристик), нормирующих функций и синтезирующих функций, а также вектора (кортежа) весовых коэффициентов, оценивающих сравнительную значимость отдельных показателей. Результатом данной процедуры является конечная оценка (интегральный показатель, композитный индекс, субиндекс и пр.) оцениваемого свойства сложного объекта.

Метод сводных показателей, адаптированный для получения интегрального показателя ЭБ представлен на схеме (см. схему).



Этапы и содержание получения интегрального показателя ЭБ ПТС.

Нормирование показателей выполняется на основе двух нормирующих функций, представленных в формулах (1) и (2).

Неубывающая кусочно-степенная функция, представленная в формуле (1), используется в случае, если увеличение значения k -й исходной характеристики не влечет снижения свойства системы, оцениваемого с позиции k -го критерия. Таким образом, всем параметрам со значениями x_n , не превышающим некоторого фиксированного уровня \min_k , автоматически присваивается минимальное значение k -го нормированного показателя, в том время как параметру со значением x_k , превышающему некоторый фиксированный уровень \max_k , присваивается максимальное значение этого показателя.

$$q_k = q_k(x)_k = \begin{cases} 0, & x_k \leq \min_k, \\ \left(\frac{x_k - \min_k}{\max_k - \min_k} \right)^\alpha, & \min_k < x_k \leq \max_k, \\ 1, & x_k > \max_k. \end{cases} \quad (1)$$

Нормирующая функция (2) используется, когда увеличение значения i -й исходной характеристики не сопровождается возрастанием $q_k(x)_k$, в таком случае используется невозрастающая кусочно-степенная функция вида

$$q_k = q_k(x)_k = \begin{cases} 1, & x_k \leq \min_k, \\ \left(\frac{\max_k - x_k}{\max_k - \min_k} \right)^\alpha, & \min_k < x_k \leq \max_k, \\ 0, & x_k > \max_k, \end{cases} \quad (2)$$

где $q_k(x)_i$ – нормирующая функция. В формулах (1) и (2) параметр α отражает нелинейность (выпуклость/вогнутость) связи параметра с оцениваемым свойством. В контексте данного исследования α принимается равной 1,0.

Значение q_k лежит в диапазоне $0 \leq q_k \leq 1$, при этом в данном исследовании $q_k = 0$ характеризует благополучие системы по i -му критерию, а значение $q_k = 1$ – чрезвычайно низкую степень ЭБ.

В рамках данной работы синтезирующая (интерпретирующей, агрегирующей) функция интегрального показателя (Integral Indicator) $Q = Q(q, w)$, сопоставляющая вектору отдельных показателей $q = (q_1, \dots, q_m)$ сводную оценку Q (значение сводного показателя $Q = Q(q, w)$ представлена функцией вида (3)):

$$Q(q, w) = \sum_{k=1}^m q_k w_k. \quad (3)$$

Выбор приоритетов (весов) учета отдельных характеристик внутри блоков и выбор приоритетов (весов) учета самих блоков в сводной оценке, как правило вес характеристик (блоков), выявляется на основе экспертных оценок или моделирования весовых множителей на основе учета неполной, неточной, нечисловой информации (т.н. ннн-информации), а также дополнительных суждений о приоритетах. В этом случае важным является выполнение следующих условий:

$$\begin{cases} 0,000 < w_i \leq 1,000, \\ w_1 + \dots + w_m = 1. \end{cases} \quad (4)$$

Первое условие формулы (4) подтверждает, что вес каждого параметра (блока) изменяется от 0,000 до 1,000 с учетом требуемой точности, а второе условие свидетельствует о том, что сумма весов всех учитываемых критерии

внутри блока равна 1, как и сумма весов, отражающих приоритетность самих блоков также равна 1.

Результаты исследований и их обсуждение. В результате применения методологии получения интегрального показателя ЭБ ПТС водохранилище–гидроузел были получены оценочные шкалы интегральных показателей:

- интегральный показатель ЭБ водохранилища (третьего уровня свертки) IIW_R (Integral index of Ecological Well-being of Reservoir);
- интегральный показатель ЭБ гидроузла IIW_H (Integral Index of Ecological Well-being of Hydropower plant);
- общий интегральный показатель ЭБ ПТС водохранилище–гидроузел IIW_{NTS} .

Оценочные шкалы интегральных показателей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Оценочные шкалы интегральных показателей IIW_R , IIW_H , IIW_{NTS} ПТС водохранилище–гидроузел

I Высокая степень ЭБ	II Нормальная степень ЭБ	III Средняя степень ЭБ	IV Низкая степень ЭБ	V Чрезвычайно низкая степень ЭБ
Интегральный индекс экологического благополучия водохранилища (IIW_R)				
0,000–0,171	0,171–0,369	0,369–0,556	0,556–0,759	0,759–1,000
Интегральный индекс экологического благополучия ГЭС (IIW_H)				
0,000–0,213	0,213–0,427	0,427–0,653	0,653–0,830	0,830–1,000
Интегральный индекс экологического благополучия природно-техногенной системы (IIW_{NTS})				
0,000–0,192	0,192–0,398	0,398–0,605	0,605–0,795	0,795–1,000

В качестве объекта апробации выбрана ПТС водохранилище–гидроузел Цимлянского водохранилища.

Критерии оценки представлены в табл. 2.

Путем нормирования выбранных критериев для оценки ПТС Цимлянского водохранилища получены следующие значения интегральных показателей: $IIW_R = 0,404$; $IIW_H = 0,365$; $IIW_{NTS} = 0,385$. Таким образом, IIW_R соответствует III классу ЭБ ПТС (средняя степень ЭБ), IIW_H – II классу ЭБ (нормальная степень ЭБ) и IIW_{NTS} – соответствует правой границе II-го класса ЭБ ПТС (нормальная степень ЭБ).

Дополнительно методология реализована для формирования интегрального показателя ЭБ ПТС водохранилище–река (критерии оценки представлены в табл. 3) с расчетом следующих субиндексов:

- интегральный показатель ЭБ водохранилища (третьего уровня свертки) IIW_R (Integral index of Ecological Well-being of Reservoir);
- интегральный показатель ЭБ реки IIW_{River} (Integral index of Ecological Well-being of River);
- общий интегральный показатель ЭБ ПТС водохранилище–река IIW_{NTS} .

Оценочные шкалы интегральных показателей представлены в табл. 4.

Таблица 2

Критерии для получения интегральной оценки ЭБ ПТС водохранилище–гидроузел,
Цимлянское водохранилище

Наименование субиндекса/интегрального показателя	Перечень критериев, входящих в модельный кортеж субиндекса/интегрального показателя
SIQ_R^P (субиндекс качества воды по гидро-физическим критериям)	<ul style="list-style-type: none"> – водородный показатель, pH единиц – прозрачность воды по Секки, м – удельная электрическая проводимость, мкСм/см (для непроточных водоемов)
SIQ_R^C (субиндекс качества воды по гидро-химическим критериям)	<ul style="list-style-type: none"> – концентрация азота аммонийного NH_4, мг/л – водородный показатель, pH единиц – концентрация нитрит-аниона (NO_2^-), мг N/л – концентрация нитрат-аниона (NO_3^-), мг N/л – БПК₅, мг O_2/л – фосфаты, мг/л – ХПК
SIQ_R^T (субиндекс качества воды по токсикологическим критериям)	<ul style="list-style-type: none"> – концентрация железа, мг/л – концентрация фенола (летучий), мг/л – концентрация нефти и нефтепродуктов (суммарно), мг/л
SIP_R (субиндекс продуктивности водного объекта (водохранилища))	<ul style="list-style-type: none"> – биомасса фитопланктона, мг/л – биомасса зообентоса, мг/л – отношение биомассы зоопланктона к биомассе фитопланктона – хлорофилл а, мкг/л
SPS_R^{PC} (субиндекс потенциальной устойчивости водного объекта (водохранилища))	<ul style="list-style-type: none"> – наличие сезонной стратификации, баллы – вертикальное перемешивание, количество раз в год
SIS_R^C (субиндекс устойчивости к изменению климатических параметров)	<ul style="list-style-type: none"> – средняя температура воды в летний период, °С – продолжительность ледостава, месяцы
SPS_R^H (субиндекс устойчивости к изменению гидрологических параметров)	<ul style="list-style-type: none"> – условия проточности водоема, баллы – площадь поверхности водоема, км² – объем водоема, км³ – максимальная глубина, м – внутригодовая амплитуда колебаний уровня воды в водоеме, м – характер регулирования стока, баллы – водообмен в год, ед.
$SIH_{sustain}$ (субиндекс устойчивости гидроузла)	<ul style="list-style-type: none"> – увеличение частоты наводнений, баллы – наведенная сейсмичность, баллы – ошибки в аспектах проектирования ГТС: изыскания, проектирование, конструирование, баллы – раскрытие информации собственником ГТС (гидроузла) в соответствие со стандартами устойчивого развития (гри, мсфо), баллы
SIH_{safe} (субиндекс безопасности гидроузла)	<ul style="list-style-type: none"> – численность населения, проживающего в вероятной зоне затопления, чел. – общее время эксплуатации ГТС, лет – класс безопасности сооружения, балл – наличие или отсутствие собственника ГТС, балл – каскадность гидроузла, балл

Таблица 3

*Критерии для получения интегральной оценки ЭБ ПТС водохранилище–река,
Цимлянское водохранилище*

Наименование субиндекса/ интегрального показателя	Перечень критериев, входящих в модельный кортеж субиндекса/интегрального показателя
SIQ_R^P (субиндекс качества воды по гидрофизическим критериям)	<ul style="list-style-type: none"> – водородный показатель, pH единиц – прозрачность воды по Секки, м – удельная электрическая проводимость, мкСм/см (для непроточных водоемов)
SIQ_R^C (субиндекс качества воды по гидрохимическим критериям)	<ul style="list-style-type: none"> – концентрация азота аммонийного NH_4, мг/л – водородный показатель, pH единиц, – концентрация нитрит-аниона (NO_2^-), мг N/л – концентрация нитрат-аниона (NO_3^-), мг N/л – БПК₅, мг O_2/л – фосфаты, мг/л – ХПК
SIQ_R^T (субиндекс качества воды по токсикологическим критериям)	<ul style="list-style-type: none"> – концентрация железа, мг/л – концентрация фенола (летучий), мг/л – концентрация нефти и нефтепродуктов, (суммарно), мг/л
SIP_R (субиндекс продуктивности водного объекта (водохранилища))	<ul style="list-style-type: none"> – биомасса фитопланктона, мг/л – биомасса зообентоса, мг/л – отношение биомассы зоопланктона к биомассе фитопланктона, – хлорофилл а, мкг/л
SPC_R^P (субиндекс потенциальной устойчивости водного объекта (водохранилища))	<ul style="list-style-type: none"> – наличие сезонной стратификации, баллы – вертикальное перемешивание, количество раз в год
SIS_R^C (субиндекс устойчивости к изменению климатических параметров)	<ul style="list-style-type: none"> – средняя температура воды в летний период, °C – продолжительность ледостава, месяцы
SPS_R^H (субиндекс устойчивости к изменению гидрологических параметров)	<ul style="list-style-type: none"> – условия проточности водоема, баллы – площадь поверхности водоема, км² – объем водоема, км³ – максимальная глубина, м – внутригодовая амплитуда колебаний уровня воды в водоеме, м – характер регулирования стока, баллы – водообмен в год, ед.
SIQ_{River}^C (субиндекс качества воды реки по гидрохимическим критериям)	<ul style="list-style-type: none"> – концентрация азота аммонийного NH_4, мг N/л – концентрация нитрит-аниона (NO_2^-), мг N/л – БПК₅, мг O_2/л – фосфаты, мг/л
SIQ_{River}^T (субиндекс качества воды реки по токсикологическим критериям)	<ul style="list-style-type: none"> – концентрация меди, мг/л – концентрация фенола (летучий), мг/л – концентрация нефти и нефтепродуктов, (суммарно), мг/л
SIP_{River} (субиндекс продуктивности реки)	<ul style="list-style-type: none"> – насыщенность кислородом, мг/л – биомасса зообентоса, мг/л

В результате нормирования выбранных критериев оценки ЭБ ПТС Цимлянского водохранилища получены следующие значения интегральных показателей: $IIW_R = 0,404$; $IIW_{River} = 0,157$; $IIW_{NTS} = 0,281$. Таким образом,

IIW_R соответствует III классу ЭБ ПТС (средняя степень ЭБ), IIW_{River} – II классу ЭБ (нормальная степень ЭБ) и IIW_{NTS} – соответствует также правой границе II-го класса ЭБ ПТС (нормальная степень ЭБ).

Таблица 4

Оценочные шкалы интегральных показателей IIW_R , IIW_{River} , IIW_{NTS} ПТС водохранилище–река

I Высокая степень ЭБ	II Нормальная степень ЭБ	III Средняя степень ЭБ	IV Низкая степень ЭБ	V Чрезвычайно низкая степень ЭБ
Интегральный индекс экологического благополучия водохранилища (IIW_R)				
0,000–0,171	0,171–0,369	0,369–0,556	0,556–0,759	0,759–1,000
Интегральный индекс экологического благополучия ГЭС (IIW_{River})				
0,000–0,075	0,075–0,218	0,218–0,454	0,454–0,683	0,683–1,000
Интегральный индекс экологического благополучия природно-техногенной системы (IIW_{NTS})				
0,000–0,123	0,123–0,294	0,294–0,505	0,505–0,721	0,721–1,000

Заключение. В условиях антропогенной нагрузки важно сохранение баланса и экологического благополучия природно-техногенных систем. Оценка воздействия на окружающую среду предполагает предварительный и прогнозный элемент сохранения необходимого уровня ЭБ сложных систем.

Интегральная оценка позволяет понять источники негативного воздействия, а также спрогнозировать степень экологического бедствия.

В рамках данной работы представлена методология, адаптированная для получения интегрального показателя ЭБ ПТС водохранилище–гидроузел и водохранилище–река Цимлянского водохранилища. В результате апробации методологии интегральный показатель обеих систем соответствует нормальному уровню ЭБ. Однако данный результат получен в связи с равновесомостью критериев и интегральных показателей, что не всегда соответствует практическим ситуациям, когда субъективное решение о приоритетности того или иного критерия принимается лицом, принимающим решение.

В то же время результат оценки доказывает необходимость введения рандомизации сводных показателей с вводом соответствующей приоритетности критерия и/или интегрального показателя.

Поступила 04.04.2025
Получена с рецензии 03.06.2025
Утверждена 15.08.2025

ЛИТЕРАТУРА

- Суздалева А.Л. Геоэкологические аспекты природно-техногенных систем. Москва, МЭИ (2017), 35.

2. Суздалева А.Л., Горюнова С.В. *Техногенез и деградация поверхностных водных объектов*. Москва, ООО ИД ЭНЕРГИЯ (2014), 456.
3. Ситникова В.А. *Оценка геоэкологического состояния компонентов окружающей среды на территории агломерации города Горно-Алтайска*. Автореф. на соискание уч. степ. канд. геол.-минерал. наук ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». Томск, (2018), 22 с.
4. Буханова Г.А. *Методика геоэкологической оценки природно-техногенных геосистем карьеров по добывче строительного сырья для их рекультивации и санации*. Автореф. на соискание уч. степ. канд. географ. наук. Воронеж, ВУНЦ ВВС Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (2021), 23.
5. Об утверждении Методики разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей. Приказ Минприроды России от 29 декабря 2020 г. № 1118.
6. Булычев С.Н., Чверткин А.Г., Васькова Е.А. Интегральная оценка экологического благополучия природно-техногенной системы водохранилища с использованием композитных индексов. *Экология промышленного производства* **3** (2022), 2–12.
7. Axatova D., Axatova X. Integrating Ecology and Healthy Living: Strategies for Sustainable Wellness. *GreenEnergy 2024*, Toronto, Canada. *E3S Web of Conferences* **587** (2024), 1–13. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458702015>
8. Осипова А.А., Дмитриев В.В. Интегральные оценки качества жизни населения и качества городской среды г. Санкт-Петербург. *Международный журнал экспериментального образования* **3** (2014), 96–102.
9. Кукс А.В. Применение рандомизированных сводных показателей при оценивании финансово-экономической устойчивости банковских организаций. *Научная гипотеза* **1** (2017), 36–66.
10. Дмитриев В.В., Огурцов А.Н. Устойчивость сложных систем в природе и обществе: методология, оценка, результаты. *Геоэкология* **48** (2017), 72–84.
11. Дмитриев В.В., Каледин Н.В. Интегральная оценка состояния региональных социо-эколого-экономических систем и качества жизни населения (на примере субъектов СЗ Федерального округа России). СПб., *Санкт-Петербург. гос. ун-т, Балтийский регион* **8** (2016), 125–140. <https://doi.org/10.5922/2074-9848-2016-2-7c>
12. Корников В.В., Хованов Н.В., Юдаев М.С. Многокритериальная классификация в условиях дефицита числовой информации. *Tr. Карельского центра РАН* **5** (2012), 38–43.
13. Дмитриев В.В., Федорова И.В. и др. «Гидрология», «экология» и «геоэкология» в современных исследованиях водных объектов суши: акценты, проблемы, решения. *Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению*. Сб. докл. международ. науч. конф. памяти выдающегося русского гидролога Ю.Б. Виноградова. Санкт-Петербург (2020), 12–33.

Ե. Ա. ՎԱՍԿՈՎԱ

ԲԱՐԴ ԲՆԱՊԱՀՊԱՆԱԿԱՆ ԲԱՐԵԿԵՑԿԻԿ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ
ԻՆՏԵԳՐՎԱԾ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ ՈՐՊԵՍ ԾՐՁԱԿ ՄԻՋՎԱՅՐԻ ՎՐԱ
ԱՉԻԵՑՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՄԱՆ ՄԵԹՈԴ

Ամփոփում

Բնական և բնական-տեխնոգեն համակարգերի վրա մարդածին ազդեցության աճի համատեքստում շրջակա միջավայրի վրա ազդեցության գնահատումը պահանջում է ավելի որակյալ համակարգային գործիքներ:

Բնապահպանական բարեկեցության որոշման խնդիրը, բնության և հասարակության վրա համակարգի ազդեցության գնահատման պայմաններում, իհմք է հանդիսանում յուրաքանչյուր մարդու՝ իր առողջությունն ու բարեկեցությունը իրանող միջավայրում ապրելու իրավունքի իրականացման համար:

Աշխատանքի նպատակն է ստանալ տվյալ համակարգային հատկության ինտեգրված գնահատական՝ որոշելով բարդ բնական, բնատեխնածին համակարգի համալիր ազդեցությունը բնության և հասարակության վրա՝ էկոլոգիական բարեկեցության տեսանկյունից: Նման համակարգային հատկություն ստանալու համար օգտագործվում է ամփոփ ցուցանիշների մեթոդը, որը թույլ է տալիս չափանիշների ամբողջությունը վերածել հստակ սահմանվածի:

E. A. VASKOVA

INTEGRAL ASSESSMENT OF ECOLOGICAL WELL-BEING
OF COMPLEX SYSTEMS AS A METHOD FOR EVALUATING
ENVIRONMENTAL IMPACT

Summary

In the context of increasing anthropogenic pressure on natural and nature-technical systems, the assessment of environmental impact requires a more qualitative systemic toolkit. The task of determining ecological well-being in the context of assessing a system's impact on nature and society is fundamental to fulfilling every person's right to live in an environment conducive to their health and well-being. The aim of this work is to obtain an integral assessment of this systemic property – to determine the comprehensive impact of a complex natural and nature-technical system on nature and society from the perspective of ecological well-being. To achieve such a systemic property, a method of summary indicators is applied, allowing the transformation of a set of criteria into a clearly defined integral indicator of the assessed property.