

УДК 69:504.064.2:004.942

Н. В. Хроменок, В. И. Теличенко

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

ИНТЕГРИРОВАННАЯ МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИМИ РИСКАМИ В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ ЗДАНИЙ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И КОНЦЕПЦИЯ

Строительство значительно влияет на среду. Раздельное применение оценки жизненного цикла и управления экологическими рисками ограничивает их эффективность. Предлагается концепция интегрированной методики, объединяющей оценку жизненного цикла, вероятностную оценку управления экологическими рисками, многокритериальную оптимизацию и BIM. Методика преодолевает разрыв между детерминированной оценкой воздействий и управлением вероятностными рисками для комплексного управления экологической безопасностью зданий на всех стадиях жизненного цикла.

Ключевые слова: экологическая безопасность, жизненный цикл здания, оценка жизненного цикла, управление экологическими рисками, интегрированная методика, многокритериальная оптимизация, информационное моделирование зданий, устойчивое развитие.

Введение

Строительная отрасль, охватывающая процессы от изысканий и проектирования до возведения, эксплуатации, реконструкции и сноса зданий и сооружений, является одним из ключевых антропогенных факторов, оказывающих многоаспектное и значительное воздействие на окружающую среду. По данным Программы ООН по окружающей среде (UNEP), на здания и их строительство приходится около 39 % мировых выбросов углерода, связанных с энергетикой. Из них 28 % — эксплуатационные выбросы, обусловленные потреблением энергии, необходимой для их отопления, охлаждения и питания, а оставшиеся 11 % — так называемые «воплощенные» выбросы, связанные с производством строительных материалов и непосредственно процессом строительства¹. Нарастающие глобальные экологические вызовы, такие как изменение климата, истощение природных ресурсов, загрязнение водных объектов и почв, потеря биоразнообразия, диктуют острую необходимость кардинального пересмотра подходов к строительной деятельности и ускоренного перехода к принципам устойчивого развития [1, 2].

В этом контексте парадигмы устойчивого развития и экологической безопасности становятся не просто декларативными целями, а необходимыми условиями для трансформации строительной индустрии. Они требуют перехода от фрагментарных и зачастую ретроспективных оценок к комплексному, системному взгляду на здание как на сложный динамический объект, существующий и взаимодействующий с окружающей средой на протяжении всего своего жизненного цикла (ЖЦ) [3, 4]. Эффективное управление экологической безопасностью зданий ставит перед исследователями и практиками двойную задачу: с одной стороны, количественно оценивать потенциальные

¹ UNEP. 2023 Global Status Report for Buildings and Construction. Nairobi. United Nations Environment Programme. 2023. URL: <https://securesustain.org/report/2023-global-status-report-for-buildings-and-construction/>

и фактические экологические воздействия на различных стадиях ЖЦ, а с другой — адекватно управлять сопутствующими неопределенностями и экологическими рисками. Как справедливо отмечается в [5], несмотря на наличие нормативной базы, регламентирующей оценку рисков для снижения негативного воздействия хозяйственной деятельности, методам оценки именно экологического риска в строительстве уделяется недостаточно внимания.

Существующие инструменты, такие как оценка жизненного цикла (ОЖЦ), принципы и структура которой стандартизированы в ГОСТ Р ИСО 14040—2010² и требования к которой изложены в ГОСТ Р ИСО 14044—2010³, и методы управления экологическими рисками (УЭР), общие принципы которого заложены в ГОСТ Р ИСО 31000—2019⁴, внесли значительный вклад в повышение экологической ответственности. Однако их преимущественно раздельное применение в строительной практике имеет фундаментальные ограничения (рис. 1).

Классическая ОЖЦ, являясь мощным инструментом для количественной оценки усредненных экологических воздействий, часто статична, детерминирована (т. е. ориентирована на оценку фиксированного проектного решения без учета динамики изменений во времени) и не всегда способна адекватно отражать вероятностный характер многих экологических рисков и вариативность реальных эксплуатационных условий [6, 7].

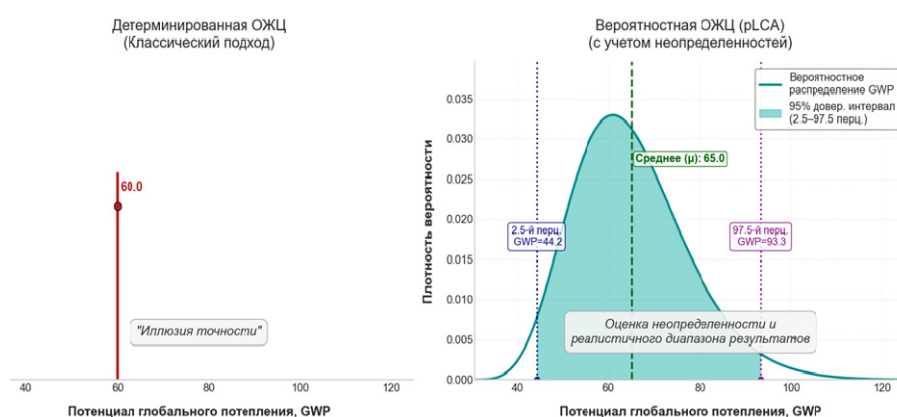


Рис. 1. Ограничения метода ОЖЦ

В то же время подходы к управлению экологическими рисками (УЭР) в строительстве часто остаются фрагментарными, ориентированными на качественные или полуколичественные оценки, и характеризуются слабой формализованной связью с количественными показателями ОЖЦ [8, 9]. При этом, существующие нормативные документы⁵, хотя и описывают техноло-

² ГОСТ Р ИСО 14040—2010. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Принципы и структура. М. : Стандартинформ, 2011. 23 с.

³ ГОСТ Р ИСО 14044—2010. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Требования и руководство. М. : Стандартинформ, 2011. 48 с.

⁴ ГОСТ Р ИСО 31000—2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство. М. : Стандартинформ, 2020. 19 с.

⁵ ГОСТ Р 58771—2019. Менеджмент риска. Технологии оценки риска. М. : Стандартинформ, 2019. 90 с.

гии оценки риска, включая сценарный анализ, не всегда обеспечивают прямую интеграцию с экологическими показателями на протяжении всего ЖЦ объекта (рис. 2) [5].

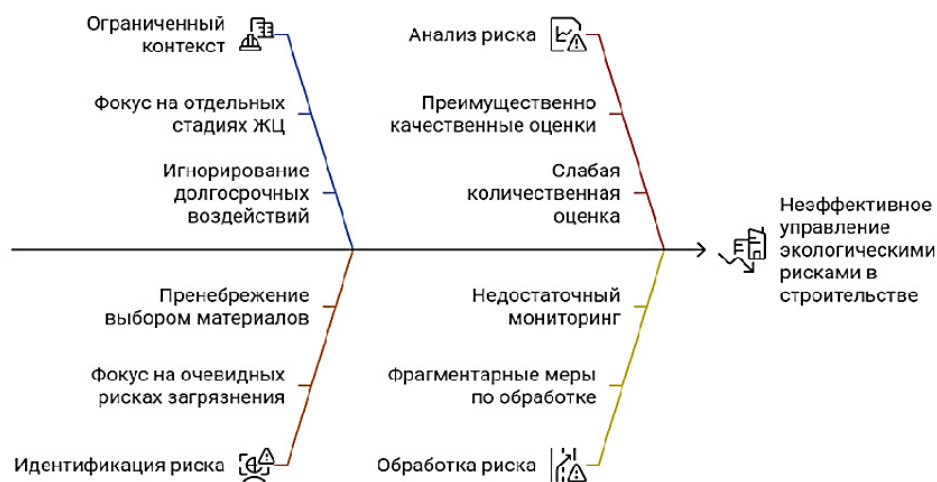


Рис. 2. Ограничения оценки экологических рисков в строительстве

Этот методологический разрыв приводит к тому, что решения, оптимальные с точки зрения минимизации усредненных экологических воздействий, могут оказаться уязвимы к непредвиденным событиям или изменению внешних условий, а стратегии управления рисками могут разрабатываться в отрыве от общей картины экологического следа объекта на протяжении всего ЖЦ. Попытки интеграции ОЖЦ и УЭР, например в рамках концепции ОЖЦ на основе рисков (Risk-Based Life Cycle Assessment, RBLCA) [10, 11], или применение сценарного подхода для оценки экономических последствий рисков [5] зачастую носят концептуальный характер либо сфокусированы на отдельных аспектах, не предлагая комплексных и операционализированных методик для интегрированной количественной оценки и управления именно экологическими рисками зданий с учетом всего спектра воздействий и неопределенностей. Все это обуславливает актуальность разработки интегрированной методики, способной преодолеть указанные ограничения.

Объектом данного исследования является процесс управления экологическими рисками на различных этапах жизненного цикла зданий. *Предметом* — закономерности формирования, методы количественной оценки и управления экологическими рисками зданий, а также интегрированная прогнозно-аналитическая методика.

Целью настоящей работы является представление концепции, структуры и ключевых механизмов взаимодействия компонентов интегрированной методики, направленной на поддержку принятия обоснованных проектных и управленческих решений для минимизации экологических воздействий и рисков на протяжении всего жизненного цикла зданий.

Материалы и методы

Предлагаемая интегрированная методика (рис. 3) основана на последовательном и взаимосвязанном выполнении ряда ключевых этапов, обеспечи-

вающих переход от разрозненных оценок к целостному управлению экологической безопасностью зданий. Центральной идеей является создание единого информационно-аналитического пространства, где данные ОЖЦ и УЭР взаимно дополняют друг друга и служат основой для оптимизационных расчетов с использованием технологий информационного моделирования зданий (BIM). Данный подход опирается на принципы системного анализа, рассматривая объект и связанные с ним экологические аспекты как сложную систему, а также на методологию риск-менеджмента, адаптированную к задачам экологической безопасности в строительстве⁶.



Рис. 3. Концептуальная схема предлагаемой интегрированной методики

Блок 1. Формирование комплексной информационной базы

Данный блок является отправной точкой всего анализа, закладывая информационный фундамент для последующих этапов. Этот этап начинается с детального параметрического описания исследуемого здания, включая его архитектурно-планировочные, конструктивные (с указанием типов материалов и их количественных характеристик) и инженерно-технические характеристики. Особое внимание уделяется сбору инвентаризационных данных (LCI-данных) для всех материалов и процессов, охватывающих полный ЖЦ здания, этапы которого стандартизированы согласно принципам, например, ISO 21930⁷ и европейских EN 15804⁸, оказывающих влияние на формирова-

⁶ ГОСТ Р ИСО 31000—2019.

⁷ ISO 21930:2017. Sustainability in buildings and civil engineering works — Core rules for environmental product declarations of construction products and services. Geneva : International Organization for Standardization, 2017. URL: <https://www.iso.org/standard/61694.html>.

ние и развитие соответствующих национальных стандартов и методик в РФ. При этом используются как общедоступные международные базы данных (Ecoinvent, GaBi, ÖKOBAUDAT), специализированные программные комплексы (OneClickLCA, OpenLCA), так и, при наличии, данные от производителей или региональные базы, с обязательным документированием источников данных, их актуальности и всех сделанных допущений. Определяются также региональные условия эксплуатации, такие как климатические параметры (для базовой оценки могут использоваться данные согласно СП 131.13330⁹, а для углубленного анализа и моделирования рисков — детализированные данные метеорологических наблюдений) и характеристики региональной структуры энергоснабжения, формируется базовый сценарий использования здания.

Критически важным элементом первого блока является задание параметров неопределенности для ключевых входных данных. Как отмечается в [5], «обычный способ включения неопределенности в моделирование заключается в оценке входных значений. Это означает, что сначала необходимо определить распределение вероятностей для каждой неизвестной переменной». Неопределенности в ОЖЦ зданий возникают из множества источников.

Во-первых, это параметрическая неопределенность, связанная с естественной вариативностью свойств самих строительных материалов (например, фактическая теплопроводность утеплителя может отличаться от заявленной в пределах допусков производителя или из-за условий монтажа).

Во-вторых, значительная неопределенность присуща самим LCI-данным, особенно при использовании обобщенных или прокси-данных из международных баз для конкретного регионального контекста (например, различия в технологиях производства цемента, стали, кирпича и транспортных цепочках).

В-третьих, неопределенность может быть связана с параметрами эффективности инженерного оборудования (реальный КПД систем отопления, вентиляции и кондиционирования может отличаться от номинального) или с фактическими условиями эксплуатации (например, поведение пользователей, влияющее на энергопотребление, частота и объем ремонтных работ).

Для каждого идентифицированного неопределенного параметра определяется вероятностное распределение, описывающее диапазон его возможных значений. Выбор типа распределения (нормальное, равномерное, треугольное, логнормальное или иные, исходя из имеющихся данных и экспертных оценок) и его параметров (математическое ожидание, стандартное отклонение, минимальное и максимальное значения, мода) должен быть обоснован. Так нормальное распределение часто применяется для параметров, представляющих собой результат многих независимых случайных процессов или имеющих симметричный разброс вокруг среднего (вариации климатических данных, допуски на размеры и пр.). Равномерное распределение может использоваться, когда известны только границы диапазона значений, но нет

⁸ EN 15804:2012+A2:2019. Sustainability of construction works — Environmental product declarations — Core rules for the product category of construction products. Brussels : European Committee for Standardization, 2019. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/c98127b4-8dc2-48a4-9338-3e1366b16669/en-15804-2012a2-2019>.

⁹ СП 131.13330. СНиП 23-01—99 * Строительная климатология. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/432245/>

информации о наиболее вероятном значении внутри этого диапазона. Треугольное распределение удобно, когда, помимо минимального и максимального значений, можно экспертно оценить наиболее вероятное значение (моду). Источниками информации для такой характеристики служат статистические данные из научных публикаций, техническая документация производителей, данные натурных обследований, показатели неопределенности, иногда предоставляемые в LCI-базах, или, при их отсутствии, обоснованные экспертные оценки. В случаях, когда прямая статистическая информация отсутствует, стратегией является оценка распределения с наивысшей энтропией в соответствии с существующими знаниями [5].

Завершается этот этап формулированием набора специфических сценариев (климатических, деградационных, эксплуатационных, аварийных и др.) [12], которые выходят за рамки обычной параметрической неопределенности и служат для последующей оценки устойчивости проектных решений и формализации экологических рисков. Такой сценарный подход позволяет изучить проблему предупреждения рисков в строительстве и принятия решений в условиях неопределенности [5]. Использование технологий BIM [13] на этом этапе способно значительно автоматизировать процесс сбора и структурирования как детерминированных данных об объекте, так и атрибутов, необходимых для задания неопределенностей и сценариев.

Блок 2. Базовая оценка жизненного цикла

На основе сформированных исходных данных выполняется базовая ОЖЦ. Этот этап представляет собой количественный расчет ожидаемых (проектных) экологических показателей здания, таких как потенциал глобального потепления GWP, потенциал разрушения озонового слоя ODP, потребление первичной энергии PEI, потенциал закисления A), потенциал эвтрофикации EP и других релевантных категорий воздействия, рекомендованных, например, в рамках EN 15804 или соответствующих национальных методик. Расчет выполняется для номинальных усредненных условий эксплуатации и характеристик объекта, строго следуя общим принципам и структуре, определенным ГОСТ Р ИСО 14040—2010 и ГОСТ Р ИСО 14044—2010. Полученные на этом этапе детерминированные значения служат эталоном для всех последующих более глубоких анализов устойчивости и рисков проектного решения

Блок 3. Анализ неопределенности и чувствительности

Учитывая, что детерминированные оценки не отражают всей полноты реальной ситуации из-за присущей исходным данным вариативности, методика предусматривает *анализ неопределенности UA* и *чувствительности SA*. Целью этого блока является количественная оценка того, как неизбежные неточности в сборе данных и естественный разброс входных параметров (свойств материалов, LCI-данных, климатических условий и т. д.) транслируются в неопределенность итоговых экологических воздействий. Для этого применяется вероятностная ОЖЦ (pLCA), которая включает многократное выполнение расчетов базовой ОЖЦ с использованием методов стохастического моделирования, таких как метод Монте-Карло (MC) или выборка по методу Латинского гиперкуба (LHS) [14, 15]. Метод MC, как подтверждается многочисленными исследованиями [5, 16, 17], является мощным инструментом для решения сложных инженерных задач со многими случайными величинами и позволяет оценивать вклад неопределенности в модели [5]. На каж-

дой итерации значения для параметров с установленной неопределенностью генерируются в соответствии с заданными для них вероятностными распределениями. В результате формируются эмпирические вероятностные распределения для каждого выходного экологического показателя, что позволяет оценить не только их средние значения, но и стандартные отклонения, доверительные интервалы и общую форму распределения.

Для понимания источников этой неопределенности и выявления наиболее критичных факторов, влияющих на разброс результатов, проводится глобальный анализ чувствительности, например методом Соболя [18] или другими методами, основанными на дисперсии. Этот метод позволяет количественно оценить и ранжировать входные параметры по степени их индивидуального и совместного вклада в общую дисперсию выходных показателей, тем самым указывая на приоритетные направления для уточнения данных или разработки мер по снижению неопределенности.

Блок 4. Оценка влияния отклонений и внешних сценариев (формализация риска)

Параллельно с анализом параметрической неопределенности, для оценки устойчивости проектного решения к специфическим, потенциально значимым изменениям и событиям, методика включает *оценку влияния отклонений и внешних сценариев*. На этом этапе моделируется изменение экологических показателей здания при реализации ранее определенных и параметризованных сценариев (например, различные сценарии изменения климата, основанные на признанных международных прогнозах [12]; сценарии ускоренной деградации материалов, основанные на исследованиях долговечности или отраслевых данных; отклонения от проектных режимов эксплуатации; изменения в структуре энергоснабжения, прогнозируемые на основе национальных или региональных энергетических стратегий; сценарии, связанные с отказами оборудования или чрезвычайными ситуациями природного и техногенного характера). Такой сценарный анализ соответствует подходам, изложенным в ГОСТ Р 58771—2019. Для каждого сценария выполняется детерминированный расчет ОЖЦ, вычисляется абсолютное отклонение полученных показателей от базовых (проектных) значений. *Экологический риск* в рамках данной методики *формализуется как мера потенциального ухудшения (максимального положительного отклонения) ключевых экологических показателей ОЖЦ при реализации наиболее неблагоприятных из рассмотренных сценариев или сочетаний сценариев*. Этот подход к оценке риска, фокусирующийся на отклонениях от ожидаемых показателей, дополняет классические подходы к управлению рисками, описанные, например, в ГОСТ Р ИСО 31000—2019. Результатом этого блока является вектор экологических рисков, количественно характеризующий уязвимость проектного решения к конкретным идентифицированным угрозам.

Блок 5. Многокритериальная оптимизация

Обладая комплексной информацией о базовых экологических воздействиях, их вероятностных характеристиках, чувствительности к различным факторам и количественно оцененных экологических рисках, методика переходит к этапу проактивного формирования улучшенных проектных решений посредством многокритериальной оптимизации (МСО). На этом этапе формулируется сложная оптимизационная задача, целью которой является одновременная минимизация

ция нескольких, часто конфликтующих, целевых функций. Эти функции включают как базовые экологические показатели (например, GWPbase, PEIbase), так и формализованные показатели экологического риска (например, RiskGWP, RiskPEI), а также потенциально — экономические показатели, такие как затраты ЖЦ (LCC). Управляемыми переменными, которые варьируются в процессе оптимизации, выступают ключевые архитектурно-конструктивные и инженерные параметры здания (толщина и тип теплоизоляции, тип светопрозрачных конструкций, выбор материалов с различными экологическими характеристиками, наличие и эффективность инженерных систем и систем возобновляемой энергетики и т. д.), соответствующие, например, вариантам, предусмотренным при проектировании или анализе альтернатив. Учитывая нелинейность и многокритериальность задачи, для ее решения применяются современные эволюционные алгоритмы (NSGA-II, NSGA-III) [19, 20] или другие методы многоцелевой оптимизации, способные эффективно находить не единственное оптимальное решение, а целое множество Парето-оптимальных решений [21, 22]. Каждое решение в этом множестве представляет собой наилучший возможный компромисс между всеми рассматриваемыми экологическими целями, предоставляя проектировщику и лицу, принимающему решение, всер научно обоснованных альтернатив для выбора (рис. 4).

Блок 6. Визуализация и поддержка принятия решений

Завершающим и критически важным для практического применения этапом методики является визуализация и поддержка принятия решений, включая интеграцию с BIM. На этом этапе комплексные и многомерные результаты всех предыдущих аналитических блоков представляются в наглядной, интуитивно понятной и удобной для интерпретации форме.

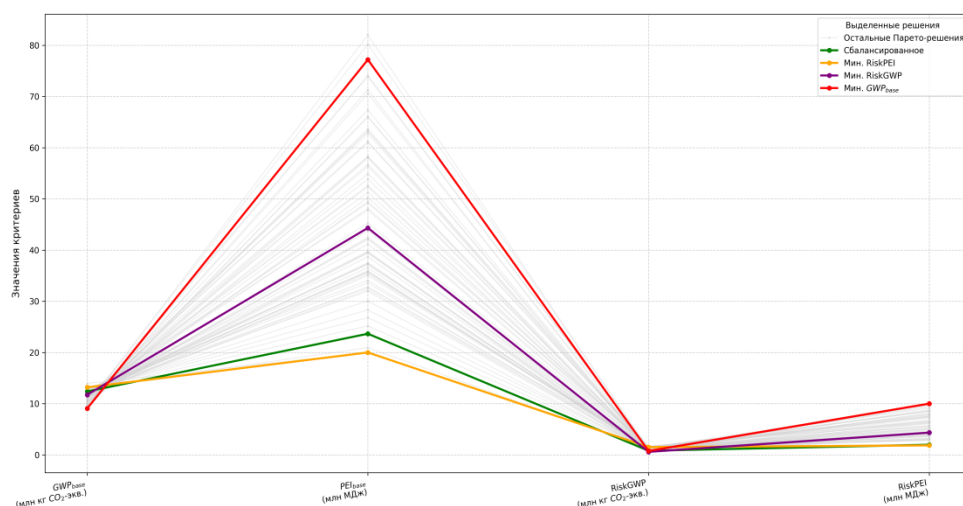


Рис. 4. Фронт Парето на диаграмме параллельных координат

Это включает построение разнообразных графиков и диаграмм: распределения вкладов различных элементов и процессов в базовую ОЖЦ, гистограммы и кривые плотности вероятности для результатов анализа неопределенности, диаграммы индексов чувствительности, сравнительные диаграммы

влияния различных сценариев, а также визуализацию фронта Парето с помощью диаграмм рассеяния или параллельных координат. Такая визуализация помогает лицам, принимающим решения, оценить компромиссы и выбрать наиболее предпочтительный вариант с учетом их приоритетов. Важнейшую роль в повышении эффективности и практичности всего процесса играет интеграция с технологиями BIM [13]. BIM-платформы могут использоваться не только для автоматизированного сбора исходных данных об объекте [23, 24], но и для параметрического изменения модели в ходе оптимизации, а также для наглядной визуализации экологических характеристик, зон риска и оптимальных конфигураций непосредственно на 3D-модели здания¹⁰ [25, 26], облегчая процесс выбора окончательного проектного решения и его согласования со всеми заинтересованными сторонами.

Таким образом, предлагаемая последовательность аналитических блоков и методов обеспечивает всесторонний, количественно обоснованный и риск-ориентированный подход к управлению экологической безопасностью зданий, согласующийся с принципами устойчивого развития [1] и современными требованиями к экологическому менеджменту

Результаты

Представленная концепция интегрированной методологии управления экологическими рисками в ЖЦ зданий приводит к следующим ключевым теоретическим и методологическим результатам, формирующим основу для нового, более комплексного подхода к обеспечению экологической безопасности в строительстве:

1. Разработана структурированная методологическая основа, определяющая четкую последовательность аналитических блоков и предлагающая набор взаимосвязанных инструментов и моделей. Эти компоненты, включая детальную ОЖЦ, вероятностный анализ неопределенности pLCA и чувствительности SA с использованием стохастических методов, сценарный анализ влияния отклонений и внешних условий, а также многокритериальную оптимизацию, в своей совокупности формируют единый, всесторонний и операционализированный подход к анализу и управлению экологической безопасностью зданий. Тем самым теоретически обоснована и показана возможность эффективной интеграции детерминированных оценок базовых экологических воздействий с вероятностными оценками рисков их отклонения в рамках единой системы, что позволяет преодолеть ограничения раздельного применения данных подходов.

2. Предложена и теоретически обоснована специфическая формализация понятия экологического риска в контексте ОЖЦ. В отличие от традиционных подходов, часто фокусирующихся на вероятности аварийных ситуаций или качественных оценках¹¹ [4], разработанная концепция определяет экологический риск как количественно измеримую меру потенциального отклонения (ухудшения) стандартных показателей ОЖЦ (GWP, ODP, PEI, AP, EP и др.)¹² под влиянием прогнозируемых неблагоприятных сценариев (изменения кли-

¹⁰ ГОСТ Р ИСО 14001—2016. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению. М. : Стандартинформ, 2017. 35 с.

¹¹ ГОСТ Р ИСО 31000—2019.

¹² EN 15804:2012+A2:2019.

мата, ускоренной деградации материалов, неэффективной эксплуатации, изменений в источниках энергии и др.). Такой подход позволяет напрямую связать задачи управления рисками с целями по снижению общего экологического следа здания и количественно оценивать устойчивость проектных решений к различным типам угроз.

3. Теоретически обосновано применение методов многокритериальной оптимизации для целенаправленного поиска и достижения баланса между различными, часто конфликтующими, экологическими целями и критериями эффективности. Показано, что задача выбора оптимального с экологической точки зрения проектного решения по своей природе является многокритериальной, где минимизация базовых воздействий ОЖЦ и минимизация формализованных экологических рисков выступают важными, но не всегда совпадающими, критериями. Использование современных эволюционных алгоритмов МСО (например, NSGA-II, NSGA-III) [19, 20] в рамках предложенной методики позволяет находить множество Парето-оптимальных решений, составляющих наилучшие достижимые компромиссы и предоставляющих проектировщику и другим заинтересованным сторонам веер обоснованных альтернатив для принятия информированных решений.

4. Выявлены и описаны ключевые точки и механизмы интеграции разработанной методики с технологиями BIM [13]. Определено, что BIM может служить не только источником точных и структурированных данных для ОЖЦ и анализа рисков (Блок 1), но и платформой для параметрического моделирования и перебора альтернатив в процессе оптимизации (Блок 5), а также инструментом для наглядной визуализации комплексных результатов анализа (Блок 6) непосредственно на 3D-модели объекта. Такая интеграция способна значительно повысить эффективность, точность и практическую применимость предлагаемого подхода в реальных проектных процессах, способствуя лучшему пониманию и распространению результатов.

Следствием изложенного является формулирование *научной гипотезы* о том, что применение разработанной интегрированной методики позволит существенно повысить информативность, объективность и качество принимаемых проектных и управленческих решений в области экологической безопасности зданий. Лица, принимающие решения, получают доступ к более полной картине экологических аспектов здания, включая вероятностные характеристики воздействий, понимание ключевых факторов неопределенности и количественно оцененных рисков, а также набор оптимальных с точки зрения экологического компромисса решений. Это, в свою очередь, будет способствовать выбору более экологически устойчивых и предсказуемых в долгосрочной перспективе проектных решений для зданий и сооружений, соответствующих целям устойчивого развития строительной отрасли [2].

Обсуждение

Представленная в настоящей работе интегрированная методология управления экологическими рисками в жизненном цикле зданий является попыткой преодолеть существующий методологический разрыв между традиционными подходами к оценке экологических воздействий и управлению рисками в строительной отрасли. Как было показано во введении, классическая ОЖЦ, несмотря на свою неоспоримую ценность как инструмента количественной оценки усредненных экологических воздействий

(ГОСТ Р ИСО 14040—2010, ГОСТ Р ИСО 14044—2010), по своей природе статична и детерминирована. Это ограничивает ее способность адекватно отражать динамику процессов, присущую жизненному циклу зданий неопределенность и, что особенно важно, вероятностный характер многих экологических рисков [6, 7]. С другой стороны, существующие подходы к УЭР в строительстве, хотя и основаны на общих принципах риск-менеджмента (ГОСТ Р ИСО 31000—2019), часто остаются фрагментарными, опираются на качественные или полуколичественные оценки и характеризуются слабой интеграцией с количественными показателями ОЖЦ [5, 8, 9]. Это приводит к ситуации, когда решения по минимизации среднего экологического следа могут оказаться неустойчивыми к реальным условиям эксплуатации и внешним изменениям, а стратегии управления рисками разрабатываются без должного учета их влияния на общий экологический профиль объекта.

Концепции, направленные на интеграцию ОЖЦ и УЭР, такие как ОЖЦ на основе рисков (RBLCA) [10, 11], а также развитие инструментов для учета неопределенности, например вероятностной ОЖЦ (pLCA) [14, 15], безусловно, являются важными шагами в правильном направлении. Однако многие из существующих концептуальных разработок RBLCA не предлагают достаточно детализированных и операционализированных методик для комплексной количественной оценки и управления широким спектром экологических рисков именно для зданий, особенно в части формализации последствий рисков в терминах стандартных категорий воздействия ОЖЦ. В свою очередь, pLCA, являясь мощным инструментом для анализа параметрической неопределенности, как правило, не моделирует дискретные рисковые события (аварии, отказы, экстремальные воздействия) и их специфические экологические последствия, а также традиционно не включает механизмы активного поиска оптимальных решений с учетом этих рисков.

Предлагаемая авторами интегрированная методика стремится развить эти идеи, опираясь на комплексный и операционализированный подход. Ключевым отличием и научной новизной является не просто суммирование отдельных инструментов, а их синергетическое объединение в единую логическую структуру, где:

- детализированная ОЖЦ служит основой для количественной оценки базовых воздействий;
- строгий вероятностный анализ неопределенности и чувствительности (pLCA и SA), в частности с применением методов МС [5, 16, 17] и Соболя [18], позволяет оценить устойчивость базовых результатов и выявить ключевые факторы вариативности;
- формализованный сценарный анализ (ГОСТ Р 58771—2019) и предложенная количественная оценка экологического риска (как потенциального отклонения показателей ОЖЦ под влиянием неблагоприятных сценариев) позволяют выразить экологические последствия рисков в тех же стандартизированных единицах, что и базовые воздействия, обеспечивая их прямую сопоставимость и интегрируемость в дальнейший анализ;
- применение методов МСО [14, 15] дает возможность целенаправленного поиска Парето-оптимальных проектных решений [12, 13], сбалансированных по критериям минимизации как базовых экологических воздействий,

так и формализованных экологических рисков. Это позволяет перейти от пассивной оценки к активному, риск-ориентированному проектированию экологически безопасных и устойчивых зданий;

- обоснование интеграции с технологиями BIM [13] на всех этапах, от сбора данных [23, 24] до визуализации и поддержки принятия решений¹³ [25, 26], значительно повышает практическую применимость и эффективность методики в современных условиях проектирования.

Такой комплексный подход позволяет не только получить более реалистичную и многогранную оценку экологической результативности и безопасности зданий, но и предоставляет проектировщикам и лицам, принимающим решения, инструмент для активного управления этими характеристиками. Вместо того чтобы рассматривать воздействия и риски изолированно, методика позволяет анализировать их взаимосвязи и искать решения, оптимальные по совокупности критериев. Например, можно выявить ситуации, когда решение, наилучшее с точки зрения минимизации среднего GWP, оказывается слишком уязвимым к риску его значительного увеличения при определенных сценариях и наоборот.

Практическая значимость предложенной теоретической конструкции заключается в формировании научно-методической основы для разработки инструментов, способных предоставлять более точную и реалистичную информацию для принятия решений в области проектирования и эксплуатации экологически безопасных зданий. Методика позволяет перейти от простого декларирования экологических характеристик к их обоснованному прогнозированию и управлению с учетом неопределенностей и рисков, что особенно важно в контексте ужесточения экологических требований и стремления к достижению целей устойчивого развития [2].

Однако необходимо признать и потенциальные ограничения и вызовы, связанные с реализацией предлагаемой методики.

Во-первых, ее применение требует значительно больших объемов исходных данных по сравнению с традиционной ОЖЦ, включая вероятностные характеристики для неопределенных параметров и данные для параметризации сценариев рисков. Сбор и верификация таких данных, особенно для российских условий, где национальные LCI-базы и базы данных по вероятностям отказов или последствиям экологических инцидентов в строительстве все еще находятся на стадии активного развития и наполнения, представляет собой серьезную задачу. Как отмечается в [5], одной из трудностей применения метода MC для обеспечения экологической безопасности является определение исходного типа распределения.

Во-вторых, реализация всех блоков методики, особенно стохастического моделирования и многокритериальной оптимизации, требует значительных вычислительных ресурсов и специализированного программного обеспечения.

В-третьих, интерпретация многомерных результатов, таких как фронты Парето, и выбор окончательного решения из множества оптимальных альтернатив требуют от лиц, принимающих решения, определенной подготовки и понимания компромиссного характера таких задач. Наконец, успешная интеграция с BIM-технологиями зависит от решения вопросов интероперабель-

¹³ ГОСТ Р ИСО 14001—2016.

ности данных, стандартизации форматов обмена и необходимого уровня детализации (LOD/LOI) информационных моделей.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на преодоление этих вызовов, включая разработку и пополнение регионально-специфичных баз данных (LCI-данных, параметров неопределенности, характеристик рисков сценариев), создание удобных программных инструментов, реализующих предложенную методику, и разработку практических руководств по ее применению для различных типов зданий и проектных задач. Также перспективным направлением является исследование возможностей применения методов искусственного интеллекта и машинного обучения для обработки больших объемов данных и автоматизации некоторых этапов анализа в рамках предложенной методики, что согласуется с современными тенденциями в исследованиях жизненного цикла объектов [2].

В целом, предложенная интегрированная методология представляет собой шаг вперед в развитии инструментов для обеспечения экологической безопасности и устойчивости зданий, предлагая более целостный, количественно обоснованный и риск-ориентированный подход к принятию проектных и управленческих решений.

Заключение

Представлены теоретико-методологические основы и концептуальная структура интегрированной методики управления экологическими рисками в ЖЦ зданий. Обоснована необходимость такого комплексного подхода, обусловленная ограничениями традиционных методов ОЖЦ и УЭР при их изолированном применении. Предложенная методика, основанная на синергетическом объединении детализированной ОЖЦ, вероятностного анализа неопределенности и чувствительности, сценарного анализа рисков с их количественной оценкой в терминах показателей ОЖЦ, и многокритериальной оптимизации, с обоснованной потенциальной интеграцией с BIM-технологиями, представляет собой научно обоснованный инструмент для комплексной оценки и проактивного управления экологической безопасностью зданий на всех этапах их существования.

Разработанный подход позволяет не только количественно оценивать базовые экологические воздействия и связанные с ними риски отклонений под влиянием различных неблагоприятных факторов и сценариев, но и целенаправленно искать Парето-оптимальные проектные решения, сбалансированные по критериям минимизации как усредненных воздействий, так и потенциальных экологических последствий рисков. Это создает предпосылки для перехода к проектированию и эксплуатации зданий с повышенной экологической устойчивостью и предсказуемостью на протяжении всего ЖЦ, что вносит вклад в достижение целей устойчивого развития строительной отрасли [2] и соответствует современным требованиям к экологической ответственности¹⁴.

Дальнейшие исследования будут направлены на практическую апробацию и валидацию методики на конкретных объектах, разработку специализированного программного инструментария, включающего удобные интерфейсы для ввода данных и визуализации результатов, и формирование детальных

¹⁴ ГОСТ Р ИСО 14001—2016.

практических рекомендаций для участников инвестиционно-строительного процесса. Особое внимание будет уделено адаптации методики к различным типам зданий и региональным условиям, а также исследованию возможностей ее интеграции с существующими системами экологического менеджмента и сертификации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kibert C. J. Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery. Hoboken, NJ. John Wiley & Sons, 2016.
2. Теличенко В. И., Ланидус А. А., Слесарев М. Ю., Али М. М. Методы управления жизненным циклом объектов капитального строительства с учетом влияния экологических и других видов рисков // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 2. С. 166—177. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.2.166-177.
3. Finnveden G., Hauschild M. Z., Ekvall T. Recent developments in Life Cycle Assessment // Journal of Environmental Management. 2009. Vol. 91. Iss. 1. Pp. 1—21. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.06.018.
4. Anand C. K., Amor B. Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 67. Pp. 408—416. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.050.
5. Смирнова Е. Э., Слесарев М. Ю., Мозаффару М. А. Сценарный подход к оценке рисков для обеспечения экологической безопасности в строительстве // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 2(51). С. 173—187.
6. Guinée J. B. Handbook on life cycle assessment: Operational guide to the ISO standards. Dordrecht. Kluwer Academic Publishers, 2002. DOI: 10.1007/0-306-48055-7.
7. Pizzol M., Weidema B. P., Brandão M., Osset P. How to address uncertainty in life cycle assessment: A critical review // Journal of Cleaner Production. 2015. Vol. 86. Pp. 96—105. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.08.019.
8. Baloi D. Environmental risk management in construction projects: A literature review // Procedia Engineering. 2013. Vol. 57. Pp. 113—120. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.017.
9. Zou P. X. W., Zhang G., Wang J. Understanding the key risks in construction projects in China // International Journal of Project Management. 2007. Vol. 25. Iss. 6. Pp. 601—614. DOI: 10.1016/j.ijproman.2007.03.001.
10. Ren J., Liang H., Dong L. Life cycle-based risk assessment: A comprehensive and systematic methodology // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 166. Pp. 848—859. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.099.
11. Prado-Lopez V., Kalbusch A., Van der Vorst R. Integrating risk assessment into Life Cycle Assessment: A case study of generic E. coli O157:H7 in lettuce // Science of The Total Environment. 2014. Vol. 470—471. Pp. 1290—1298. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.08.012.
12. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge. Cambridge University Press, 2021.
13. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. Hoboken, NJ. John Wiley & Sons, 2011.
14. Groen E. A., Heijungs R., Bokkers E. A. M., De Boer I. J. M. Methods for uncertainty propagation in life cycle assessment // Environmental Modelling & Software. 2014. Vol. 62. Pp. 316—325. DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.09.001.
15. Fantke P., Friedrich R., Jolliet O. Health impact and damage cost assessment of pesticide use in Europe in Life Cycle Impact Assessment // The International Journal of Life Cycle Assessment. 2015. Vol. 20. Iss. 4. Pp. 578—588. DOI: 10.1007/s11367-015-0853-5.
16. Fathi-Vajargah B., Hassanzadeh Z. A new Monte Carlo method for solving system of linear algebraic equations // Computational Methods for Differential Equations. 2021. Vol. 9. Iss. 1. Pp. 159—179.
17. Rashki M. The soft Monte Carlo method // Applied Mathematical Modelling. 2021. Vol. 94. Pp. 558—575. DOI: 10.1016/j.apm.2021.01.022.
18. Saltelli A., Ratto M., Andres T. Global Sensitivity Analysis: The Primer. Chichester, NJ. John Wiley & Sons, 2008.

19. *Deb K., Jain H.* An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point based non-dominated sorting approach: P. II: Handling constraints and extending to an adaptive approach // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2014. Vol. 18. Iss. 4. Pp. 602—622. DOI: 10.1109/TEVC.2013.2281534.
20. *Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T.* A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2002. Vol. 6. Iss. 2. Pp. 182—197. DOI: 10.1109/4235.996017.
21. *Zavadskas E. K., Turskis Z., Kildienė S.* State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods // Technological and Economic Development of Economy. 2014. Vol. 20. Iss. 1. Pp. 165—179. DOI: 10.3846/20294913.2014.892037.
22. *Лукманова И. Г., Емельянов С. Г.* Оптимизация проектных решений в строительстве с учетом экологической безопасности // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 7. С. 85—91.
23. *Santos R., Costa A. A., Grilo A., Silvestre J. D.* BIM-based Life Cycle Assessment: An overview // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 101. Pp. 314—325. DOI: 10.1016/j.rser.2018.11.013.
24. *Volk R., Stengel J., Schultmann F.* Building Information Modeling (BIM) for existing buildings—Literature review and future needs // Automation in Construction. 2014. Vol. 38. Pp. 109—127. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.10.023.
25. *Antón L. Á., Díaz J.* Integration of LCA and BIM for sustainable construction // Procedia Engineering. 2014. Vol. 85. Pp. 2—8.
26. *Peng C.* A new framework for integrating Building Information Modeling (BIM) and Life Cycle Assessment (LCA) // Sustainability. 2016. Vol. 8. Iss. 10. Pp. 1019. DOI: 10.3390/su8101019.

© Хроменок Н. В., Теличенко В. И., 2025

Поступила в редакцию
27.06.2025

Ссылка для цитирования:

Хроменок Н. В., Теличенко В. И. Интегрированная методика управления экологическими рисками в жизненном цикле зданий: теоретические основы и концепция // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2025. Вып. 3(100). С. 169—184. DOI: 10.35211/18154360_2025_3_169.

Об авторах:

Хроменок Никита Вадимович — аспирант каф. строительства объектов тепловой и атомной энергетики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ). Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; Nekt8543@mail.ru; SPIN-код: 4514-6961

Теличенко Валерий Иванович — акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., проф. каф. строительства объектов тепловой и атомной энергетики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Российская Федерация, 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; president@mgsu.ru

Nikita V. Khromenok, Valery I. Telichenko

National Research Moscow State University of Civil Engineering

INTEGRATED METHODOLOGY FOR ENVIRONMENTAL RISK MANAGEMENT IN THE LIFE CYCLE OF BUILDINGS: THEORETICAL FOUNDATIONS AND CONCEPT

Construction significantly affects the environment. The separate application of life cycle assessment and environmental risk management limits their effectiveness. The concept of an integrated methodology combining life cycle assessment, probabilistic assessment of environmental risk management, multi-criteria optimization and BIM is proposed. The methodology bridges the gap between deterministic impact assessment and probabilistic risk management for integrated environmental safety management of buildings at all stages of the life cycle.

Key words: environmental safety, building life cycle, life cycle assessment, environmental risk management, integrated methodology, multi-criteria optimization, building information modeling, sustainable development.

For citation:

Khromenok N. V., Telichenko V. I. [Integrated methodology for environmental risk management in the life cycle of buildings: theoretical foundations and concept]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2025, iss. 3, pp. 169—184. DOI: 10.35211/18154360_2025_3_169.

About authors:

Nikita V. Khromenok — Postgraduate Student, National Research Moscow State University of Civil Engineering. 26, Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Nekt8543@mail.ru; ORCID: 0000-0002-0960-3639

Valery I. Telichenko — Doctor of Engineering Sciences, Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering. 26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; president@mgsu.ru; ORCID: 0000-0001-7669-713X