

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИРОДНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ ИНДЕКСНЫМИ МЕТОДАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

А. В. Маслобоев

Институт информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова Федерального
исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия
Институт проблем промышленной экологии Севера Федерального исследовательского центра
«Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия
masloboev@iimm.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Исследование направлено на разработку подходов и методов информационной поддержки многокритериального принятия решений в задачах управления объектами природно-промышленных систем Арктической зоны России с целью обеспечения их экологической безопасности и устойчивого функционирования в условиях воздействия негативных факторов природного и техногенного характера. Региональные особенности и специфика хозяйственного освоения обуславливают уязвимость объектов, локализованных на территории данного региона, в плане возникновения неблагоприятных иницирующих событий различного генезиса, что требует выработки эффективных мер и стратегических решений, повышающих надежность и безопасность объектов существующей региональной инфраструктуры. Для обоснованного выбора мер противодействия актуальным угрозам в процессе управления необходимо проводить оценку и анализ вариантов решений по многим критериям. *Материалы и методы.* Единая методологическая база исследования включает общую теорию безопасности, методологию управления рисками и развивающуюся на современном этапе концепцию жизнеспособности сложных систем. Предлагаемый подход к многоуровневой интегральной оценке экологической безопасности территорий основан на совместном применении индексных методов количественного и качественного анализа разнородных показателей устойчивости экосистем и иерархическом агрегировании оценок. *Результаты и выводы.* Разработан модифицированный индикаторный метод, расширяющий возможности известных методик расчета интегрального показателя состояния экосистем в части учета качественных показателей и ситуационных факторов, их неравнозначности и антагонистичности, а также сохранения сбалансированности показателей. Метод основан на автоматической трансформации оценок в функции принадлежности и нечеткой свертки нормализованных показателей по уровням организационной иерархии. Метод позволяет количественно оценить степень воздействия объектов природно-промышленных систем на состояние устойчивости экосистем в условиях неполной определенности исходных данных и может быть использован для подготовки и реализации комплекса превентивных и реактивных мер по повышению экологической безопасности территорий при импактном мониторинге этих объектов.

Ключевые слова: природно-промышленная система, анализ устойчивости экосистем, управление, экологическая безопасность, многокритериальная оценка, нечеткий индексный метод, интегральный показатель

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания ИИММ КНЦ РАН (НИР № FMEZ-2025-0054) и ИППЭС КНЦ РАН (НИР № FMEZ-2025-0044).

Для цитирования: Маслобоев А. В. Особенности оценки экологической устойчивости природно-промышленных систем индексными методами с применением мягких вычислений // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 2. С. 119–135. doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-13

ECOLOGICAL RESILIENCE ASSESSMENT FEATURES OF NATURAL-INDUSTRIAL SYSTEMS BY INDEX-BASED METHODS USING SOFT COMPUTING

A.V. Masloboev

Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Federal Research Center
"Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia
Institute of North Industrial Ecology Problems of the Federal Research Center
"Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia
masloboev@iimm.ru

Abstract. *Background.* The study is aimed at developing approaches and methods for information support of multi-criteria decision-making in management problem-solving of natural-industrial system entities in the Arctic region of Russia in order to ensure their environmental safety and resilient operation under the influence of negative natural and man-made factors. Regional peculiarities and specific character of economic development condition on the vulnerability of entities localized in the territory of a given region in terms of the emergence of adverse triggering events of various genesis, necessitating the development of effective measures and policy decisions that enhance the reliability and safety of existing regional infrastructure entities. To make informed decisions and a reasonable choice of measures to counteract current threats when managing safety and resilience of ecosystems, the evaluation and analysis of alternative decisions based on multiple criteria should be carried out. *Materials and methods.* The unified methodological framework of our study includes the fundamentals of safety sciences, risk management methodology, and the state-of-the-art resilience concept of complex systems, as currently developing research area. The proposed approach to a multi-level integral estimation of environmental safety of territories is based on the combined use of index-based methods for quantitative and qualitative analysis of heterogeneous indicators of ecosystem resilience and hierarchical aggregation of the assessments. *Results and conclusions.* A modified index-based method, expanding the capabilities of existing methodologies for calculating the integral index of environmental conditions by incorporating qualitative indicators and situational factors, taking into account their unequal significance and antagonism, as well as maintaining the balance of indicators, has been developed. The method is based on the automatic transformation of estimates into membership functions and fuzzy convolution of the normalized indicators across levels of the organizational hierarchy. Proposed method allows for a quantitative assessment of the exposure degree of natural-industrial system entities on the state of ecosystem resilience under incompleteness and uncertainty of the raw data, and can be used to prepare and implement a set of preventive and reactive measures to improve the environmental safety of the territory when providing control and impact monitoring of these entities.

Keywords: natural-industrial system, ecosystem resilience analysis, management, environmental safety, multi-criteria assessment, index-based fuzzy method, integral performance criterion

Financing: the work was carried out within the framework of the State Research Program of the Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling KSC RAS (project No. FMEZ-2025-0054) and Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS (project No. FMEZ-2025-0044).

For citation: Masloboev A.V. Ecological resilience assessment features of natural-industrial systems by index-based methods using soft computing. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(2):119–135. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-13

Введение

Арктическая зона Российской Федерации (АЗ РФ) имеет стратегическое значение для обеспечения национальной безопасности и технологического суверенитета страны. Поэтому социально-экономическое и инфраструктурное развитие регионов АЗ РФ является одним из приоритетных направлений государственной политики. Большая часть территории АЗ РФ характеризуется неблагоприятными климатическими условиями, высокими экологическими рисками, труднодоступностью и, как следствие, ограниченным развитием инфраструктурной обеспеченности. Все это требует сфокусированного внимания к вопросам надежности и эффективности функционирования объектов как существующей инфраструктуры АЗ РФ, так и рационального планирования новых инфраструктурных проектов на этой территории. При этом необходимость решения всего комплекса возникающих в этой связи проблем и задач по обеспечению безопасности и устойчивости критических инфраструктур различного типа, в том числе природно-промышленных систем, обусловленных спецификой и региональными особенностями АЗ РФ, приобретает сегодня особую актуальность для арктических регионов.

Интенсификация климатической повестки, обусловившая включение «Основами государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года»¹ и «Стратегией развития АЗ РФ и обеспечения национальной безопасности до 2035 года»² широкого блока задач по сохранению биоразнообразия, обеспечению экологического благополучия и техносферной безопасности в число основных государственных императивов развития арктических регионов, наряду с утверждением «Национальных целей развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу

¹ Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года : указ Президента РФ № 164 от 05.03.2020. URL: <http://www.scrf.gov.ru/media/files/file/W5JeWAnrAypIMIMHXFRX-EmQwLOUfoesZ.pdf>

² Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года : указ Президента РФ № 645 от 26.10. 2020. URL: <http://www.scrf.gov.ru/media/files/file/hcTiEHnCdn6TqRm5A677n5iE3yXLi93E.pdf>

до 2036 года»¹, а также «Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации»², безусловно, окажет непосредственное воздействие на промышленный кластер АЗ РФ и потребует как мониторинга влияния климатической политики на окружающую среду, так и разработки обоснованных мер и управленческих решений, повышающих экологическую безопасность и устойчивость объектов природно-промышленных систем АЗ РФ с учетом современных вызовов. Необходимость повышения экологической устойчивости Арктики в целом, включая АЗ РФ, снижения уровня угроз национальной и международной безопасности в данном регионе, обеспечения благоприятных условий для социально-экономического развития арктических территорий и надежного использования транспортной инфраструктуры Северного морского пути также отмечается и в Концепции внешней политики Российской Федерации³.

Любые стратегические решения в области индустриального освоения и развития АЗ РФ должны приниматься с учетом понимания базовых положений и принципов концепций устойчивости [1], экологической безопасности [2], ESG (Environmental, Social, and Corporate Governance – свод правил и стандартов бережного отношения бизнеса к природной среде, практик социальной ответственности и ответственного корпоративного управления), зеленой и низкоуглеродной экономики [3–6]. Для разработки таких управленческих решений должны проводиться междисциплинарные эколого-экономические исследования, задачами которых являются создание моделей потенциальных угроз экологической безопасности критически важных объектов региональных природно-промышленных систем АЗ РФ, превентивных мер по обеспечению экологической устойчивости данного класса систем, в том числе новых стандартов и подходов к классификации промышленных объектов по степени воздействия на окружающую среду, а также оценка системных рисков возникновения критических ситуаций природного и техногенного характера в этих системах. Для обоснованного выбора мер противодействия актуальным угрозам в процессе ситуационного управления и импактного мониторинга необходимо проводить анализ вариантов решений по многим критериям. В целях поддержки многокритериального принятия решений в области задач управления экологической безопасностью и устойчивым функционированием природно-промышленных систем АЗ РФ в настоящей работе предлагается подход к многоуровневой интегральной оценке экологической безопасности территорий, основанный на совместном применении индексных методов количественного и качественного анализа разнородных показателей устойчивости экосистем и иерархическом агрегировании нормализованных оценок показателей по уровням организационной иерархии.

Материалы и методы

Управление экологической безопасностью объектов природно-промышленных систем представляет собой сложный многоэтапный процесс, по своей структуре распределенный и многофункциональный и в общем случае включающий в себя такие функции управления, как целеполагание, стратегическое планирование, оперативное управление, а также функции контроля, учета, мониторинга и координации. Для эффективной реализации каждой функции на каждом этапе необходимы средства информационно-аналитической поддержки принятия решений, адекватные решаемым задачам обеспечения экологической безопасности. Одной из важнейших задач в рамках этого процесса является оценка и анализ динамики показателей экологической безопасности с учетом влияния ситуационных факторов, результаты решения которой обеспечивают обоснованный выбор превентивных и реактивных мер по повышению устойчивости экосистем к воздействию угроз различной природы, а также вариативность сценариев управления критическими ситуациями, что позволяет оперативно реагировать на эти ситуации и оптимизировать управленческую деятельность в природоохранной сфере. Специфичность объектов природно-промышленных систем АЗ РФ во многом ограничивает возможности создания эффективных инструментов информационной поддержки управления ими на основе статистических методов и компьютерных технологий экспертных систем. В настоящее время перспективным для целей импактного мониторинга и индикаторного риск-анализа представляется использование нейросетевых моделей, нечеткой логики, технологий ситуационного управления и объяснимого искусственного интеллекта.

¹ О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года : указ Президента РФ № 309 от 07.05.2024. URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/73986>

² Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации : указ Президента РФ № 145 от 28.02.2024. URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/HHNAzTl1guvX9Y00yaFA4KkMWPYcWS8.pdf>

³ Концепция внешней политики Российской Федерации : указ Президента РФ № 229 от 31.03.2023. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/49090>

Принято выделять два подхода к обеспечению экологической безопасности в регионе: динамический и статический [7]. Динамический подход предполагает снижение негативного воздействия горнодобывающей, перерабатывающей и металлургической промышленности на человека, животный и растительный мир, почвы, недра, атмосферу, поверхностные и подземные воды, а также восстановление техногенно нарушенных территорий, акваторий и воздушного пространства. Статический подход заключается в недопущении хозяйственной деятельности, разрушающей природные ландшафты, объекты и комплексы, в создании особо охраняемых природных территорий, в разработке программ сохранения биоразнообразия для промышленных предприятий, в реализации эффективных мер и управленческих решений по обеспечению устойчивости экосистем. Индикаторная оценка состояния экосистем и анализ их чувствительности к техногенной нагрузке является неотъемлемой частью обоих подходов.

Современные методы оценки экологической безопасности и устойчивости территорий традиционным способом могут быть классифицированы на качественные, количественные и комбинированные [8], оперирующие качественными, количественными и приведенными к единой шкале измерений нормализованными оценками характеристик функционирования экосистем соответственно. Комбинированные методы, несмотря на наличие присущих им достоинств качественных и количественных подходов, могут оказаться более трудоемкими и дорогостоящими, по сравнению с отдельными представителями указанных классов методов.

Принятая в нашей стране методология оценки и анализа экологической безопасности и устойчивости природо-промышленных систем включает традиционные методы и подходы, сгруппированные по рассмотренным выше классам (рис. 1). Зарубежная систематизация методических инструментов, успешно используемых в практике управления экологическими рисками и устойчивостью сложных систем различной природы и масштаба, идеологически близка по целеполаганию отечественной методологии и согласуется с ней по существу содержания. Классификация методов, применяемых в зарубежных исследованиях вопросов экологической безопасности и устойчивости критически важных объектов и инфраструктур, приведена на рис. 2.

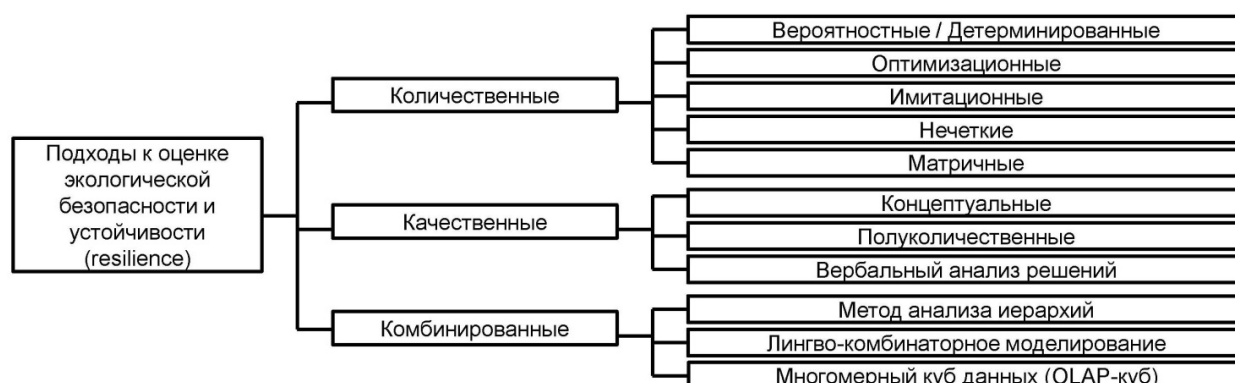


Рис. 1. Методы оценки и анализа экологической безопасности и устойчивости объектов природо-промышленных систем (отечественная классификация)



Рис. 2. Методы оценки и анализа экологической безопасности и устойчивости объектов природо-промышленных систем (зарубежная классификация)

Наиболее популярными с точки зрения наглядности и простоты применения на практике являются индексные методы, которые могут быть легко и гибко адаптированы под конкретные условия (контекст) задачи. Эти методы относятся к группе полуколичественных методов, что обеспечивает их применимость для оценки экологической безопасности и устойчивости как инженерно-технических, так и природо-промышленных систем, а также социально-экономических и критически значимых инфраструктурных объектов. Индексные методы основаны на формировании системы ключевых индикаторов, отражающих динамику состояния объектов, и оценке целевых показателей качества функционирования объектов в процессе их эксплуатации. Структура индексных методов учитывает весовые коэффициенты для показателей безопасности и устойчивости системы и опирается на количественные и качественные ретроспективные и оперативные данные о поведении системы до и после наступления иницилирующих событий. Однако эффективность работы этих методов зависит от качества исходных данных, выбора подходящих индикаторов и их весов, а также от регулярного обновления и адаптации индикаторной системы оценки под изменяющиеся условия. В общем случае интегральный показатель состояния экологической безопасности и устойчивости вычисляется путем агрегирования отобранных индикаторов и выявленных (влияющие/способствующие) факторов с применением метода средневзвешенных оценок.

Для уменьшения неопределенности исходных данных и снижения зависимости результатов работы индексных методов измерения устойчивости экосистем от качества входной информации используются нечеткое моделирование и экспертные оценки [9]. Методы нечеткой оценки устойчивости позволяют на качественном уровне учитывать наблюдаемые и ненаблюдаемые факторы, оказывающие прямое или косвенное влияние на целевые показатели устойчивости системы (восстанавливаемость, адаптируемость и другие). При этом стоит отметить, что современные индексные методы с научно-методической точки зрения недостаточно разработаны в части определения и количественной оценки влияющих ситуационных факторов [10].

Среди известных индексных методов, получивших широкое применение для решения задач индикаторной оценки безопасности, устойчивости, жизнеспособности динамических систем, согласно исследованию [9], наибольшего внимания заслуживают следующие:

- Resilience Framework BRIC (Baseline Resilience Indicators for Communities), США;
- Resilience Framework P.E.O.P.L.E.S (Population and demographics, Environmental/Ecosystem, Organized governmental services, Physical infrastructure, Lifestyle and community competence, Economic development, Social-cultural capital), США;
- The Benchmark Resilience Tool (BRT), Новая Зеландия;
- Guidelines for Critical Infrastructures Resilience Evaluation ("Guidelines"/CIRE), Италия;
- The Critical Infrastructure Resilience Index (CIRI), Норвегия;
- Resilience Management/Measurement Index (RMI), США;
- Organizational Resilience Health Check (ORHC), Австралия;
- Resilience Analysis Grid (RAG), Дания;
- "Swiss Approach", Швейцария;
- Resilience Matrix-based Integral Estimation Approach (RMIEA), Россия;
- Resilience Multi-dimensional Data Cube (ROLAP-cube), Германия.

Перечисленные подходы, фреймворки и методические рекомендации, принципиально различающиеся лишь структурой и математическим аппаратом процедуры оценки, могут быть также успешно использованы для интегральной оценки экологической безопасности территорий и анализа устойчивости элементов природо-промышленных систем.

Одним из последних важнейших достижений в области исследования техногенного влияния критически важных и потенциально опасных объектов (тяжелой промышленности) на экологическую безопасность и биоразнообразие в нашей стране можно считать впервые разработанную в 2022–2023 гг. учеными Института систематики и экологии животных Сибирского отделения Российской академии наук (СО РАН) под руководством чл.-корр. РАН В. В. Глупова методику расчета интегрального показателя состояния экосистем (ИПСЭ)¹ в зоне воздействия объектов промышленных предприятий и ее апробацию на территории АЗ РФ, а также других регионов России.

ИПСЭ как индикатор промышленного влияния на окружающую среду был разработан для ПАО ГМК «Норильский никель» с целью оценить экологическую ситуацию в регионах присутствия

¹ В СО РАН разработали метод оценки состояния экосистем вблизи заводов. URL: <https://news.ecoindustry.ru/2023/11/v-so-ran-razrabotali-metod-otsenki-sostoyaniya-ekosistem-vblizi-zavodov>

компании, уровень и состояние биологического разнообразия флоры, фауны, почв и других элементов экосистем. В перспективе использование методики расчета ИПСЭ в качестве инструмента корпоративного управления воздействием промышленных зон на биоразнообразие окружающей среды, встроенного в систему обеспечения экологической безопасности, может быть рекомендовано Министерству природных ресурсов и экологии Российской Федерации как обязательное для оценки и анализа состояния окружающей среды в импактных зонах промышленных объектов. Это позволит не только осуществлять контроль и мониторинг негативных факторов техногенного воздействия и принимать своевременные меры по поддержанию устойчивости экосистем, но и отличать естественные процессы в сообществах живых организмов от изменений, вызванных влиянием этих антропогенных факторов, а также ставить четкие цели по сохранению биоразнообразия¹.

Для расчета ИПСЭ проводится сбор информации о состоянии различных компонентов наземных и водных экосистем (видовое разнообразие, химические элементы и др.) как на территориях вокруг промышленных объектов, так и на контрольных (фоновых) полигонах, где экосистемы находятся в нормальном устойчивом состоянии, что определяется по таким параметрам (метрикам), как: индекс Бергера – Паркера; проективное покрытие, встречаемость; видовое богатство; индекс разнообразия Шеннона; индекс доминирования Симпсона; индекс выравненности Пиелу и т.д. При этом должны учитываться показатели по целому комплексу индикаторных групп и видов. Показатели контрольных полигонов принимаются за «норму», и поэтому ИПСЭ фоновых территорий априори считается равным единице. Собранные данные в импактных зонах промышленных предприятий сравниваются с контрольными показателями, в результате чего определяются отклонения от контрольных показателей, которое просчитывается для каждого индикатора в отдельности по каждой зоне воздействия: показатели зоны воздействия делятся на показатели фона, и получается коэффициент индикатора в этой зоне. Полученные коэффициенты суммируются и делятся на общее количество индикаторов, участвующих в рассмотрении. В итоге выводится ИПСЭ в зоне промышленного импакта дивизиона предприятия, представляющий собой средневзвешенное значение ИПСЭ во всех зонах воздействия с учетом ширины каждой зоны².

ИПСЭ исследуемой зоны вычисляется по следующей формуле³:

$$IIES = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{IX_i}{IX_{i \text{ фон}}} \right)}{n}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} IIES < 1 : \text{потеря биоразнообразия в исследуемой зоне промышленного воздействия,} \\ IIES = 1 : \text{соответствие состояния экосистем импактной зоны и контрольной,} \\ IIES > 1 : \text{условный прирост биоразнообразия в исследуемой зоне,} \end{cases}$$

где $IIES$ – интегральный показатель состояния экосистем; IX_i – среднее значение конкретного i -го показателя, полученное на определенной контрольной площадке (полигоне) воздействия промышленного объекта; $IX_{i \text{ фон}}$ – значение того же i -го показателя, полученное для фоновой территории; n – общее число показателей, используемых для оценки.

Результаты вычислений, полученные на основе применения методики расчета ИПСЭ, удобно представлять в графической форме, а интерпретацию значений ИПСЭ проводить по шкале, которая разделяется на четыре диапазона (интервала), условно отражающие разные уровни сохранности биологического разнообразия и, соответственно, различную степень влияния промышленных предприятий: <0,8 (красная зона) – интенсивное воздействие; 0,8–0,89 (оранжевая зона) – умеренное воздействие; 0,9–0,99 (желтая зона) – незначительное воздействие; $\geq 1,0$ (зеленая зона) – фоновый полигон (участок). Соответственно, к первой области значений относятся наиболее уязвимые импактные зоны с высокой техногенной нагрузкой, где реализуются недостаточно эффективные природоохранные

¹ Интегральный показатель состояния экосистем (ИПСЭ) планируют использовать не только в Норильске, но и в заповедниках Заполярья. URL: <https://goarctic.ru/priroda/integralnyy-pokazatel-sostoyaniya-ekosistem-ipse-planiruyut-ispolzovat-ne-tolko-v-norilske-no-i-v-za>

² Долгоносики и жемчужницы: почему бизнесу важно сохранять биоразнообразие. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/green/cmrm/65797a099a79472e60c3933b>

³ Загадочный ИПСЭ. URL: <https://life.nornickel.ru/indicator>

меры, далее – более устойчивые к антропогенным факторам, где эффективность применяемых средств защиты окружающей среды существенно выше. Такая индикация позволяет наглядно представлять себе экологическую ситуацию в зонах воздействия промышленных объектов в целом и фокусировать внимание на наиболее узких местах при ситуационном управлении экологической безопасностью и устойчивостью территорий вокруг этих объектов.

Среди особенностей методики расчета ИПСЭ следует отметить следующие¹:

1. Методика демонстрирует эффективность как при оценке ситуации за конкретный год, так и в динамике, что зависит от постановки задач. В первом случае она обеспечивает выявление и уточнение границ тех или иных зон антропогенного воздействия. Во втором – изменение ИПСЭ во времени (ДИПСЭ) позволяет определить условные потери или прирост биоразнообразия (последнее не всегда хорошо и может говорить о дисбалансе экосистем) из-за производственной деятельности от года к году, что, в свою очередь, позволит сделать ретроспективный анализ по результатам расчетов и данным импактного мониторинга за нескольких лет.

2. В разных дивизионах характер хозяйственной деятельности предприятий может отличаться. Соответственно может отличаться и ширина зон воздействия промышленных объектов. Если не учитывать эту специфику, то сравнивать ИПСЭ дивизионов между собой некорректно. Поправка на ширину служит «усреднителем» в математических расчетах.

3. Отличить сокращение численности индикаторного вида по естественным причинам от тех, что связаны с промышленным воздействием, не всегда бывает просто. Чтобы сделать это, требуется проводить долговременный мониторинг численности видов-индикаторов на разных участках изучаемого ареала. Значительные колебания численности видов могут отмечаться не только в зоне антропогенного воздействия предприятий, но и на фоновых (контрольных) территориях. Это также важно учитывать при расчетах. Отличия в динамике этих колебаний на фоновой площадке от динамики в зоне воздействия и позволяют сделать выводы. ИПСЭ одновременно показывает и степень изменения биоразнообразия, и уровень антропогенного воздействия на него.

Идея – выразить экологическую устойчивость [1] через числовой показатель не нова – это общемировой тренд в теории управления эколого-экономическими системами [11] и риск-менеджменте их безопасностью. Однако, как любая попытка определить качество функционирования природо-промышленных и биологических систем через цифру, ИПСЭ не лишен недостатков и поэтому нуждается в дополнительной научной проработке. К этим очевидным недостаткам методики расчетов ИПСЭ следует отнести:

- 1) отсутствие системы критериев выбора групп индикаторов биоразнообразия в условиях разных природных зон для регионов, где проводится мониторинг, а также достаточности выбора числа параметров индикаторов для проведения оценки;
- 2) отсутствие возможности анализа пространственно-временных рядов данных, которые являются основой адекватной интерпретации современного состояния экосистем и причин, его обуславливающих;
- 3) отсутствие возможности учета чужеродных, редких (охраняемых) видов и сообществ;
- 4) необходимость учета структуры доминирования сообществ, корреляцию с факторами антропогенного воздействия;
- 5) отсутствие возможности оценки фонового состояния экосистем;
- 6) необходимость актуализация списка индикаторных таксонов сообществ и видов с учетом их адаптации к экосистемам конкретных регионов;
- 7) необходимость нивелирования влияния побочных факторов на ИПСЭ, мешающих точной интерпретации данных и сравнению ИПСЭ между биотопами;
- 8) отсутствие возможности оперирования качественными показателями в методике расчета (в ИПСЭ учитываются только количественные показатели);
- 9) необходимость учета дополнительных ситуационных факторов при сохранении общей сбалансированности используемой системы показателей.

Результаты и обсуждение

Для нивелирования перечисленных недостатков в ходе проведенных исследований предложен модифицированный метод, расширяющий возможности известных индикаторных подходов к оценке экологической устойчивости, включая методику расчета ИПСЭ, в части учета качественных

¹ Итоги Большой научной экспедиции 2022–2023. URL: <https://www.ras.ru/digest/showdnews.aspx?id=565f2f10-3c7b-4884-baca-3c796497ad5e>

показателей и влияющих ситуационных факторов, их неравнозначности и антагонистичности, а также в части поддержки адаптивной расширяемости используемой системы показателей в зависимости от региональной специфики. Разработанный метод можно отнести к классу многокритериальных комбинированных методов и позиционировать среди известных методических подходов как инструмент оценки и анализа экологической устойчивости на основе применения иерархической многоуровневой схемы декомпозиции «принцип – критерий – индикатор – показатель».

Основой предлагаемого метода оценки является разработанный в Институте проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН Национальный общественный стандарт «Экологическая безопасность Арктики» [12], определяющий многоуровневую систему индикаторов состояния экосистем АЗ РФ, используемую для анализа устойчивости объектов природной среды в условиях антропогенного воздействия на них хозяйствующих субъектов. Структура и базовые составляющие данного стандарта схематично представлены на рис. 3. Общие принципы, критерии и показатели, комплементарные целям устойчивого развития и отражающие различные стратегии/сценарии управления экологической безопасностью и устойчивостью природно-промышленных систем АЗ РФ, систематизированы в работах [12, 13]. Важно отметить при этом, что система общих и специфических индикаторов состояния экосистем и показателей экологического воздействия промышленных предприятий в каждом конкретном регионе, где планируется применять предлагаемый метод, должна корректироваться «под задачу», то есть уточняться и дополняться с учетом целей природоохранной деятельности и экологической политики, а также с учетом контекста текущей экологической ситуации и особенностей исследуемой территории. Обоснованный выбор и формирование релевантных групп индикаторов, а также определение их количества является самостоятельной задачей, требующей рационального решения. Кроме того, для получения более точных и адекватных оценок влияния промышленных объектов на состояние экосистем по выбранным критериям и показателям необходимо не только знать их актуальные значения, но и располагать ретроспективной информацией о результатах их мониторинга за многолетний период наблюдений/измерений, причем последнее в некоторых случаях и по некоторым видам индикаторов не всегда представляется возможным по причине полного или частичного отсутствия таких сведений. От полноты набора оцениваемых показателей во многом зависит эффективность принимаемых управленческих решений по реализации природоохранных мероприятий, направленных на минимизацию экологических рисков, смягчение последствий техногенного воздействия на природную среду и возмещение нанесенного ущерба элементам экосистем хозяйственной деятельностью промышленных предприятий.

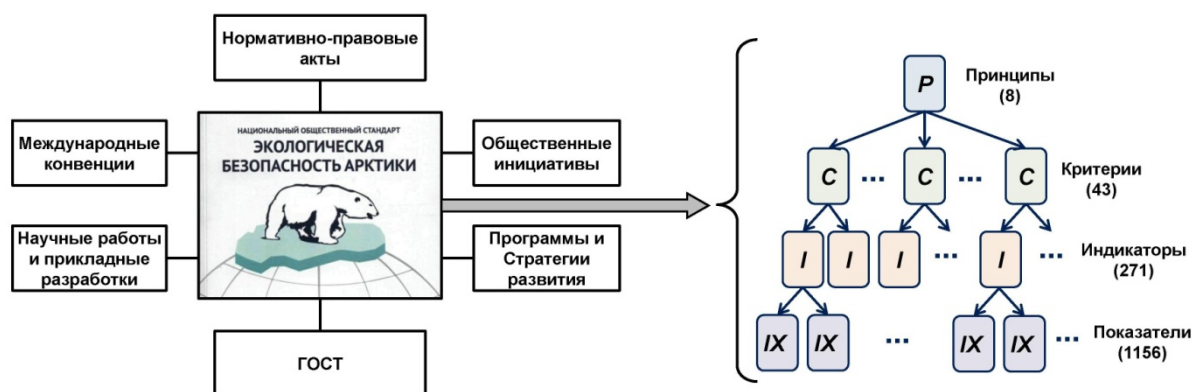


Рис. 3. Структура и состав Национального общественного стандарта «Экологическая безопасность Арктики»

Генеральная идея, послужившая толчком к созданию Национального Общественного стандарта «Экологическая безопасность Арктики», определяется следующими положениями:

1. Установление прозрачных правил экологичного поведения хозяйствующих субъектов на территории АЗ РФ.
2. Разработка системы индикаторов экологичного поведения, задающей ориентиры для действующих и новых предприятий на территории АЗ РФ.
3. Формирование единого свода лучших практик и инициатив научных, общественных и коммерческих организаций в сфере управления экологической устойчивостью.
4. Формирование единого свода отечественных и международных правил и требований в области охраны окружающей среды АЗ РФ.

5. Создание нового «института» добровольного принятия правил экологического поведения для действующих и новых предприятий на территории АЗ РФ.

Стандарт опирается на следующие основополагающие принципы:

1. Принцип соответствия законодательству Российской Федерации.
2. Принцип реализации прав и обязанностей владельцев и пользователей природных объектов на территории АЗ РФ.
3. Принцип учета прав и интересов коренных народов.
4. Принцип разумного природопользования в арктических условиях.
5. Принцип минимизации негативного воздействия на окружающую среду.
6. Принцип планового развития Арктики.
7. Принцип осуществления сквозного мониторинга и оценки воздействия на природную среду.
8. Принцип формирования и сохранения особых природоохранных зон для создания «экологического скелета» Арктики.

Стандарт прошел апробацию на общественных слушаниях при Минприроды России, ТПП РФ, РСПП, в органах государственной власти различного уровня, крупном бизнесе, экспертном сообществе в лице общественных и научных организаций, а также рекомендован к рассмотрению Арктическим Советом. Появление стандарта в нашей стране можно считать первым важным шагом в направлении развития и закрепления инструментов добровольного регулирования природоохранных норм и правил (добровольной сертификации) по аналогии с передовым опытом Финляндии, Канады, Исландии и других ведущих стран мира.

Структурно-методический подход к оценке и анализу экологической устойчивости представляет собой иерархически организованную схему декомпозиции и измерения всего множества выбранных показателей экологической безопасности, сфокусированных, главным образом, на социально-экономических и природно-промышленных аспектах устойчивости экосистем. На рис. 4 приведена общая структура метода оценки интегрального показателя состояния экосистем, адаптированная для задач обеспечения экологической безопасности и управления экологической устойчивостью на основе результатов исследований [9, 13, 14].

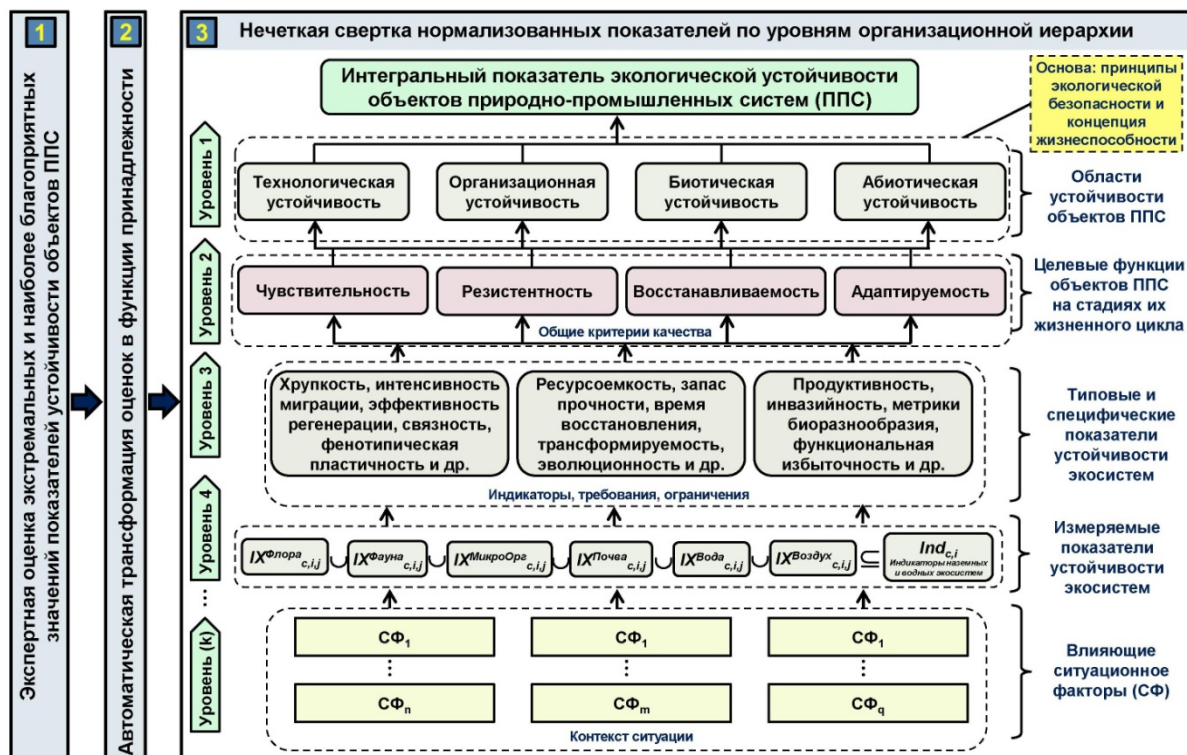


Рис. 4. Структура индикаторного метода многоуровневой интегральной оценки экологической безопасности и устойчивости объектов природно-промышленных систем

На различных этапах процедуры оценки решаются следующие задачи: выбор общих индикаторов и влияющих ситуационных факторов, количественный анализ и нормализация показателей,

фаззификация входных переменных и дефаззификация выходных параметров, агрегирование экспертных оценок, расчет средневзвешенных четких значений показателей, восходящий синтез и анализ интегрального индекса экологической устойчивости, представление результатов в табличной или графической форме и их интерпретация.

Для вычисления интегрального показателя экологической устойчивости объектов природно-промышленных систем, зависящего от многих параметров, необходимо, прежде всего, определить множество базовых индикаторов, характеризующих способность объектов системы к самосохранению и поддержанию своей функциональности, а также оценить их с учетом контекста ситуации, влияющих факторов, типа экосистем и областей устойчивости. Такая интегральная оценка строится на основе смешанной (аддитивно-мультипликативной) свертки нормированных частных критериев и индикаторов, образующих эти целевые показатели качества на нижних уровнях иерархической системы оценивания. Выбор смешанной свертки критериев обусловлен необходимостью соблюдения принципа «справедливого компромисса» между показателями экологической безопасности и устойчивости с учетом их неравнозначности, взаимозависимости и антагонистичности. При использовании данного вида свертки нивелируется эффект компенсации, когда неадекватные оценки по одним критериям могут быть компенсированы высокими оценками по другим, а также обеспечивается возможность оценивания критериев независимо друг от друга. Кроме того, наиболее полно учитывается качественный характер задания предпочтений экспертов при формировании интегрального показателя, когда изменение характеристик хотя бы одного из критериев может существенно повлиять на оценку параметров других.

Модель многоуровневой оценки интегрального индекса экологической устойчивости использует иерархическую систему показателей экологической безопасности, разработанную в результате обобщения существующих индикаторных систем [2, 11, 15–17] и формирования агрегированных показателей¹, полученных путем свертки ряда групп общепринятых стандартных показателей надежности, безопасности и живучести природно-промышленных систем. Вместе с тем в модель заложены специфические характеристики жизнеспособности и устойчивости элементов природно-промышленных систем, отражающие индивидуальные особенности объектов, входящих в состав этих систем.

Разработанные принципы ($P_1, \dots, P_8$) обеспечения экологической безопасности АЗ РФ, конкретизированные в рамках исследования [13], образуют верхний уровень (*Уровень 1*) интегральных индексов, используемых в процедуре многоуровневой оценки экологической устойчивости. *Уровень 1* априори считается исходно заданным. Каждый интегральный индекс на первом уровне декомпозируется на подмножество характерных для заданного контекста ситуации общих критериев, соответствующих определенным показателям второго уровня (*Уровень 2*) ($C^1_{i...} C^1_{N-} C^8_{i...} C^8_M$). В общей сложности были выделены 43 критерия на втором уровне. *Уровень 2* является специализированным по части набора критериев, то есть настраиваемым под заданный контекст ситуации. Аналогично каждый критерий на втором уровне далее декомпозируется на следующее подмножество заданных, главным образом, измеримых показателей ($I^1_{j...} I^1_K - I^8_{j...} I^8_L$), которые составляют третий уровень иерархии оценки. Здесь были определены 271 показатель. *Уровень 3* также является настраиваемым и привязанным к рассматриваемому контексту. В свою очередь, каждый показатель на третьем уровне дополнительно декомпозируется на подмножество отраслевых (организационных) индикаторов, специфичных для критически важных объектов или инфраструктур природно-промышленных систем, с учетом сценариев развития экологической ситуации, выбранных для анализа в заданных условиях. Первоначально на четвертом уровне было определено 1156 таких индикаторов. Таким образом, декомпозиция исследуемых показателей продолжается до *Уровня K*, где представлены атомарные измеримые индикаторы, описывающих влияние ситуационных факторов – природных и антропогенных ($СФ_1, \dots, СФ_q$). *Уровень K* является основанием иерархической системы оценки экологической устойчивости, включающим множество различных количественных, полуколичественных и качественных показателей, относящихся к специфичным индивидуальным характеристикам природно-промышленных систем. Отобранные индикаторы, представленные на *Уровне K* ($IX^{1ij}_p \dots IX^{1ij}_q - IX^{8ij}_p \dots IX^{8ij}_R$), преобразуются в количественные оценки в соответствии с выбранной шкалой измерений на основе методов нормализации и мягких вычислений. Для каждого показателя на уровнях 2, 3, ..., ($K - 1$), K экспертами определяются весовые коэффициенты с учетом их значимости и предпочтений для измерения. Когда фаззификация и определение весовых коэффициентов для всех показателей K -го уровня завершены,

¹ О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года : указ Президента РФ № 176 от 19.04.2017. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41879> .

итоговая оценка интегрального индекса экологической устойчивости вычисляется посредством взвешенного агрегирования полученных расчетных значений нормированных показателей снизу-вверх по иерархии от *Уровня K* до *Уровня 1* (при этом каждый показатель на данных уровнях имеет конкретную четкую оценку). В качестве альтернативы можно также сосредоточиться на анализе некоторых отдельных показателей на различных уровнях иерархии оценки, имеющих определенный интерес с исследовательской точки зрения и которые могут быть более подходящими для выявления «узких мест» (уязвимостей) в обеспечении экологической безопасности и устойчивости элементов природно-промышленных систем. Эта возможность достигается за счет гибкости применения предложенной процедуры оценивания. При этом выбор критериев и показателей, которые требуется измерить и оценить, начинается с верхнего *Уровня 1* и далее сверху-вниз до основания иерархии оценки, а само оценивание выбранных индикаторов начинается с *Уровня K* и далее снизу-вверх, то есть уровни 1, 2, ..., $(K - 1)$ объединяют в себе агрегированные показатели нижележащих уровней вплоть до *Уровня K*, а не реально измеримые показатели как таковые. Наконец, дефаззификация введенных в расчет нечетких оценок проводится до тех пор, пока не будут получены четкие оценки всех агрегированных показателей. После этого проводится анализ и интерпретация полученных оценок. Описанную процедуру оценки целесообразно применять совместно с методикой расчета ИПСЭ как для показателей зоны воздействия промышленных объектов, так и для фоновых показателей контрольных точек и полигонов.

Впоследствии выбор конкретных релевантных критериев и показателей на уровнях 2, 3, ..., $(K - 1)$, K , а также сбор данных для реализации процедуры их оценки будут зависеть от изначально заданного контекста экологической ситуации (условий и ограничений, принятых к рассмотрению) и детальной спецификации сценария развития ситуации, включая области устойчивости и типы исследуемых экосистем, модель актуальных угроз экологической безопасности и влияющие ситуативные факторы (физические, химические, микробогенные, зоогенные, фитогенные и т.д.). Установление весовых коэффициентов, характеризующих значимость отдельных измеряемых и контролируемых показателей, выбранных для оценки экологической устойчивости, является прерогативой специалистов-экспертов, проводящих мониторинговые исследования состояния экосистем и анализ динамики этих показателей.

При оценивании показателей эксперты определяют минимально возможное, наиболее оптимистичное (или интервал наиболее оптимистичных значений) и максимально возможное значения оценок этих показателей (влияющих факторов) на соответствующем уровне декомпозиции системы индикаторов экологической устойчивости.

Для преобразования нечетко определенных экспертных суждений о состоянии показателей экологической устойчивости объектов природно-промышленных систем в четкие характеристики с целью последующей работы с ними в дефаззифицированном виде к нечетким множествам применяется процедура дефаззификации полученных нечетких оценок экспертов, основанная на принципе выбора управляющего воздействия, соответствующего максимальному значению функции принадлежности, и центроидном методе дефаззификации (методе среднего центра) [18].

Все полученные треугольные нечеткие оценки по каждому показателю на k -м уровне должны агрегироваться. Следовательно, при числе экспертов E и когда треугольная нечеткая оценка e -го экспертного суждения о текущем состоянии j -го показателя на k -м уровне равна $\tilde{ix}_{cje} = (ix_{cje}^1, ix_{cje}^2, ix_{cje}^3)$, $e = \overline{1, E}$, интегральная треугольная нечеткая оценка всех экспертных суждений ($\tilde{IX}_{cij}$) о состоянии j -го показателя на k -м уровне может быть получена на основе следующей формулы:

$$\tilde{IX}_{cij} = (ix_{cij}^1, ix_{cij}^2, ix_{cij}^3) = \left(\min_E \{ix_{cje}^1\}, \frac{\sum_{e=1}^E ix_{cje}^2}{E}, \max_E \{ix_{cje}^3\} \right), \quad e = \overline{1, E}, \quad (2)$$

где « $\sim$ » – знак, обозначающий нечеткое множество; $ix_{cje}^1, ix_{cje}^2, ix_{cje}^3$ – минимально возможное, наиболее оптимистичное и максимально возможное значения e -й экспертной оценки текущего состояния j -го показателя на k -м уровне соответственно.

После определения функций принадлежности, рангов критериев и рангов экспертов осуществляется агрегирование оценочных показателей качества в измеримый количественно интегральный критерий эффективности.

Агрегированные треугольные нечеткие числа являются нечеткими экспертными оценками текущего состояния показателей на k -м уровне. В результате дефазификации эти нечеткие оценки преобразуются в четкие оценки. Четкое значение треугольного нечеткого числа определяется по его четкому вероятностному среднему значению. Тогда, четкая оценка текущего состояния j -го показателя (IX_{cij}) на уровне k может быть получена по следующей формуле:

$$IX_{cij}^k = \bar{M}(IX_{cij}^k) = \frac{(ix_{cij}^1 + 4ix_{cij}^2 + ix_{cij}^3)}{6}. \quad (3)$$

Оценка каждого показателя на $(k-1)$ уровне вычисляется как взвешенная сумма оценок порождающих его показателей на k -м уровне по формуле:

$$(IX_{ci})_{k-1} = \left(\sum_{j=1}^{n,m} w_j IX_{cij} \right)_k, \quad \sum_{j=1}^m w_j = 1, \quad (4)$$

где m – число показателей, связанных с i -м показателем на уровне $k-1$; w_j и IX_{cij} являются соответственно весом и оценкой j -го показателя на k -м уровне и принимают значения от 0 до 1.

Аналогично получают оценки показателей для вышележащих уровней индикаторов $(k-2), (k-3), \dots$ посредством агрегирования снизу-вверх вплоть до вершины иерархии:

$$(IX_c)_{k-2} = \left(\sum_{i=1}^{l,n} v_i IX_{ci} \right)_{k-1}, \quad \sum_{i=1}^n v_i = 1, \dots \quad (5)$$

$$(IX_p)_{k-3} = \left(\sum_{c=1}^l u_c IX_c \right)_{k-2}, \quad \sum_{c=1}^l u_c = 1, \dots \quad (6)$$

На верхнем уровне декомпозиции иерархической системы оценочных критериев и индикаторов обобщенная оценка интегрального показателя экологической устойчивости объектов природно-промышленных систем рассчитывается как средневзвешенное значение оценок всех характеристик рассматриваемых измерений (областей) устойчивости объектов природно-промышленных систем по следующей формуле:

$$HES = \prod_{k=1}^K \left(\sum_{j \in G_k} w_j^k f(IX_{cij}^k, t) \right) \xrightarrow{\gamma} opt, \quad (7)$$

$$HES = \frac{1}{d} \prod_{p=1}^d \rho_p IX_p = \frac{1}{d} \prod_{p=1}^d \rho_p \left[\frac{1}{l} \sum_{c=1}^l u_c \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \left[\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m w_j \frac{IX_{cij}}{IX_{фон}} \right] \right] \right], \quad (8)$$

$$\sum_{c=1}^l u_c = \sum_{i=1}^n v_i = \sum_{j=1}^m w_j = 1, \quad (9)$$

где IX_p и ρ_p – итоговые оценки и веса p -й области экологической устойчивости объекта природно-промышленной системы на верхнем уровне иерархии системы оценки соответственно; IX_{cij} – оценки частных показателей экологической устойчивости объекта природно-промышленной системы на уровнях $(k-2), (k-1), (k)$ соответственно; $l, n, m, \dots$ – число оцениваемых показателей экологической устойчивости объекта природно-промышленной системы на уровнях $(k-2), (k-1), (k)$ соответственно; $u_c, v_i, w_j, \dots$ – согласованные экспертами веса частных показателей экологической устойчивости объекта природно-промышленных системы, определенные на уровнях $(k-2), (k-1), (k)$ соответственно; G_k – группы оценочных критериев и индикаторов состояния экосистем по уровням k организационной иерархии; d – число анализируемых областей экологической устойчивости

для исследуемого объекта природно-промышленной системы; γ – степень согласованности между целевыми показателями экологической безопасности, характеризующими динамику состояния областей устойчивости объекта природно-промышленной системы; t – параметр времени, отражающий динамику изменения рассматриваемых индикаторов безопасности и устойчивости экосистем.

Мера согласованности дефазифицированных оценок экспертов определяется на базе вычисления коэффициентов конкордации и вариабельности (разброса), учитывающих не только парные сравнения, но и общую структуру оценок. Если значения этих коэффициентов больше 0,7 и меньше 0,2 соответственно, то мнения экспертов считаются согласованными. В противном случае для достижения согласованности экспертных оценок применяется метод Дельфи или его модификации. Количественная оценка степени согласованности мнений экспертов определяется на основе статистических данных для всей группы экспертов.

Особенности предлагаемого метода интегральной оценки экологической безопасности и устойчивости природно-промышленных систем перечислены в табл. 1. Несмотря на ряд известных ограничений для всего класса методов мягких вычислений, предложенный подход к нечеткой иерархической оценке состояния экосистем в зонах промышленного воздействия показал свою пригодность и продемонстрировал приемлемые результаты [19, 20].

Таблица 1

Преимущества и ограничения разработанного индикаторного метода многоуровневой оценки интегрального показателя экологической безопасности и устойчивости территории

Преимущества	Ограничения
– структурная наглядность, простота реализации; – универсальность, то есть применимость ко всем типам КВО/ПОО и критических инфраструктур; – учет императивов, многокритериальной сущности экологической безопасности и неопределенности динамических характеристик объектов в процессе анализа и оценки экологической устойчивости на всех этапах жизненного цикла компонентов экосистем; – возможность сопряжения количественных и качественных показателей состояния экосистем в одной вычислительной оценочной модели интегрального индекса экологической устойчивости; – возможность учета неравнозначности и антагонистичности показателей экологической безопасности и вклада каждого показателя в агрегированную оценку; – возможность ранжирования показателей экологической безопасности в зависимости от исследуемого контекста (ситуационных факторов), целеполагания, и типа экосистем; – возможность самоаудита (самопроверки), то есть решения обратной задачи на каждом уровне иерархической оценки	– высокая стоимость организации квалифицированной экспертизы и непрерывного импактного мониторинга; – субъективизм экспертных суждений; – возможность ошибок в силу ограниченности знаний экспертов или неполноты мониторинговых исследований (запаздывания статистики); – сложность определения количества привлекаемых экспертов и согласования интересов всех стейкхолдеров; – необходимость большого количества исторических и оперативных данных для точности и адекватности оценки; – выбор и обоснование вида функции принадлежности и весовых коэффициентов важности критериев в нечеткой модели оценки; – сложность интерпретации физического смысла числового значения интегрального показателя экологической безопасности, полученного на основе агрегирования оценок частных показателей и нечеткой средневзвешенной свертки

Материалы исследования показали, что разработанный метод интегральной оценки экологической безопасности и устойчивости объектов природно-промышленных систем не противоречит известным подходам, принятым в мировой практике, а лишь дополняет и улучшает их в части гибкости настройки параметров, адаптивности к изменяющимся условиям и прозрачности процедуры оценки, а также легкости интерпретации результатов, что так важно для практического применения. Резюмируя, отметим, что предложенный метод является в некотором смысле универсальным подходом, обеспечивающим реализацию процедур систематической оценки и комплексного анализа экологической безопасности и устойчивости объектов природно-промышленных систем. Поскольку метод в большей

степени предназначен для самоаудита и самооценки, он может быть в ряде случаев не вполне объективным, но тем не менее получаемые с его помощью результаты (оценки) являются достаточно индикативными для поддержки принятия управленческих решений по повышению экологической безопасности и устойчивости природно-промышленных систем в условиях интенсификации техногенного воздействия на их объекты промышленными предприятиями региона. Полученные оценки обеспечивают возможность выявления потенциальных угроз биоразнообразию этих объектов и смягчение последствий нарушения экосистемных функций компонентов природно-промышленных систем путем устранения установленных уязвимостей и принятия адекватных ситуации превентивных и реактивных защитных мер. Повышение объективности и адекватности метода для получения более точных результатов с различных точек зрения может быть в дальнейшем достигнуто за счет его использования в сочетании с другими известными методами ситуационного управления, экологического менеджмента, каузального и предиктивного анализа устойчивости живых и природоподобных динамических систем.

Заключение

Наблюдаемая сегодня тенденция приоритизации государственной политики в части повышения эффективности природоохранной деятельности, направленной на обеспечение экологического благополучия населения, сохранение биоразнообразия и охрану окружающей среды, определяет новые стандарты, требования и подходы к поддержанию экологической безопасности и устойчивости объектов природно-промышленных систем при разработке и реализации в АЗ РФ комплексных инвестиционных планов развития отраслей и секторов экономики, принятии решений о запуске инфраструктурных проектов, а также в рамках текущей операционной деятельности всех хозяйствующих субъектов. Учитывая взаимосвязи акторов и элементов природно-промышленных систем разного уровня, функционирующих как совокупность взаимозависимых объектов, процессов, организаций и инфраструктур, функции управления безопасностью и устойчивостью этих сложных систем подразделяются на составляющие и, как правило, регулируются различными органами (ведомствами) и по неоднородным критериям. Вместе с тем многообразие типов и групп стейкхолдеров, действующих в АЗ РФ, на фоне многоаспектности и сложности современных проблем инфраструктурного развития АЗ РФ актуализирует задачу разработки научно-методических основ и методологических принципов формирования сбалансированной государственной политики обеспечения экологической безопасности, ориентированной на гармонизацию техногенной нагрузки на экосистемы, экономического роста и социальной стабильности в процессе реализации природоохранных мероприятий. Однако существующая система импактного мониторинга, методики индикаторной оценки состояния экосистем и экологического нормирования, заложенные в действующем российском законодательстве, имеют значительные пробелы и неточности, которые непосредственно или косвенно влияют на эффективность природоохранной деятельности как самих объектов инфраструктуры (например, промышленных предприятий) или иных ее акторов, так и всей системы правового регулирования природоохранной деятельности региональных органов государственной власти. Поэтому стратегическое управление экологической безопасностью и устойчивостью объектов природно-промышленных систем должно подкрепляться развитым нормативным обеспечением и сопровождаться адекватной опциональной информационно-аналитической поддержкой.

Для информационно-аналитической поддержки многокритериального принятия решений в области управления экологической устойчивостью критически важных объектов природно-промышленных систем АЗ РФ разработан модифицированный индикаторный метод многоуровневой агрегированной оценки и анализа разнородных показателей их надежности и безопасности, расширяющий возможности известных методик расчета интегрального показателя состояния экосистем в части учета качественных показателей и влияющих ситуационных факторов, их неравнозначности и антагонистичности, а также сохранения сбалансированности выбранных показателей. Отличия метода заключаются в экспертной оценке экстремальных и наиболее благоприятных значений показателей экологической устойчивости объектов с последующей автоматической трансформацией оценок в функции принадлежности и нечеткой сверткой нормализованных показателей по уровням организационной иерархии. Метод позволяет количественно оценить степень влияния объектов природно-промышленных систем на состояние устойчивости экосистем в условиях неполной определенности

исходных данных и может быть использован для планирования и оптимизации комплекса превентивных и реактивных мер по повышению экологической безопасности территорий при импактном мониторинге этих объектов.

Дальнейшие исследования будут направлены на апробацию предложенного метода на практике, верификацию и валидацию результатов его работы для конкретных импактных зон промышленных объектов и площадок, расположенных на территории Мурманской области. Перспективным представляется также программная реализация метода в виде инструмента информационной поддержки принятия управленческих решений в сфере природоохранной деятельности, ориентированного на повышение эффективности обеспечения экологической безопасности и устойчивости объектов природно-промышленных систем на всех стадиях управления ими.

Список литературы

1. Holling C. S. Resilience and stability of ecological systems // *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1973. № 4. P. 1–23.
2. Liu Ch., Li W., Xu J. [et al.]. Global trends and characteristics of ecological security research in the early 21st century: A literature review and bibliometric analysis // *Ecological Indicators*. 2022. Vol. 137. Article no. 108734.
3. Spitz K., Trudinger J., Orr M. *Environmental Social Governance*. 1st ed. CRC Press, 2022. 278 p.
4. Dathe T., Dathe R., Dathe I., Helmold M. *Corporate Social Responsibility (CSR), Sustainability and Environmental Social Governance (ESG). Approaches to Ethical Management*. Springer Cham, 2022. 203 p.
5. Белик И. С., Стародубец Н. В., Майорова Т. В., Ячменева А. И. Механизмы реализации концепции низкоуглеродного развития экономики. Уфа : МЦИИ «Омега Сайнс», 2016. 119 с.
6. Альхимович И. Н., Амирова Н. Р., Бурденко Е. В. [и др.]. Зеленая экономика в парадигме устойчивого развития. М. : ИНФРА-М, 2023. 248 с.
7. Макаров Д. В., Боровичев Е. А., Ключникова Е. М. [и др.]. Охрана природы в условиях развитого горно-промышленного комплекса Мурманской области // *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2020. № 2. С. 5–14.
8. Дядик Н. В., Чапаргина А. Н., Дядик В. В. [и др.] Контент-анализ методов оценки экологической безопасности территории // *Московский экономический журнал*. 2023. Т. 8, № 9. С. 364–383.
9. Masloboev A. V. An index-based method for integral estimation of regional critical infrastructure resilience using fuzzy calculations (Part 1. Problem statement and method generic structure) // *Reliability and quality of complex systems*. 2024. № 1. P. 124–141.
10. Masloboev A. V. An index-based method for integral estimation of regional critical infrastructure resilience using fuzzy calculations. Part 2. Resilience capacity models and backbone capabilities // *Reliability and quality of complex systems*. 2024. № 3. P. 130–156.
11. Burkov V. N., Novikov D. A., Shchepkin A. V. Control Mechanisms for Ecological-Economic Systems // *Studies in Systems, Decision and Control*. 2015. Vol. 10. 166 p.
12. Национальный общественный стандарт «Экологическая безопасность Арктики» / под ред. Н. А. Кашулина, В. А. Маслобоева. М. : Либри Плюс, 2016. 88 с.
13. Masloboev A. V. Systematic approach for ensuring the resilience of ecological-economic systems of the Russian Arctic (Part 1. Resilience management principles) // *Reliability and quality of complex systems*. 2023. № 1. P. 142–156.
14. Masloboev A. V. Systematic approach for ensuring the resilience of ecological-economic systems of the Russian Arctic (Part 2. Assessment procedure and criteria) // *Reliability and quality of complex systems*. 2023. № 2. P. 115–126.
15. Zhang R., Wang Ch., Xiong Ya. Ecological security assessment of China based on the pressure-state-response framework // *Ecological Indicators*. 2023. Vol. 154. Article no. 110647.
16. Hashemi R., Darabi H. The Review of Ecological Network Indicators in Graph Theory Context: 2014–2021 // *International Journal of Environmental Research*. 2022. Vol. 16. Article no. 24.
17. Смирнова Е. Э. Экологические стандарты управления качеством окружающей среды / под науч. ред. А. Н. Ларионова. СПб. : СПбГАСУ, 2024. 537 с.
18. Семина С. С., Конюхов А. Н. Быстрая центроидная дефазификация субнормальных нечетких интервалов // *Современные технологии в науке и образовании (СТНО-2022) : сб. тр. V Междунар. науч.-техн. форума (г. Рязань, 2–4 марта 2022 г.) : в 10 т. / под общ. ред. О. В. Миловзорова*. Рязань : РГРТУ, 2022. Т. 5. С. 98–104.
19. Экосистемы в районе Кольской АЭС (Мурманская область): современное состояние / под ред. В. А. Маслобоева, Е. А. Боровичева и Д. А. Давыдова. Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2024. 468 с.
20. Амосов П. В. [и др.] Пыление хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд: экологическая проблема и пути ее решения. Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2023. 168 с.

21. Гурлев И. В., Маслобоев А. В., Малыгин И. Г. Ситуационная осведомленность о состоянии портов северного морского транспортного коридора в управлении экологической безопасностью Арктики // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 120–134. doi: 10.21685/2307-4205-2022-4-13
22. Кубасов И. А. Промышленный интернет вещей как революционный скачок развития // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 83–89. doi: 10.21685/2307-4205-2023-2-9

References

1. Holling C.S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1973;(4):1–23.
2. Liu Ch., Li W., Xu J. et al. Global trends and characteristics of ecological security research in the early 21st century: A literature review and bibliometric analysis. *Ecological Indicators*. 2022;137(108734).
3. Spitz K., Trudinger J., Orr M. *Environmental Social Governance*. 1st ed. CRC Press, 2022:278.
4. Dathe T., Dathe R., Dathe I., Helmold M. *Corporate Social Responsibility (CSR), Sustainability and Environmental Social Governance (ESG). Approaches to Ethical Management*. Springer Cham, 2022:203.
5. Belik I.S., Starodubets N.V., Mayorova T.V., Yachmeneva A.I. *Mekhanizmy realizatsii kontseptsii nizkouglerodnogo razvitiya ekonomiki = Mechanisms of implementation of the concept of low-carbon economic development*. Ufa: MTsII «Omega Sayns», 2016:119. (In Russ.)
6. Al'khimovich I.N., Amirova N.R., Burdenko E.V. et al. *Zelenaya ekonomika v paradigme ustoychivogo razvitiya = Green economy in the paradigm of sustainable development*. Moscow: INFRA-M, 2023:248. (In Russ.)
7. Makarov D.V., Borovichev E.A., Klyuchnikova E.M. et al. Nature protection in the conditions of the developed mining complex of the Murmansk region. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN = Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2020;(2):5–14. (In Russ.)
8. Dyadik N.V., Chapargina A.N., Dyadik V.V. et al. Content analysis of methods for assessing environmental safety of a territory. *Moskovskiy ekonomicheskii zhurnal = Moscow Economic Journal*. 2023;8(9):364–383. (In Russ.)
9. Masloboev A.V. An index-based method for integral estimation of regional critical infrastructure resilience using fuzzy calculations (Part 1. Problem statement and method generic structure). *Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):124–141.
10. Masloboev A.V. An index-based method for integral estimation of regional critical infrastructure resilience using fuzzy calculations. Part 2. Resilience capacity models and backbone capabilities. *Reliability and quality of complex systems*. 2024;(3):130–156.
11. Burkov V.N., Novikov D.A., Shchepkin A.V. Control Mechanisms for Ecological-Economic Systems. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2015;10:166.
12. Kashulin N.A., Masloboev V.A. (eds.). *Natsional'nyy obshchestvennyy standart «Ekologicheskaya bezopasnost' Arktiki» = National public standard "Environmental safety of the Arctic"*. Moscow: Libri Plyus, 2016:88. (In Russ.)
13. Masloboev A.V. Systematic approach for ensuring the resilience of ecological-economic systems of the Russian Arctic (Part 1. Resilience management principles). *Reliability and quality of complex systems*. 2023;(1):142–156.
14. Masloboev A.V. Systematic approach for ensuring the resilience of ecological-economic systems of the Russian Arctic (Part 2. Assessment procedure and criteria). *Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):115–126.
15. Zhang R., Wang Ch., Xiong Ya. Ecological security assessment of China based on the pressure-state-response framework. *Ecological Indicators*. 2023;154(110647).
16. Hashemi R., Darabi H. The Review of Ecological Network Indicators in Graph Theory Context: 2014–2021. *International Journal of Environmental Research*. 2022;16(24).
17. Smirnova E.E. *Ekologicheskie standarty upravleniya kachestvom okruzhayushchey sredy = Ecological standards of environmental quality management*. Saint Petersburg: SPbGASU, 2024:537. (In Russ.)
18. Semina S.S., Konyukhov A.N. Rapid centroid defuzzification of subnormal fuzzy intervals. *Sovremennye tekhnologii v nauke i obrazovanii (STNO-2022): sb. tr. V Mezhdunar. nauch.-tekhn. foruma (g. Ryazan', 2–4 marta 2022 g.): v 10 t. = Modern technologies in science and education (STNO-2022) : collection of tr. V International Scientific and Technical Forum (Ryazan, March 2-4, 2022) : in 10 volumes*. Ryazan': RGRU, 2022;5:98–104. (In Russ.)
19. Masloboev V.A., Borovichev E.A., Davydov D. A. (eds.). *Ekosistemy v rayone Kol'skoy AES (Murmanskaya oblast'): sovremennoe sostoyanie = Ecosystems in the area of the Kola NPP (Murmansk region): the current state*. Apatity: FITs KNTs RAN, 2024:468. (In Russ.)
20. Amosov P.V. et al. *Pylenie khvostov obogashcheniya apatit-nefelinovykh rud: ekologicheskaya problema i puti ee resheniya = Dusting of tailings from the enrichment of apatite-nepheline ores: an environmental problem and ways to solve it*. Apatity: FITs KNTs RAN, 2023:168. (In Russ.)
21. Gurlev I.V., Masloboev A.V., Malygin I.G. Situational awareness of the state of the ports of the Northern sea transport corridor in the management of environmental safety in the Arctic. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(4):120–134. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2022-4-13
22. Kubasov I.A. Industrial Internet of Things as a revolutionary development leap. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):83–89. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-2-9

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Владимирович Маслобоев

доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник лаборатории
информационных технологий управления
техногенно-природными системами,
Институт информатики и математического
моделирования имени В. А. Путилова
Федерального исследовательского центра «Кольский
научный центр Российской академии наук»;
главный научный сотрудник,
Институт проблем промышленной экологии Севера
Федерального исследовательского центра «Кольский
научный центр Российской академии наук»
(Россия, Мурманская область, г. Апатиты,
ул. Ферсмана, 14)
E-mail: masloboev@iimm.ru

Andrey V. Masloboev

Doctor of technical sciences, associate professor,
leading researcher of the laboratory of information
technologies for industrial-natural system
management,
Putilov Institute for Informatics and Mathematical
Modeling of the Federal Research Center "Kola
Science Center of the Russian Academy of Sciences";
chief researcher,
Institute of North Industrial Ecology Problems
of the Federal Research Center "Kola Science Center
of the Russian Academy of Sciences"
(14 Fersmana street, Apatity, Murmansk region,
Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /

The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 05.04.2025

Поступила после рецензирования / Revised 24.04.2025

Принята к публикации / Accepted 05.05.2025