

**Эдуард Станиславович Цховребов**✉

канд. экон. наук, доцент, ученый секретарь Отделения проблем экологической безопасности и устойчивого развития, Академия инженерных наук им. А. М. Прохорова. Россия, 123557, Москва, ул. Пресненский вал, 19; rebrovstanislav@rambler.ru

**Михаил Юрьевич Слесарев**

д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ). Россия, 129337, Москва, Ярославское ш., 26; slesarev@mgsu.ru

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НЕЧЕТКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ НА СТАДИИ РАЗРАБОТКИ ПРЕДПРОЕКТНОЙ И ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ<sup>1</sup>**

Увеличивающееся ежегодно количество образующихся и захораниваемых твердых коммунальных, производственных и строительных отходов приводит к всевозрастающей антропогенной нагрузке на окружающую среду, представляя собой одну из главных угроз экологической безопасности для территорий городских округов и регионов. **Цель исследования** — разработка нечеткой шкалы показателей оценки систем, объектов, технологий жизнеобеспечения городских территорий на стадии разработки предпроектной и проектной документации с использованием теории нечетких множеств, реализующих возможности применения мягких вычислений при расчетах уровней экологической безопасности городских территорий, позволяющих, в свою очередь, оценивать состояние защищенности природной среды и жизненно важных интересов человека от опасных техносферных воздействий отходов. В соответствии с поставленной целью в рамках использования теории нечетких множеств и соответствующего математического аппарата мягких вычислений осуществлена разработка нечеткой шкалы уровней ресурсно-экологических показателей для реализации прогнозных исследований перспективного развития промышленно-строительного комплекса и систем жизнеобеспечения населенных пунктов на предпроектной стадии, в процессе осуществления проектной деятельности, а также при оценке сложившегося уровня техносферного воздействия опасных отходов на окружающую среду. Предложенный новый подход, основанный на комплексной оценке предотвращенной экологической опасности, использован при формировании прогноза развития предприятий по обработке, утилизации отходов на период до 2030 г. по регионам и территориям городских округов Российской Федерации. Представляется возможным применение разработанных показателей экологической безопасности городских территорий и методов их определения при обобщении данных социологических исследований, экологической информации с последующей подготовкой социо-экологических критериев и индикаторов благоприятности жизнедеятельности населения и комфортности городской среды.

<sup>1</sup> Исследование выполнено за счет средств Государственной программы Российской Федерации «Развитие науки и технологий» в рамках Плана фундаментальных научных исследований Министра России и РААСН на 2022 г.

**Ключевые слова:** обращение с отходами, вторичные ресурсы, ресурсосбережение, нечеткие множества, жизнеобеспечение городов, нечеткая шкала оценок, экологическая безопасность, техносферное воздействие, экологическая оценка городских территорий.

**Для цитирования:** Цховребов Э. С., Слесарев М. Ю. Методы оценки нечетких показателей экологической безопасности городских территорий на стадии разработки предпроектной и проектной документации // Социология города. 2022. № 3. С. 64—82. DOI: 10.35211/19943520\_2022\_3\_64

## Введение

Проблемы использования искусственного интеллекта в исследованиях перспектив развития методов оценки состояний экологической безопасности территорий, объектов, процессов, материалов в настоящее время являются чрезвычайно актуальными и значимыми в свете поступательно реализуемого курса нашей страны на достижение устойчивого социально-экономического, экологического и промышленно-технологического развития (Суздалева, 2020; Теличенко, Слесарев, 2018; Цховребов, Величко, 2017; Цховребов, 1994).

На важности научной проработки новых требований, критериев и методов повышения защищенности природной среды и жизненно важных интересов человека делают акцент родоначальники национальной научно-педагогической школы «Биосферная совместимость» В. А. Ильичев, С. Г. Емельянов, В. И. Колчунов, Н. В. Бакаева и ряд других авторов (Ильичев и др., 2015; Пилипенко и др., 2017; Графкина, Потапов, 2008).

В настоящей работе означенные актуальные проблемы рассмотрены в новом формате создания нечеткой шкалы показателей интегральной оценки уровня экологической безопасности жизнеобеспечения территорий городских округов, регионов на базе теории нечетких множеств, увязывающих в единой системе количественные оценки и качественные ресурсно-экологические показатели с учетом обратной реакции природной среды на антропогенное воздействие отходов.

Концепция, направления, методы исследования коррелируют с принятыми в мировом сообществе принципами: Zero waste (ноль отходов), RRR (предотвращение образования отходов, повторное использование, переработка во вторичные ресурсы), Green economy (зеленая экономика), Circular economy (экономика замкнутого цикла) (Elgizawy, El-Haggar, Nassar, 2016; Domenech, Bahn-Walkowiak, 2019; Kirchherr и др., 2017; Hart и др., 2019; Ehresman, Okereke, 2015), опираются на достигнутые результаты исследований в области программ и проектов развития зеленого строительства, обеспечения охраны окружающей среды и экологической безопасности (Hertwich и др., 2020; Goldstein, Rasmussen, 2018; Celik и др., 2012; Bartoleto, 2015: 30; Azarov, Manzhilevskaya, Petrenko, 2019).

## Результаты и обсуждение

По замыслу авторов исследования, полученные показатели на основе применения теории нечетких множеств и мягких вычислений призваны обеспечить всестороннюю обоснованную многофакторную оценку состояния экологической безопасности в отношении воздействия завершивших свой

срок эксплуатации строительных материалов и конструкций, использованной продукции в процессе жизнеобеспечения. Возможности применения мягких показателей охватывают стадии бизнес-планирования, оценки воздействия на окружающую среду, разработки технико-экономического обоснования, экологических разделов проектов, территориальных схем обращения с отходами, программ развития в рамках комплексной системы оценки уровня экологической безопасности регионов, муниципальных образований, хозяйствующих субъектов и их производственных объединений.

Система сложившихся научных подходов в области оценки экологически безопасного обращения с отходами (теории, методы, критерии оценки, показатели), предлагаемые пути их развития в новом формате и рассматриваемых в работе аспектах представлены в табл. 1.

Основным отличием предлагаемой нечеткой шкалы показателей интегральной оценки уровня экологической безопасности от известных сложившихся подходов в этой области является целевая направленность на формирование индикаторов оценки предотвращенного экологического вреда путем трансформации ресурсной составляющей отходов в безопасное вторичное сырье с учетом факторов опасности прямого воздействия, обратной реакции экологических систем, периодов их самовосстановления после устранения источника опасности, объединение в составном критерии ресурсосберегающих и природоохранных показателей (Макаров, Слесарев, 2006).

Критерий экологической безопасности системы, объектов, технологий жизнеобеспечения территорий  $Q_{ji}$  определяется уровнем снижения степени экологической опасности в результате реализации технологических процессов трансформации опасных отходов в категорию безопасного вторичного сырья и выражается как сумма произведений показателей  $P_{ji}$ , определяемых в физических единицах массы, и весовых коэффициентов снижения экологической опасности  $k_{ij}$  конкретного отхода после его преобразования во вторичное сырье:

$$Q_{ji} = \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^w P_{ji} k_{ij}, \quad (1)$$

$$P_{ji} = \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^w (C_j / Q_i), \quad (2)$$

где  $P_{ji}$  — доля вторичного сырья, полученного из ресурсной составляющей  $i=1 \dots r$ ;  $O_i$  — количество образующихся опасных отходов  $i=1 \dots w$  видов;  $C_j$  — количество вторсырья  $j=1 \dots r$  видов, полученного из отходов;  $k_{ij}$  — показатель изменения экологической опасности отхода при регулирующем воздействии, определяемый как соотношение уровней экологической опасности антропогенных объектов множеств  $O$  и  $C$  до и после технологических преобразований:  $k_{ij} = k_i / k_j$ .

Величина  $C_j$  выражает уровень использования в производимой продукции и работах ресурсов  $i=1 \dots w$  отходов в качестве вторсырья  $j=1 \dots r$  видов на единицу образования отходов.

Показатель  $k_{ij}$  представлен в формуле (3) произведением трех критериев, определяющих конечную цель моделируемой системы экологически безопасного жизнеобеспечения:

а) минимизация опасности образующегося антропогенного объекта до малоопасного/практически неопасного уровня в источнике образования;

б) предотвращение попадания в природную среду, нанесения экологического вреда;

в) предупреждение повреждения, нарушения, порчи экосистем в случае воздействия на них отходов в качестве источников экологической опасности.

$$k_{ij} = ko_{ij} kv_{ij} ke_{ij}. \quad (3)$$

Схема формирования предлагаемых весовых коэффициентов, характеризующих экологическую опасность различных отходов, приведена в табл. 2.

Как следует из табл. 2, основными критериями формирования коэффициентов служит восстанавливаемость экосистем, степень нарушения, уровень опасности, длительность нахождения в ней опасных отходов, напрямую влияющие на реанимационные процессы восстановления природных объектов. Оперативный прогноз состояния защищенности природной среды от воздействия антропогенных объектов предлагается осуществлять на основе применения методов математической логики с помощью оценки выделенных групп экологических состояний: безопасное, опасное и катастрофическое в соответствии с разработанными выше индикаторами (экологическая опасность источника воздействия, длительность воздействия с учетом срока нахождения в природной среде, период восстановления экологических систем после устранения и/или естественного разложения источника опасности). Подобный подход использовали Т. Г. Середа и С. Н. Костарев при оценке безопасности аппаратов (Костарев, Середа, 2016).

Для формирования комплексной оценки состояний экологической опасности территории составляются конъюнкции всех переменных показателей ( $ke$ ,  $ko$ ,  $kv$ ), при которых функция отклика Э равна единице, безопасных — соответствующих нулю в рамках дизъюнкции рассматриваемых условий. Вышеуказанные факторы служат индикаторами для построения совершенной дизъюнктивной нормальной формы выражения логических функций экологической опасности (ЭО) и экологической катастрофы (ЭК), а также совершенной конъюнктивной нормальной формы, отражающей логическую функцию состояния экологической безопасности (ЭБ) территории, объекта в отношении воздействия отходов:

$$\text{Э (ЭБ, ЭО, ЭК)} = F(ko, kv, ke). \quad (4)$$

Сделано допущение, что необходимым условием (показателем) состояния экологической катастрофы территории муниципального образования (ее части, земельного участка или акватории) будет являться необратимость последствий нарушения экологической системы, невозможность или длительный (от 100 лет) период ее искусственного восстановления при размещении в природной среде чрезвычайно и высоко опасных отходов и/или со сроками разложения более 100 лет — в качестве достаточных условий:

$$\text{ЭК} = 1, \text{ если } ke = 1, ko \vee kv = 1.$$

**Таблица 1.** Система сложившихся научных подходов в области управления отходами и оценки их экологически безопасного обращения

Авторы и наименование теории	Сущность и практическая реализация	Критерии оценки экологической безопасности	Предлагаемое научное решение в области экобезопасности
А. Нагорный. Концепция возобновляющих ресурсы технологий  Н. Н. Семенов, И. В. Петрянов-Соколов. Теория безотходных технологических процессов	Механическая, физико-химическая, биотехнологическая обработка в целях минимизации выхода отходов  Форма создаваемых продуктов позволяет после применения по прямому назначению рентабельно превращать их в исходные элементы нового производства	Возобновление части ресурсов после обработки образовавшихся смешанных отходов  Не учитываются опасные свойства: токсичность, высокая реакционная способность, взрыво-, пожаро-, биоопасность	Ресурсовосстановительная, ресурсосохранная система раздельно собранных ресурсопригодных составляющих  Учет состояний и свойств в текущий момент времени в процессе раздельного сбора, изолированного накопления, обработки
Б. Н. Ласкорин. Оценка технологических схем на базе критерия безотходности производства	Мера оценки экологической безопасности в виде соотношения циркулирующих отходов в их общем количестве	Не учитываются уровни токсичности, замены природных ресурсов вторичными	Оценка по конечному результату — уровню вовлеченного вторсырья в хозяйственный оборот и снижению экоопасности
А. Д. Потапов, М. В. Графкина. Критерии экологической безопасности проектируемых технических, строительных систем с выбором оптимальных параметров	Представление «общей экологической характеристики и безопасности проектируемой технической системы» в качестве «совокупности негативных воздействий на входе и выходе в производственную систему»	Оценка потенциальных наступающих экологических последствий, а не предотвращенных, обеспечивающих защищенность природной среды	Принцип предотвращения опасного воздействия на этапе зарождения отходов (предпроектная стадия); сохранение, восстановление ресурсов с заменой природных как базовый критерий экобезопасности

<p>Ю. П. Лебединский, Ю. В. Склянкин. Коэффициент экологичности</p> <p>О. В. Пилипенко, Н. В. Бакаева, А. Ю. Натарева, В. А. Гордон. Количественная оценка экологической безопасности объектов недвижимости на основе концепции зеленого строительства</p>	<p>Оценивается степень безопасности производства по отношению к окружающей среде по уровню использования отходов с учетом относительной опасности</p> <p>Критерии оценки экологической безопасности: месторасположение, качество управления и внутренней среды, экономические, комфортность и комплексная безопасность. Последние два определены в виде базовых. Разработан комплексный критерий для общей оценки экологической безопасности здания</p>	<p>Не учитываются условия достижения такой возможности, уровня замены природных ресурсов вторичными</p> <p>Состояние защищенности определяется через уже действующие институциональные инструменты, не выделяя новые отличительные принципы, признаки, методы оценки экобезопасности как отдельной категории. Рамки предмета оценки сужены до здания</p>	<p>Приоритет использования наиболее опасных отходов с учетом предупреждения попадания в природную среду, обратной реакции экосистем</p> <p>Сформулирована иерархия состояний экобезопасности. Комплексная оценка опасности на основе нового составного критерия эколого-ресурсных индикаторов, направленных на обеспечение состояния защищенности природной среды и предотвращение опасного воздействия отходов</p>
<p>В. А. Ильичев, В. И. Колчунов, Н.В. Бакаева, С.А. Кобелева. Оценка экологической безопасности строительства на основе модели ресурсного цикла</p>	<p>Методика расчета энерго- и ресурсной эффективности гражданских зданий полного ресурсного цикла для оценки экологической безопасности в строительстве</p>	<p>Результат ресурсного цикла — отходы. Показатель безотходности без учета фактора опасности отхода. Оценка экологической безопасности применительно к зданию</p>	<p>Отходы исключаются из ресурсного цикла. Оценка экологической безопасности всего цикла сырьевого обращения. Расширен состав ресурсосберегающих показателей. Комплексный эколого-ресурсный показатель безопасности</p>

Таблица 2. Схема предлагаемых весовых коэффициентов, характеризующих экологическую опасность ресурсных составляющих отходов

Показатель	Коэффициент экоопасности антропогенного объекта $k_{o,i}$	Коэффициент опасности прямого временного воздействия $k_{v,i}$	Коэффициент опасности обратной реакции экосистем $k_{e,i}$
Методическая основа	Класс опасности отходов производства и потребления	Сроки естественного разложения источника опасности в природной среде	Состояние, период восстановления экосистем после устранения воздействия источника опасности
Оцениваемый показатель	Уровень опасности для окружающей среды	Длительность временного воздействия	Длительность восстановления экологических систем
Качественная характеристика базового исходного показателя	Чрезвычайно, высоко, умеренно, малоопасные, практически неопасные	Распределение по группам: 1. Цветмет, стекло, синтетические полимеры. 2. Черные металлы, минеральные. 3. Древесные, текстиль, макулатура	Необратимо нарушена, сильно нарушена, нарушена, незначительно нарушена, практически не нарушена
Соответствующее численное значение	1, 2, 3, 4, 5 по убыванию опасности	Ранжирование по периодам: ]100; 1000]; ]10;100]; [1;10]	30; 10; 3; 1. Максимальный период восстановления принят от 100 лет
Формализация показателя в виде весового коэффициента	Обратная величина числа класса опасности отхода: $\{1/1; 1/2; 1/3; 1/4; 1/5\}$	Соотношение шкалы границ периодов разложения при принятии максимальной за единицу $\{1; 0,1; 0,01\}$	Соотношение сроков восстановления экосистем при принятии за единицу наибольшего $\{1; 0,3; 0,1; 0,03; 0,01\}$
Математический смысл	Пороговое возрастание весового коэффициента, определяющего весомость предотвращения образования отходов более высокого класса экологической опасности	Пороговое возрастание весового коэффициента, характеризующего весомость предотвращения размещения отходов с более высокими сроками естественного разложения	Пороговое возрастание весового коэффициента, определяющего весомость предотвращения загрязнения природной среды теми отходами, негативное воздействие которых приводит к большему срокам восстановления экосистем

Экологический смысл	Оценка значимости снижения уровня экологической опасности более опасного антропогенного объекта	Оценка временного воздействия отходов на окружающую среду с учетом сроков естественного разложения	Оценка обратной связи экологической системы нахождение источника экологической опасности в природной среде в виде ответной реакции
Научно-практическое значение	Придание приоритетности мерам предупреждения образования и снижению уровня экоопасности завершившей срок эксплуатации продукции в источнике появления	Придание значимости мерам предотвращения попадания в природную среду отходов с высокими сроками разложения (пылеунос, смыв, захоронение)	Придание значимости предотвращению попадания в природную среду отходов, последствия воздействия которых обусловлены более значительными сроками восстановления экосистем после устранения источника

Таблица 3. Нечеткая оценка состояний территорий муниципальных образований

Приведенный срок восстановления нарушенных экосистем $k_e$	Приведенная экоопасность источника воздействия $k_o$	Приведенный срок нахождения в природной среде $k_b$	Экологически безопасное состояние	Экологически опасное состояние	Состояние экологической катастрофы
0	0	0	1	0	0
0	0	1	0	1	0
0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	1	0
1	0	0	0	1	0
1	0	1	0	0	1
1	1	0	0	0	1
1	1	1	0	0	1

Экологически безопасное состояние определено в следующих случаях:

а) экосистема нарушена незначительно или практически не нарушена и имеет способность к самовосстановлению в периоде до 3 лет при локальных кратковременных воздействиях;

б) уровень экоопасности антропогенных объектов, не обладающих состоянием опасных отходов, — практически неопасный;

в) срок естественного разложения не утилизируемых, размещенных в виде биорекультиванта обработанных вторичных ресурсов (ВР) составляет не более 3 лет, в отдельных случаях, при применении в качестве технического рекультиванта, — до 10 лет: ЭБ = 1, если  $ke = 0, ko = 0, kv = 0$ .

Необходимым условием экологически опасного состояния служит нарушение экосистемы, повлекшее за собой невозможность самовосстановления и, соответственно, необходимость искусственного восстановления экосистемы после устранения воздействия источника опасности периодом от 10 лет и более, а достаточными условиями — размещение в природной среде умеренно опасных, малоопасных отходов и/или со сроками естественного разложения от 10 до 100 лет. Данные условия определены логическим выражением:

$$\text{ЭО} = 1, \text{ если } \begin{cases} ke = 0, ko \vee kv = 1, \\ ke = 1, ko = 0, kv = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Для получения совершенной дизъюнктивной нормальной формы логической функции составлялись элементарные конъюнкции всех переменных, при которых функция достигала единицы. Учитывалось, что в конъюнкцию входила как сама переменная при значении, равном единице, так и ее инверсия при нулевом значении. Дизъюнкция полученных элементарных конъюнкций применялась для определения состояния экоопасности и/или экологической катастрофы, минимизация конъюнктивной нормальной формы — при фиксировании экологически безопасного состояния. С учетом изложенного построена таблица оценки состояний (табл. 3).

Проведенные исследования показали, что при наличии неопределенности внешних условий и значительного числа переменных в ходе оценки экологической опасности территорий возникает необходимость формирования составного критерия на основе разработки единой порядковой шкалы, создавая ее из оценок по отдельным частным критериям методом оценки замкнутых процедур у опорных ситуаций или в рамках известных нормативных значений. В рассматриваемом случае при наличии трех критериев ( $ke, ko, kv$ ), определяемых по трем диапазонам значений (0, 1, 2), шкала составного критерия Э будет иметь вид:

$$\begin{aligned} & ke^0 ko^0 kv^0 \Rightarrow ke^0 ko^1 kv^0 \Rightarrow ke^1 ko^0 kv^0 \Rightarrow ke^0 ko^2 kv^0 \Rightarrow ke^2 ko^0 kv^0 \\ & ke^0 ko^0 kv^1 \Rightarrow ke^1 ko^0 kv^1 \Rightarrow ke^0 ko^1 kv^1 \Rightarrow ke^2 ko^0 kv^1 \Rightarrow ke^0 ko^1 kv^2 \\ & ke^0 ko^1 kv^0 \Rightarrow ke^0 ko^1 kv^1 \Rightarrow ke^0 ko^0 kv^1 \Rightarrow ke^0 ko^2 kv^0 \Rightarrow ke^0 ko^0 kv^2 \\ & \text{Составной критерий } \text{Э} \text{ определен следующим образом:} \\ & \text{Э}^0 \quad \quad \quad | \quad \quad \quad \text{Э}^1 \quad \quad \quad | \quad \quad \quad \text{Э}^2 \\ & ke^0 ko^0 kv^0 \Rightarrow ke^0 ko^1 kv^0 \Rightarrow ke^1 ko^0 kv^0 \Rightarrow ke^0 ko^2 kv^0 \Rightarrow ke^2 ko^0 kv^0 \Rightarrow ke^0 ko^0 kv^1 \end{aligned}$$

Однако построение шкал нечетких критериев экологической опасности на основе полученных данных логических операций имеет ограничения при практическом применении в ходе системной количественной оценки уровня

снижения экологической опасности за счет минимизации массы образования отходов, а также величин выделенной из них безопасной ресурсной составляющей для целей повторного использования в качестве вторичного сырья.

Установление ресурсного показателя  $P_{ji}$  основывается на принципе предотвращения образования опасных отходов в количественном выражении. Он определяется уровнем повторного использования ресурсной составляющей использованной продукции, овеществленной в процессе производства товаров, работ, энергии. Ресурсовосстановительный смысл показателя заключается в максимизации уровня применения ресурсного потенциала в виде вторсырья (в качестве альтернативы природным ресурсам) на единицу образования отхода.

Необходимость создания ресурсных критериев экологически безопасного функционирования динамических производственных процессов обусловлена тем, что существующие методы оценки обращения ресурсов применимы, в основном, к процессам заводского выпуска продукции. Употребляемые для анализа уровня использования ВР показатели безотходности, ресурсосодержания, ресурсоемкости отнесены к оценке самой продукции и технологического цикла ее изготовления в условиях промышленного производства, а ресурсопотребления по своей сути не оказывают стимулирующего воздействия на процессы экономии материально-сырьевых ресурсов, или максимизацию использования ресурсного потенциала отходов. По мнению авторов, эти индикаторы по содержанию не могут комплексно, обоснованно дать эколого-ресурсную оценку работы системы жизнеобеспечения населенных пунктов с учетом наличия существенно зависимых от ресурсов нестационарных, динамических объектов строительства, демонтажа, ремонта, содержания недвижимости. Это обуславливает разработку новых методических подходов к формированию системы ресурсных показателей (табл. 4).

Модель составного критерия комплексной ресурсно-природоохранной оценки экологически безопасного жизнеобеспечения муниципальных образований представлена на рис. 1.

Каждый из критериев определяется набором характеристик, обусловленных совокупностью параметров или конкретным параметром. Исходное множество альтернатив описывается тремя показателями ( $P_c$ ,  $P_v$ ,  $P_z$ ) и весовыми признаками ( $k_e$ ,  $k_o$ ,  $k_v$ ), имеющими упорядоченные пороговые шкалы дискретных оценок:  $X_e = \{0, 1, 2, 3, 4\}$ ;  $X_o = \{0, 1, 2, 3, 4\}$ ;  $X_v = \{0, 1, 2\}$ .

Множество альтернатив группируется в четыре упорядоченных класса: ЭБ<sub>1</sub>, ЭБ<sub>2</sub>, ЭБ<sub>3</sub>, ЭБ<sub>4</sub> — «Экологическая безопасность территории» с оценками уровней: 0 — критический, 1 — недопустимый, 2 — нормативный, 3 — комфортный, соответствующие градациям шкалы составного критерия верхнего уровня  $Z = \{z^0, z^1, z^2, z^3\}$ .

Достоверность созданного составного критерия на сформированной нечеткой шкале показателей экологической безопасности отходов обусловлена:

- а) совместимостью показателей — допустимостью любой их комбинации;
- б) независимостью — отсутствием корреляционной связи между ними;
- в) однозначностью исследуемых параметров, непосредственно воздействующих на объект, их существованием при любом его состоянии;
- г) количественным выражением конкретным численным значением;

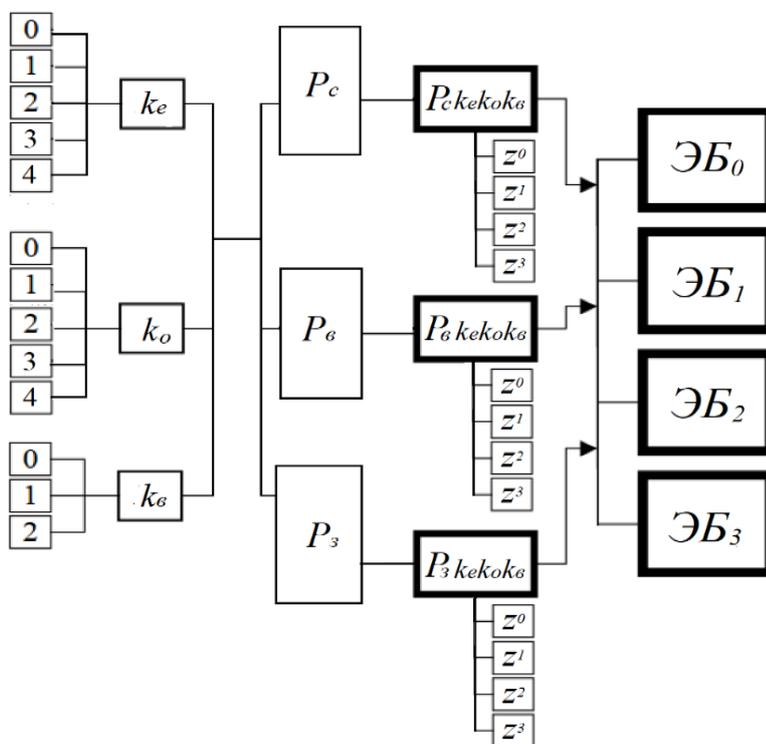
д) точностью интерпретации в соответствии с нормативно-правовой базой;

е) статистической однородностью: соответствию весовых коэффициентов определенному набору значений ресурсного показателя, а также факторов конкретного отклика (изменения уровня экологической опасности и обратной связи (ответной реакции) природной среды);

ж) каузальностью — наличием причинно-следственной связи между выделением, повторным использованием ресурсной составляющей из отходов (ресурсный индикатор) и снижением уровня экологической опасности, вызванным предотвращением образования отходов и, соответственно, предупреждением негативного воздействия на природную среду (природоохранный индикатор);

з) универсальностью — характерностью не только для систем жизнеобеспечения и применимостью на различных этапах инвестиционного процесса развития промышленного производства;

и) управляемостью в ходе практического использования.



**Рис. 1.** Шкала составных критериев оценки экологической без-опасности отходов

Показатели нечеткой шкалы оценки могут соответствовать выведенным выше четырем составным качественным критериям оценки. Совокупность впервые выведенных показателей образует нечеткую шкалу уровня экологической безопасности территорий как городских округов, так и регионов в целом (рис. 2).

Таблица 4. Шкала нечетких индикаторов использования ресурсов

Нечеткий показатель. Обозначение, наименование, описание и целевое назначение	Стадия и условия оценки	Выражение единицы измерения
<p>Ресурсная идентификация <i>Р<sub>и</sub></i></p> <p>Количество (масса) составных элементов (частей) завершившей срок эксплуатации, использованной продукции, по которым установлено соответствие (отождествленных) признакам потенциальных общественно востребованных ресурсов</p> <p>Ресурсная пригодность <i>Р<sub>с</sub></i></p> <p>Количество (масса) извлеченных, разделено собранных, изолированных от взаимодействия с компонентами природной среды и между собой ресурсных составляющих с сохраненными (пригодными) характеристиками и свойствами, позволяющими использование в виде возобновляемых ВМР и ВЭР</p> <p>Ресурсная восстановимость <i>Р<sub>в</sub></i></p> <p>Количество (масса) технологически преобразованных ВМР и ВЭР с нормативными, стандартизованными технико-эксплуатационными характеристиками сырья, обладающего потребительскими свойствами для производства с его применением продукции, работ, энергии</p> <p>Ресурсная заменимость <i>Р<sub>з</sub></i></p> <p>Количество (масса) вторичного сырья, используемого в качестве замены (аналога) сырья из природного ресурса и в полном объеме или частично замещающего его в хозяйственном обороте на основании документов по стандартизации, нормативно-технической документации</p>	<p>Предпроектная. Проектирование. Нормирование (на этапе зарождения, а не образования использованной продукции)</p> <p>Раздельный сбор и накопление (при условии наличия технической возможности, допустимости, целесообразности повторного применения)</p> <p>Обработка (при условии восстановления ВР до уровня свойств и характеристик востребованного на потребительском рынке товара)</p> <p>Утилизация (при условии, что в результате замены природного сырья вторичным будет получена продукция аналогичного или лучшего качества)</p>	<p>Уровень отождествленных признакам ресурсов составных частей на единицу продукции</p> <p>Уровень выделения ресурсной части, пригодной для обработки в качестве ВМР и ВЭР, на единицу использованной продукции</p> <p>Уровень восстановления ВР до предъявляемых требований к вторсырью на единицу исходных ВР</p> <p>Уровень замены (высвобождения) сырья из природных ресурсов на единицу замещаемого вторсырья</p>

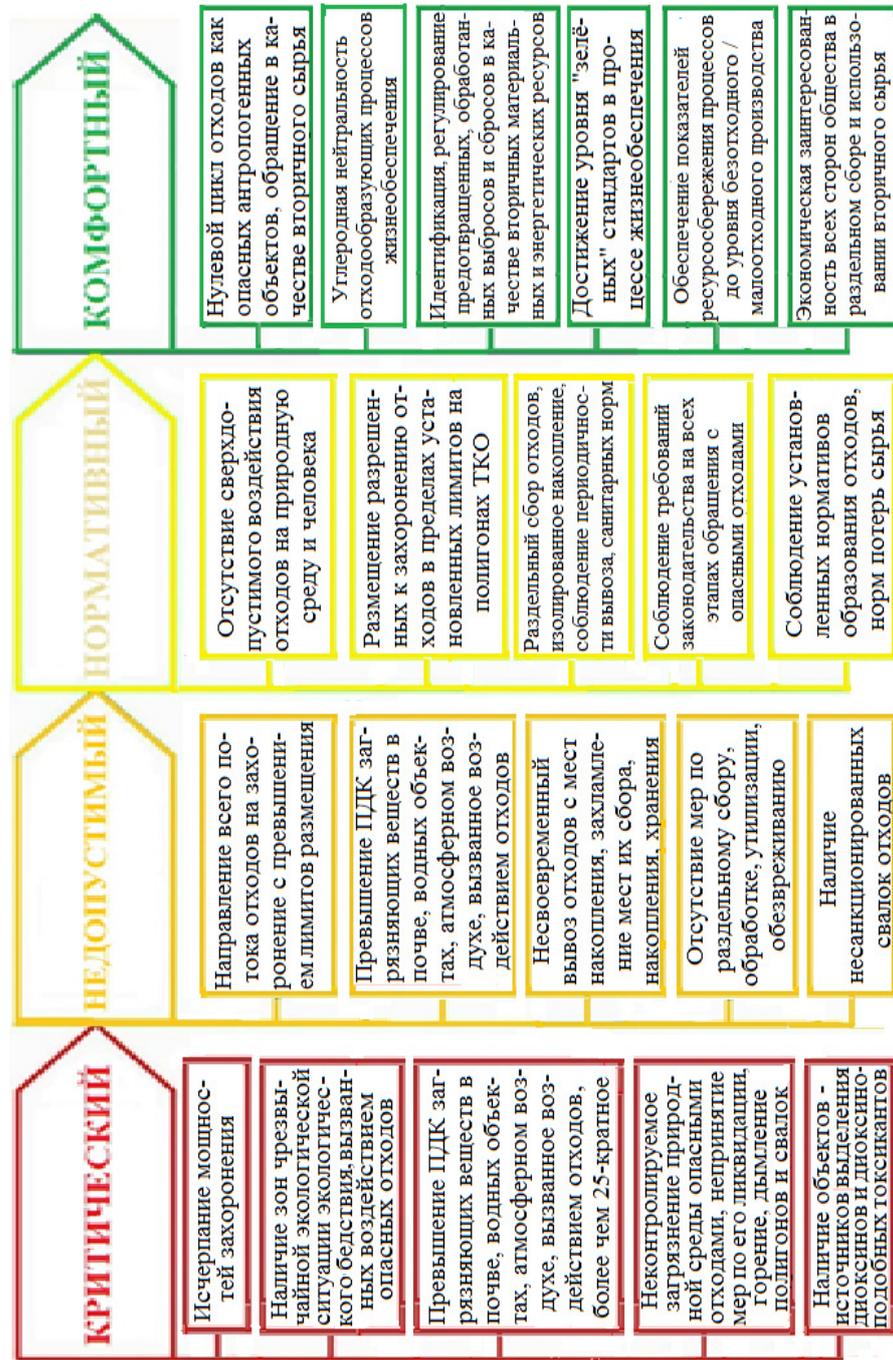
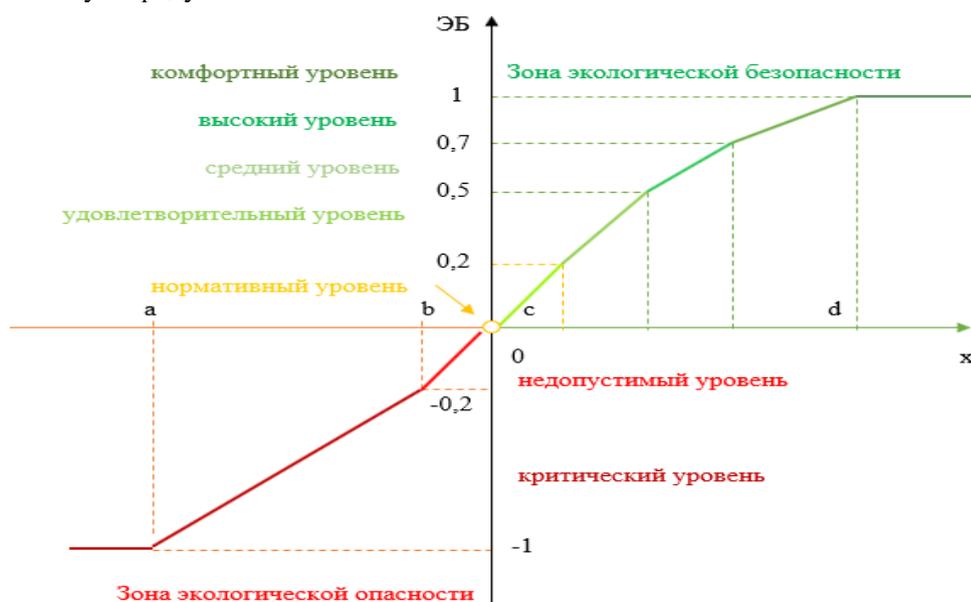


Рис. 2. Шкала уровней экологической безопасности городских округов и регионов на основе нечеткой оценки качественных показателей антропогенного воздействия отходов

Для количественной интерпретации нечеткой оценки уровня экологической безопасности муниципального образования в части антропогенного воздействия отходов предлагается балльная оценка весомости нечетких показателей с последующим ранжированием пороговых уровней экологической безопасности по сумме присвоенных баллов в результате экспертной оценки, основанной на системном анализе сложившейся природоохранной ситуации. Факторам, характеризующим критический качественный индикатор, присваивается численное значение « $-0,2$ », недопустимый — « $-0,04$ », нормативный — « $0$ », комфортный — « $0,2$ » с учетом перехода с одного порогового уровня на другой в границах нечеткой шкалы оценок  $[-1; 1]$  при введенных обозначениях:  $a$  — нижняя граница критического уровня ( $-0,2*5$ );  $b$  — недопустимого ( $-0,2$ );  $c$  — нормативного ( $0$ );  $d$  — комфортного ( $1$ ) (рис. 3).

Нормативный (допустимый) нулевой уровень, по замыслу авторов, означает базовую исходную точку состояния системы жизнеобеспечения для формирования природоподобных, биопозитивных, ресурсосберегающих, углеродно нейтральных технологий среды жизнедеятельности, реализующих переход муниципальных образований и регионов, городского хозяйства, строительного комплекса на ресурсосберегающий технологический уклад устойчивого экологически безопасного развития, одновременно обеспечивая благоприятные условия жизнедеятельности населения и комфортную окружающую среду.



**Рис. 3.** Графическая интерпретация функции принадлежности оценок показателей экологической безопасности нечеткой балльной шкалы

Предполагается, что суммарный баланс показателей, определяющий минимальный уровень экологически безопасного состояния исследуемой территории, объекта или их комплекса, должен иметь положительное значение, удовлетворительный — превышать величину  $0,2$ , средний —  $0,5$ , высокий —  $0,7$ , наивысший —  $1$ . В этом случае экологически безопасному качественно-

му уровню будет соответствовать нахождение аддитивного индикатора состояния территории регионов в интервале нечетких оценок  $[0; 1]$  по предлагаемой нечеткой шкале. Расширение состава критериев комфортного состояния территорий регионов будет напрямую связано с социально-экономическим развитием общества, а также инновационных методов, организационно-технических систем, технологий среды жизнедеятельности.

### **Выводы**

В работе впервые сформирована нечеткая шкала ресурсно-экологических показателей в рамках нечетких множеств, позволяющая использовать численный аппарат мягких вычислений и отображающая в формализованном виде текущее состояние, условия, потенциал перехода комплекса технологий жизнеобеспечения муниципальных образований и регионов на ресурсосберегающий технологический уклад экологически безопасного функционирования:

а) показатель оценки состояния экологической безопасности процессов жизнеобеспечения, устанавливающий зависимость уровней использования ресурсного потенциала отходов, их ресурсной ценности и предотвращенного антропогенного воздействия, позволяющий проводить системный анализ состояния защиты природной среды от негативного воздействия объектов;

б) показатель оценки экологической безопасности городских территорий в отношении техносферного воздействия отходов на базе вводимого понятия: нечеткой шкалы уровней, отражающей количественную интерпретацию их весомости с применением балльной оценки.

Научно-прикладная значимость разработанной нечеткой шкалы показателей экологической безопасности жизнеобеспечения подтверждается широким диапазоном возможностей практической реализации: при создании экологических разделов предпроектной, проектной документации, обосновании требований экобезопасности на этапах инвестиционной деятельности; организации системы производственного экологического контроля; в рамках актуализации правовых актов в области проектирования и строительства, сводов правил, стандартов в части дополнения положениями, содержащими указания по применению ресурсной составляющей отходов при осуществлении ремонтно-строительных, демонтажных работ; в качестве критериев экологической оценки территорий регионов, городской среды при разработке территориальных схем обращения с отходами, концепций социально-экономического, промышленного развития; анализе эффективности работы государственных органов путем введения нечеткого показателя, отражающего ситуацию в области ресурсосбережения и экологической безопасности как индикатора устойчивого развития городов и регионов.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

*Графкина М. В., Потапов А. Д.* Оценка экологической безопасности строительных систем как природно-техногенных комплексов // Вестник МГСУ. 2008. № 1. С. 23—28.

*Ильичев В. А., Емельянов С. Г., Колчунов В. И., Гордон В. А., Бакаева Н. В.* Принципы преобразования города в биосферосовместимый и развивающий человека: монография. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2015. 186 с.

*Ильичев В. А., Колчунов В. И., Бакаева Н. В., Кобелева С. А.* Оценка экологической безопасности строительства на основе модели полного ресурсного цикла // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. 2016. № 4 (44). С. 169—176.

*Костарев С. Н., Серeda Т. Г.* Проектирование комбинационного автомата для оценки безопасности источника опасности // Вестник ПНИПУ. 2016. № 4. С. 77—87.

*Макаров Г. В., Слесарев М. Ю.* Применение нечетких множеств в экспертных системах экологического мониторинга // Экологические системы и приборы. 2006. № 2. С. 39—45.

*Пилипенко О. В., Бакаева Н. В., Гордон В. А., Натарова А. Ю.* Количественная оценка экологической безопасности объектов недвижимости на основе концепции зеленого строительства // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2017. № 4. С. 44—58.

*Суздалева А. Л.* Экологическая глобалистика и устойчивое развитие на этапе техногенной трансформации биосферы // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2020. № 1. С. 6—11.

*Теличенко В. И., Слесарев М. Ю.* «Зеленая» стандартизация технологий формирования природоподобной среды жизнедеятельности // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 5(116). С. 558—567. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.558-567.

*Цховребов Э. С.* Охрана окружающей среды на железнодорожном транспорте. М.: Космосинформ, 1994. 354 с.

*Цховребов Э. С., Величко Е. Г.* Теоретические положения формирования методологии создания комплексной системы обращения строительных отходов // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 1. С. 83—93. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.1.83-93.

*Azarov V. N., Manzhilevskaya S. E., Petrenko L. K.* Organizational and economic problems of ecological safety in construction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Conference “Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development” — Organisation and Technology of Construction Production. 2019. P. 055007.

*Bartoleto A.* Waste prevention policy and behaviour. New approaches to reducing waste generation and its environmental impacts. Routledge studies in waste management and policy. London; New York: Routledge, 2015. 202 p.

*Celik N., Antmann E., Shi X., Hayton B.* Simulation-based optimization for planning of effective waste reduction, diversion, and recycling programs. University of Miami, 2012. 34 p.

*Domenech T., Bahn-Walkowiak B.* Transition Towards a Resource Efficient Circular Economy in Europe: Policy Lessons from the EU and the Member States // Ecological Economics. 2019. Vol. 155. Pp. 7—19. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2017.11.001.

*Ehresman T., Okereke C.* Environmental justice and conceptions of the green economy // International Environmental Agreements: Politics, Law & Economic. 2015. Vol. 15. No. 1. Pp. 13—27. DOI: 10.1007/s10784-014-9265-2.

*Elgizawy S., El-Haggag S., Nassar K.* Slum Development Using Zero Waste Concepts: Construction Waste Case Study // Procedia Engineering. 2016. Vol. 145. Pp. 1306—1313. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.04.168.

*Goldstein B., Rasmussen F.* LCA of Buildings and the Built Environment // Life Cycle Assessment. 2018. Pp. 695—720. DOI: 10.1007/978-3-319-56475-3\_28.

*Hart J., Adams K., Giesekam J., Densley D., Tingley F.* Pomponi Barriers and drivers in a circular economy: the case of the built environment // Procedia CIRP. 2019. Vol. 80. Pp. 619—624. DOI: 10.1016/j.procir.2018.12.015.

*Hertwich E., Lifset R., Pauliuk S., Heeren N.* Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future. A Report of the Int. Resource Panel. United Nations Environment Programme, Kenya. 2020.

URL: <https://www.unep.org/resources/report/resource-efficiency-and-climate-change-material-efficiency-strategies-low-carbon>. Accessed: 01.06.2022.

*Kirchherr J., Reike D., Hekkert M.* Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions // *Resources, Conservation & Recycling*, 2017. Vol. 127. Pp. 221—232. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.

Research Article

**Eduard S. Tskhovrebov**

Candidate of Economic Sciences, Docent, Corresponding member, Prokhorov Academy of Engineering Sciences. 19, Presnensky Val st., Moscow, 123557, Russia; rebrovstanislav@rambler.ru

**Mikhail Yu. Slesarev**

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the Construction of Thermal and Nuclear Power Facilities Department, Moscow State University of Civil Engineering (MGSU). 26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russia; slesarev@mgsu.ru

**METHODS OF EVALUATION OF FUZZY INDICATORS OF ENVIRONMENTAL SAFETY OF URBAN TERRITORIES AT THE STAGE OF DEVELOPMENT OF PRE-PROJECT AND PROJECT DOCUMENTATION<sup>2</sup>**

**Abstract.** The increasing amount of solid municipal, industrial and construction waste generated and buried annually leads to an ever-increasing anthropogenic load on the environment, representing one of the main threats to environmental safety for the territories of urban districts and regions. The purpose of the study is to develop a fuzzy scale of indicators for assessing systems, objects, life support technologies of urban areas at the stage of development of pre-design and project documentation using the theory of fuzzy sets, realizing the possibilities of using soft computing in calculating the levels of environmental safety of urban areas, allowing, in turn, to assess the state of protection of the natural environment and vital human interests from dangerous technospheric effects of waste. In accordance with this goal, within the framework of using the theory of fuzzy sets and the corresponding mathematical apparatus of soft computing, the development of a fuzzy scale of resource and environmental indicators levels was carried out for the implementation of predictive studies of the prospective development of the industrial and construction complex and life support systems of settlements at the pre-project stage, during the implementation of project activities, as well as when assessing the current level of technosphere the impact of hazardous waste on the environment. The proposed new approach, based on a comprehensive assessment of the prevented environmental hazard, was used in the formation of a forecast for the development of waste treatment and disposal enterprises for the period up to 2030 by regions and territories of urban districts of the Russian Federation. It seems possible to apply the developed indicators of environmental safety of urban areas and methods of their determination when summarizing the data of sociological research, environmental information with subsequent preparation of socio-ecological criteria and indicators of the favorable living conditions of the population and the comfort of the urban environment.

---

<sup>2</sup> The study was carried out at the expense of the State Program of the Russian Federation “Development of Science and Technology” within the framework of the Plan for Fundamental Scientific Research of the Ministry of Construction of Russia and RAASN for 2022.

**Keywords:** waste management, secondary resources, resource conservation, fuzzy sets, life support technologies, fuzzy rating scale, environmental safety, technosphere impact, environmental assessment of urban areas.

**For citation:** Tskhovrebov E. S., Slesarev M. Yu. (2022) Methods of evaluation of fuzzy indicators of environmental safety of urban territories at the stage of development of pre-project and project documentation. *Sotsiologiya Goroda* [Urban Sociology], no. 3, pp. 64—82 (in Russian). DOI: 10.35211/19943520\_2022\_3\_64

## REFERENCES

- Azarov V. N., Manzhilevskaya S. E., Petrenko L. K. (2019) Organizational and economic problems of ecological safety in construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Conference “Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development” — Organisation and Technology of Construction Production*. P. 055007.
- Bartoleto A. (2015) *Waste prevention policy and behaviour. New approaches to reducing waste generation and its environmental impacts. Routledge studies in waste management and policy*. London; New York: Routledge, 202 p.
- Celik N., Antmann E., Shi X., Hayton B. (2012) *Simulation-based optimization for planning of effective waste reduction, diversion, and recycling programs*. University of Miami, 34 p.
- Domenech T., Bahn-Walkowiak B. (2019) Transition Towards a Resource Efficient Circular Economy in Europe: Policy Lessons from the EU and the Member States. *Ecological Economics*, vol. 155, pp. 7—19. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2017.11.001.
- Ehresman T., Okereke C. (2015) Environmental justice and conceptions of the green economy. *International Environmental Agreements: Politics, Law & Economic*, vol. 15, no. 1, pp. 13—27. DOI: 10.1007/s10784-014-9265-2.
- Elgizawy S., El-Haggar S., Nassar K. (2016) Slum Development Using Zero Waste Concepts: Construction Waste Case Study. *Procedia Engineering*, vol. 145, pp. 1306—1313. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.04.168.
- Goldstein B., Rasmussen F. (2018) LCA of Buildings and the Built Environment. In: *Life Cycle Assessment*. Pp. 695—720. DOI: 10.1007/978-3-319-56475-3\_28.
- Grafkina M. V., Potapov A. D. (2008) The analysis of ecologic safety of building systems is a nature-technical complex (theoretical basis). *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering], no. 1, pp. 23—28 (in Russian).
- Hart J., Adams K., Giesekam J., Densley Tingley D., Pomponi F. (2019) Barriers and drivers in a circular economy: the case of the built environment. *Procedia CIRP*, vol. 80, pp. 619—624. DOI: 10.1016/j.procir.2018.12.015.
- Hertwich E., Lifset R., Pauliuk S., Heeren N. (2020) Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future. A Report of the Int. Resource Panel. United Nations Environment Programme, Kenya. URL: <https://www.unep.org/resources/report/resource-efficiency-and-climate-change-material-efficiency-strategies-low-carbon>. Accessed: 01.06.2022.
- Il'ichev V. A., Emel'yanov S. G., Kolchunov V. I., Gordon V. A., Bakaeva N. V. (2015) *Printsipy preobrazovaniya goroda v biosferosovmestimyi i razvivayushchii cheloveka: monografiya* [Principles of transformation of the city into a biosphere-compatible and developing human being]. Moscow: ASV publ., 186 p. (in Russian).
- Il'ichev V. A., Kolchunov V. I., Bakaeva N. V., Kobeleva S. A. (2016) Assessment of the environmental safety of construction based on the full resource cycle model. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo GASU. Stroitel'stvo i arkhitektura* [Russian Journal of Building Construction and Architecture], no. 4(44), pp. 169—176 (in Russian).
- Kirchherr J., Reike D., Hekkert M. (2017) Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 127, pp. 221—232. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.

Kostarev S. N., Sereda T. G. (2006) Design of a combinational automaton for assessing the safety of a hazard source. *Vestnik PNIPU* [Bulletin of PNIPU], 2016, no. 4, pp. 77—87 (in Russian).

Makarov G.V., Sleserev M.Yu. (2006) Using of fuzzy sets in expert systems of ecological monitoring. *Ekologicheskie sistemy i pribory* [Ecological Systems and Devices], no. 2, pp. 39—45 (in Russian).

Pilipenko O. V., Bakaeva N. V., Gordon V. A., Natarova A. Yu. (2017) Quantitative of ecological safety of objects real estate evaluation based on the “green building” concept. *Bi-osferная sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii* [Biospheric compatibility: human, region, technologies], no. 4, pp. 44—58 (in Russian).

Suzdaleva A. L. (2020) Ecological globalistics and sustainable development at the stage of technogenic transformation of the biosphere. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya* [Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology], no. 1, pp. 6—11 (in Russian).

Telichenko V. I., Slesarev M. Yu. (2018) “Green” standardization of technologies for forming the nature-friendly living environment. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering], vol. 13, no. 5(116), pp. 558—567 (in Russian). DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.558-567.

Tskhovrebov E. S., Velichko E. G. (2017) Theoretical provisions of formation of methodology for creation of complex system of construction waste treatment. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering], vol. 12, no. 1, pp. 83—93 (in Russian). DOI: 10.22227/1997-0935.2017.1.83-93.

Tskhovrebov E.S. (1994) *Okhrana okruzhayushchei sredy na zbeleznodorozhbnom transporte* [Environmental protection in railway transport]. Moscow: Kosmosinform. 354 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 02.06.2022  
Принята в печать 26.07.2022

Received: 02.06.2022  
Accepted for publication: 26.07.2022