

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 504.06:504.61:69.003

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1797-1823

Метод оценки риска для организации экологической безопасности в сфере жилищного и промышленного строительства

Аркадий Николаевич Ларионов¹, Елена Эдуардовна Смирнова²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрен метод оценки риска с целью обоснования экологической безопасности строительства. Разработка данной темы продиктована необходимостью устойчивого развития строительного сектора, предотвращения загрязнения окружающей среды и повышения качества жизни населения. Несмотря на то, что правовой системой накоплен достаточный объем документов, регламентирующих цели и задачи предотвращения негативного воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду, а также повышения экологической эффективности компаний, методы оценки экологического риска (ЭР) в строительстве развиты слабо.

Материалы и методы. Изучены подходы к оценке ЭР в условиях неопределенности. Перед авторами стояла задача найти оптимальное распределение ресурсов, направленных на снижение вероятности возникновения ЭР, и средств на предотвращение возможного ущерба окружающей среде, а также проанализировать и сопоставить методы определения величины риска при проектировании и строительстве объектов. Основная цель — провести исследование по формированию законченного алгоритма и методики использования сценариев риска по обеспечению экологической безопасности строительства. Объект исследования — риск-ориентированные подходы для обеспечения экологической безопасности строительных проектов. Предмет исследования — применение методов оценки риска в области экологической безопасности. Предлагается концепция необходимости использования методов для снижения ЭР строительных проектов.

Результаты. Разработан новый метод, соединивший в себе количественную оценку ЭР, основанную на теории вероятностей, полуколичественный подход с использованием матриц рисков, и качественный — на основе оценки вероятности наступления и размера ущерба для каждого сценария. Разработанный метод оценки ЭР позволяет повысить эффективность управления экологической безопасностью в сфере строительства.

Выводы. Подчеркивается значимость сценарного подхода как одного из наиболее эффективных методов оценки ЭР, который позволяет учесть возможные варианты развития событий и оценить их последствия. Необходимо разработать более точное определение ЭР в строительстве при формулировании экологических мероприятий и оценке соответствия их выполнения (возможна разработка аналога японской системы экологической оценки строительства CASBEE).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: методы оценки экологического риска, оценка риска, строительство, экологическая безопасность, экологический риск, экологические требования

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ларионов А.Н., Смирнова Е.Э. Метод оценки риска для организации экологической безопасности в сфере жилищного и промышленного строительства // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 11. С. 1797–1823. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1797-1823

Автор, ответственный за переписку: Аркадий Николаевич Ларионов, proflarionov@mail.ru.

Risk assessment method for the organization of environmental safety in the sphere of residential and industrial construction

Arkadiy N. Larionov¹, Elena E. Smirnova²

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

² Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The risk assessment method for the justification of environmental safety in construction is considered. The development of this topic is dictated by the need for sustainable development of the construction sector, prevention of en-

vironmental pollution, and improvement of the quality of life of the population. Despite the fact that the legal system has accumulated a sufficient volume of documents regulating the goals and objectives of preventing the negative impact of economic activity on the environment, as well as increasing the environmental efficiency of companies, methods for assessing environmental risk in construction are poorly developed.

Materials and methods. The authors studied approaches for environmental risk assessment under conditions of uncertainty. The authors faced the task to find the optimal distribution of funds aimed at reducing the probability of occurrence of environmental risk, and funds for preventing possible environmental damage, as well as to analyze and compare methods for determining the amount of risk during the design and construction of facilities. The main goal was to conduct research on the formation of a complete algorithm and methodology for using risk scenarios to ensure environmental safety in construction. The object of the study was risk-oriented approaches to ensuring the environmental safety of construction projects. The subject was the application of risk assessment methods in the field of environmental safety. The concept of the need to use methods for reducing the environmental risk of construction projects is proposed.

Results. A new method is developed that combines quantitative assessment of environmental risk based on probability theory, semi-quantitative approach with risk matrices, and qualitative assessment based on the assessment of the probability of occurrence and the size of damage for each scenario. The developed method for assessing environmental risk can improve the efficiency of environmental safety management in the construction industry.

Conclusions. The significance of the scenario approach as one of the most effective methods for assessing environmental risk is emphasized, which allows taking into account possible scenarios of events and assess their consequences. It is necessary to develop a more accurate definition of environmental risk in construction when formulating environmental measures and assessing their compliance (it is possible to improve an analogue of the Japanese CASBEE ecological assessment system in construction).

KEYWORDS: methods for assessing environmental risk, risk assessment, construction, environmental safety, environmental risk, environmental requirements

FOR CITATION: Larionov A.N., Smirnova E.E. Risk assessment method for the organization of environmental safety in the sphere of residential and industrial construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(11):1797-1823. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1797-1823 (rus.).

Corresponding author: Arkadiy N. Larionov, proflarionov@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Экологическая безопасность жилищного и промышленного строительства является одной из важнейших задач устойчивого развития страны. Неконтролируемое воздействие строительства на окружающую среду приводит к ее загрязнению, истощению природных ресурсов, а также снижению качества жизни населения. Ежегодно на строительные работы приходится около 27 % всех выбросов, а на углерод, содержащийся в четырех строительных материалах — цементе, железе, стали и алюминии, — еще 15 %. В сумме — около 42 % ежегодных глобальных выбросов CO_2 ¹. Ожидается, что в период до 2030 г. воплощенный углерод будет отвечать за большую часть выбросов углекислого газа, связанных с глобальными новыми зданиями и инфраструктурой [1].

К наиболее распространенным видам негативного воздействия строительства на окружающую среду относятся:

- загрязнение атмосферного воздуха выбросами от строительной техники и оборудования. Концентрации мелких твердых частиц $\text{PM}_{2,5}$ опасны для сердечно-легочной системы человека. Элементарный углерод (ЕС), как один из компонентов их состава, служит следствием бесконтрольных выбросов дизельных двигателей. Повышенные концентрации органического углерода обусловлены отсутствием эффективных правил по выбросам летучих органических соединений (ЛОС) для стационарных источ-

ников и сокращению выбросов ЛОС транспортными средствами и строительной техникой [2]. Строительная техника и оборудование производят более 60 % выбросов загрязняющих веществ (ЗВ); на горение топлива на строительных площадках приходится около 20 %; на сжигание строительного мусора — около 10 %. Из-за отсутствия модернизации старых генераторов и обновления экскаваторного парка на строительный сектор приходится 34 % общих выбросов мелких частиц PM_{10} [3]. Основные ЗВ, выбрасываемые в атмосферный воздух от строительной деятельности, — оксиды азота (NO_x); оксиды углерода (CO_x); сернистый ангидрид (SO_2); пыль; бенз(а)пирен (В(а)Р). Выбросы оксидов азота и оксидов углерода приводят к ухудшению здоровья людей, страдающих сердечно-сосудистыми и бронхолегочными заболеваниями, пыль вызывает респираторные заболевания, бенз(а)пирен — онкологические;

- загрязнение поверхностных и грунтовых вод строительными отходами. В 2017–2020 гг. за экологическими компенсациями обратились 110 компаний, что составило чуть более десятой доли процента от числа «стрессоров» загрязнения, имевших право обратиться за этой льготой. Анализ Счетной палаты в 2021 г. показал, что из 180 тыс. компаний, плативших за негативное воздействие на экосистемы, лишь 226 достигли нулевого коэффициента за объем и массу ЗВ в результате внедрения наилучших доступных технологий на объектах. В 2023 г., по данным Реестра ОНВОС (объекты негативного воздействия на окружающую среду) Росприроднадзора, 10 компаний с самым большим количеством объектов первой категории опасности оказывали негативное воздей-

¹ Total annual global CO_2 emissions direct & indirect energy & process emissions (36.3 GT) // Architecture 2030. URL: <https://www.architecture2030.org/why-the-built-environment>

ствие на окружающую среду: АО «Самарнефтегаз», ООО «РИТЭК», ПАО «Сургутнефтегаз», ПАО «НК Русснефть», ООО «Лукойл-Коми», ООО «ННК – Самарнефтегаз», ООО «Газпром Добыча Краснодар», АО «Белкамнефть», АО «Томскнефть ВЛК», АО «Газпромнефть-ННГ»²;

- загрязнение почв отходами строительства. В России в 2021 г. образовано 96,3 млн т отходов строительства и сноса зданий. По данным Минприроды, ежегодно в России на переработку отправляется лишь менее четверти объема образованных строительных отходов. Наибольший объем отходов строительства и сноса зданий образовался в 2021 г. по категории «Отходы подготовки строительного участка, разборки и сноса зданий». На втором месте — «Отходы строительства зданий, сооружений». Тенденция к росту отходов и трудноустраняемых потерь материалов только сохранится [4];

- разрушение естественных ландшафтов и сокращение биоразнообразия. В 2022 г. в результате строительства и эксплуатации предприятий были нарушены сотни тысяч гектаров естественных ландшафтов. Даже в таких отдаленных северных территориях России, как Таймыр, сформировались природно-техногенные геохимические аномалии с высоким содержанием Ni, Cu, Cr, Co в почвах. От негативного воздействия концерна «Норникель» (Талнахский на Таймыре и забайкальский Озерный горно-обогатительные комбинаты) обнаружены арсенидные геохимические аномалии с высоким валовым содержанием мышьяка в почвах. Выбросы серы норильского гиганта достигают Канады. На «Норникель» производится около 10 % от всех выбросов ЗВ в России. В 2021 г. компания произвела 18,5 млн т отходов, в том числе 11,5 млн т твердых и 5,5 млн т жидких отходов. По данным Росприроднадзора, в 2021 г. «Норникель» сбросил в реки и озера Забайкальского края 1,3 млрд м³ загрязненных сточных вод³. Еще раньше в 2020 г. в Норильске произошла крупнейшая техногенная авария на Севере, в результате которой в р. Амбарную и о. Пясино (уже давно ставшие местом промышленных стоков), и далее в Карское море попали более 21 тыс. т дизельного топлива [5]. Основными ЗВ, которые корпорация сбрасывает в воду, являются тяжелые металлы, кислоты,

щелочи и другие загрязняющие вещества. Норильск был признан самым грязным городом в Арктике [6]. На депрессивных территориях «Норникеля» наблюдается длительное снижение показателей качества окружающей среды [7].

Для предотвращения негативного воздействия строительства на окружающую среду необходимо разрабатывать и внедрять эффективные методы оценки экологического риска (ЭР). Оценка ЭР позволяет определить вероятность возникновения негативного воздействия строительства на окружающую среду и его возможные последствия, а затем принять обоснованные решения о выборе строительных технологий, материалов и методов эксплуатации зданий и сооружений.

В настоящее время в России накоплен достаточный объем нормативно-правовой базы, регламентирующей цели и задачи предотвращения негативного воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду, а также повышения экологической эффективности компаний. Однако методы по оценке ЭР в строительстве развиты слабо.

Экологический риск — это вероятность отрицательных изменений или отдаленных неблагоприятных их последствий, возникших вследствие негативного воздействия на окружающую среду. Поскольку объект воздействия — многообразная природная среда и ее отдельные сложные компоненты, прогнозирование отрицательных последствий и оценка их масштабов весьма затруднены. Тем не менее эколого-ориентированный подход рассматривается как императив любой строительной деятельности. Региональный строительный комплекс в современных условиях должен формироваться не на стремлении получить ограниченные преимущества и выгоды хозяйствующими субъектами, но на долговременных принципах устойчивого развития и строительства ради качества жизни. Перспективы современного строительного комплекса зависят исключительно от экологического императива. «Зеленое» строительство как результат обеспечения экологической безопасности строительной деятельности на всех этапах жизненного цикла объекта снижает углеродный след и тем самым негативное воздействие на окружающую среду, способствуя здоровью и работоспособности населения [8].

Специалисты различают следующие виды ЭР, связанных со строительной деятельностью: природно-экологический, технико-экологический, риск устойчивых техногенных воздействий, риск катастрофических воздействий, социально-экологический, эколого-нормативный, эколого-политический, экономико-экологический [9]. Как видно, ЭР связаны с широким спектром потенциальных потерь, допустимых в различных сферах деятельности. Особенно опасны ЭР с отложенными последствиями, своего рода локальные экологические сдвиги, которые проявляются не сразу, а через некоторое время. Они также имеют глобальные последствия, затрагивающие

² В начале года власти скрыли статистику выбросов вредных веществ от промышленных объектов по всей стране. Нам удалось достать эти данные. Рассказываем, кто отвечает за грязный воздух в России. 25 августа 2023 // Если быть точным. URL: <https://tochno.st/materials/v-nachale-goda-vlasti-skryli-statistiku-vrednykh-vybrosov-ot-promyshlennykh-obektov-po-vsey-strane-nam-udalos-dostat-eti-dannye-rasskazyvaem-kto-otvechaet-za-gryaznyy-vozdukh-v-rossii?ysclid=lq6mxpmfz4975415570> (дата обращения: 16.12.2023).

³ Росприроднадзор. Отчет Росприроднадзора о состоянии окружающей среды в Российской Федерации в 2022 году. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2022/

не только локальную территорию, но и целые регионы. По мнению Е.В. Шубиной и др. (2009), на этапе эксплуатации с точки зрения экологической безопасности важно производить расчет устойчивости функционирования строительного объекта определенного назначения в условиях природно-техногенных систем. Оценка ЭР на этапе эксплуатации объекта должна включать технологический аспект функционирования воздействующих на окружающую среду систем этого здания. Использование методов оценки риска носит прогностический эффект, позволяет учитывать эффект потенцирования воздействий на окружающую среду, динамику изменения экологических факторов, способность строительных систем к самоподдержанию и саморегулированию.

Экологический риск часто сопоставляют с экономическим. Причиненный предприятием вред окружающей среде не приемлем с нормативной точки зрения. Предприятие-нарушитель должно поступиться полученным доходом и подвергнуться экономическим санкциям или штрафам. Этот отрицательный смысл (опасность недополучения прибыли) приписывается ЭР. Как полагают некоторые авторы, его контекст ограничен экологическим менеджментом в процессе идентификации рисков на предприятии [10]. Важно отметить, что ЭР недостаточно рассматривать только в контексте экономических потерь. Загрязнение окружающей среды может привести к более серьезным последствиям, таким как ухудшение здоровья населения, снижение биоразнообразия и изменение климата.

При оценке ЭР необходимо учитывать ряд особенностей его проявления: характер объекта воздействия (природные ресурсы, экосистемы, здоровье человека и т.д.); характер воздействия (загрязнение, истощение, разрушение и т.д.); масштаб воздействия (локальный, региональный, глобальный); степень вероятности воздействия (высокая, средняя, низкая); степень тяжести последствий воздействия (высокая, средняя, низкая). Следует отметить, что понятие ЭР далеко выходит за рамки простого нанесения ущерба окружающей среде и здоровью населения. Если нарушена экологическая безопасность в любой сфере хозяйственной деятельности, включая строительную, то тем самым поставлены под вопрос условия существования всего живого. Важно учитывать фундаментальную значимость второго биогеохимического закона В.И. Вернадского [11]. Требуется непосредственное или опосредованное участие живых организмов для того, чтобы произошел обмен химических элементов в биосфере; иначе говоря, их земная миграция в целом происходит при помощи «живого вещества». Видовое многообразие живого не просто исчезает. Под воздействием строительных технологий трансформируется и повреждается его структура. Д. Мидоуз и др. (2006), авторы компьютерного моделирования экспоненциального роста экономики и населения при ограниченности ресур-

сов, подчеркивают, что без существенных изменений в потреблении природных ресурсов в ближайшем будущем неизбежно произойдут катастрофические изменения. Реакцией экосистем на нерациональное природопользование и антропогенное давление стало отсутствие экологического резерва для равновесного и устойчивого развития [12].

Таким образом, хотя экологический риск и экономический взаимосвязаны (загрязнение окружающей среды чревато экономическими потерями, а также другими негативными последствиями, такими как ухудшение здоровья населения, снижение качества жизни и т.д.), тем не менее по сравнению с экономико-финансовым риском экологический затрагивает ценность человеческой жизни совершенно по-другому, как бы предупреждая: если потери окружающей среды приобретут необратимый и негативный характер, то этот сдвиг экологического равновесия грозит повсеместной угрозой существованию человечества как вида [13]. Вопрос не стоит об идеальном равновесном состоянии, но о том, сможет ли природа после возможного монотонного или скачкообразного нарушения экосистемного баланса вернуться на исходный уровень безопасности. Первостепенную важность приобретает учет оставшегося экологического резерва ради устойчивого развития.

В последние годы в России и за рубежом опубликован ряд работ, посвященных вопросам оценки ЭР в сфере жилищного и промышленного строительства. В этих работах исследуются различные методы оценки ЭР [14–17].

К количественным методам оценки ЭР относятся методы, основанные на использовании математических моделей для расчета вероятности возникновения негативного воздействия и его возможных последствий. К полуколичественным — методы, основанные на использовании экспертных оценок для определения вероятности возникновения негативного воздействия и его возможных последствий. К качественным — методы, базирующиеся на описании возможных сценариев негативного воздействия и его последствий (анализ «дерева событий», анализ вида и последствий отказа, анализ опасности и работоспособности и др.).

В большинстве работ, посвященных оценке ЭР в строительстве, рассматриваются методы количественной оценки риска [18, 19]. Однако последние требуют значительных затрат времени и ресурсов, а также наличия достоверной исходной информации. В связи с этим в последние годы наблюдается тенденция к развитию полуколичественных и качественных методов оценки ЭР [20–22].

Риск неотделим от неопределенности. Суть технического прогресса связана с переходом к среде с меньшим значением неопределенности. Свести ее к минимуму, нивелировать воздействие неопределенности на природно-техническую систему и преодолеть ее — такова цель управленческого контроля. Отсюда риском

называется деятельность, осуществляемая под знаком неопределенности и альтернативности с целью выбрать оптимальный вариант действий и сопряженная с вероятностью наименьшего ущерба. Уметь избегать неоправданного риска — таков идеал лица, ответственного за принятие решения. Для него правомерная величина риска при достижении цели заключается в том, что уровень потерь не превышал достигнутый результат [23].

Однако величина риска, будучи связана с ожидаемым ущербом и вероятностью того, что ущерб на самом деле будет иметь место, не может быть каждый раз правомерной: момент стохастичности отменить нельзя. Если критерии рискованного решения будут основаны на достижении поставленной задачи, отличаться непротиворечивостью нормативным актам, следовать современным научно-техническим требованиям, направлены на борьбу с риском потерь и рисковыми последствиями, то такого рода стремление не проиграть превратит риск в спускаемые сверху директивы. Произойдет фактическая девальвация риска. В последнем случае не может быть и речи о результативности и конкурентоспособности в строительстве.

Очевидно, что в ситуации риска на первый план выходит корреляция вероятных потерь и значимости конечного результата и выигрыша. Обычные оперативные природоохранные мероприятия, прописанные в российских стандартах, не могут привести к снижению производственных затрат и выходу компаний на международный уровень экономии средств и ресурсов. Бессмысленно считать риск приемлемым, если не принять во внимание его сочетание с сопутствующими затратами и выгодами [24]. Процедурой измерения неопределенности, или вычислением приемлемого риска, предполагается именно сценарный подход. Предлагаемое исследование посвящено разработке и применению методов количественной и полуквантитативной оценки ЭР в сфере жилищного и промышленного строительства. Перед авторами стояла задача найти оптимальное распределение средств, направленных на снижение вероятности возникновения ЭР, и средств на предотвращение возможного ущерба окружающей среде, а также проанализировать и сопоставить методы определения величины риска при проектировании и строительстве объектов. Основная цель — провести исследование по формированию законченного алгоритма и методики использования сценариев риска по обеспечению экологической безопасности строительства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оценка риска рассматривается как комплексная задача, включающая несколько этапов. На первом этапе применяются количественный подход. Авторы обращаются к исследованию модели риска как сочетания изучаемого фактора опасности и последствий от причиненного ущерба. Важно выявить все

возможные опасности, связанные с деятельностью строительной организации. Дилемма по снижению вероятности возникновения опасного события состоит в следующем: 1) либо сосредоточить внимание на риске в виде затрат на систему технической безопасности, и тогда вероятность аварии будет близка к нулю; 2) либо направить средства на предотвращение ожидаемого ущерба (страхование, создание SPV и т.д.), и тогда вероятность аварии, наоборот, будет стремиться к единице.

Чтобы разрешить проблему, предварительно были проанализированы понятия и методы, представленные в стандартах по оценке риска. Найденный в них алгоритм имеет вид: идентификация опасностей (выявление и описание опасностей, связанных с деятельностью компании); оценка рисков (определение величины риска, связанного с каждой опасностью); оценка приемлемости риска (определение того, является ли риск допустимым или нет); управление рисками (принятие мер по снижению рисков до приемлемого уровня). Данный алгоритм позволяет количественно определять риск и причиненный ущерб. Однако при строительстве необходимо учитывать многомерный характер воздействия на компоненты окружающей среды [25]. Концептуальный подход к безопасности, прописанный в ряде стандартов (например, ГОСТ Р 14.09–2005), излишне абстрактен, для того чтобы рационально оценить ЭР, в некоторых случаях несопоставимые линейно. В результате остается непонятным, какой риск считается допустимым.

На этапах оценки риска (величины риска, связанного с каждой опасностью) возникает необходимость в анализе неопределенности и ее последствий. Типизация неопределенности помогает принимать более обоснованные решения в условиях риска, оценивать вероятность возникновения негативных событий в строительстве. Неопределенность является ключевым условием для понимания риска. К анализу был привлечен ряд других стандартов по оценке риска (например, ГОСТ Р ИСО 14001–2016). В них риск рассматривается как влияние неопределенности, влияние выражается в отклонении от ожидаемого результата, а значит, к непредвиденным обстоятельствам. В рамках данного контекста можно количественно рассчитать оптимальное распределение средств. Авторы используют формулу минимизации рисков с контролируемыми параметрами для дальнейшего стохастического моделирования процессов и создают на ее основе специфическую методологию оценки ЭР строительных проектов. Далее алгоритм расчета минимальных значений риска выполнялся с помощью метода Монте-Карло. Данная процедура позволяет понять, что вероятность аварии уменьшается экспоненциально с увеличением значения случайной величины, а ожидаемый ущерб от аварии уменьшается линейно с ее увеличением.

На втором этапе оценка риска проводится с учетом главных аспектов негативного воздействия строительной организации на окружающую среду [26]. Для учета нелинейности риска применяется полуколичественный подход, техника которого также разработана в официальных документах по оценке риска. Задача авторов заключалась в том, чтобы показать преимущества определения риска как сочетания вероятности и тяжести события для характеристики экологического вмешательства. Полуколичественный подход, как более востребованный среди аналитиков, облегчает задачу разработки соответствующих мероприятий по обеспечению снижения рисков на соответствие требованиям стандартов до приемлемого уровня.

На третьем этапе оценки риска рассматривается сценарный подход как наиболее достоверный в определении того, является ли ЭР риск допустимым или нет. Для каждого сценария идентифицируется его описание si , вероятность его наступления pi и последствия, которые могут быть причинены в случае его реализации xi . Вместе с тем он позволяет оценивать риски и в количественном выражении, что упрощает их сопоставление и принятие решений по управлению рисками. Метод дает возможность определить вероятностный диапазон изменений явления при наиболее неудачных или наиболее успешных изменениях внутренних или внешних параметров. Таким образом, основная идея данного исследования состоит в том, чтобы дополнить применение вышеупомянутых методов сценарным подходом, а также изучить проблему предупреждения ЭР в сфере жилищного и промышленного строительства и принятия решений в условиях неопределенности, связанной с этими событиями.

Для формирования законченного алгоритма, связанного с управлением рисками с помощью сценарного подхода, авторы использовали методы нивелирования опасности, снижения частоты возникновения опасности, увеличения времени до наступления опасности, снижения тяжести последствий опасности, уменьшения времени до наступления последствий опасности, уменьшения вероятности наступления последствий опасности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Количественный подход

Экологическое законодательство (например, Федеральный закон от 10.01.2022 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды») обязывает принимать обоснованные решения, связанные с осуществлением хозяйственной и иной деятельности путем устранения возможных негативных воздействий, экологических последствий, разработкой мер по сокращению и предотвращению стихийных бедствий и чрезвычайных ситуаций. В ГОСТ Р 58771–2019 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска» указано, что на этапах оценки риска возникает не-

обходимость в анализе неопределенности и ее последствий. В документе представлены виды неопределенности, поскольку она является неотъемлемой частью строительной практики. В любой ситуации есть вероятность возникновения событий, которые могут повлиять на планы и цели строительства. Неопределенность может иметь как положительные, так и отрицательные последствия. С одной стороны, она может создавать новые возможности и стимулировать инновации. С другой стороны, она может привести к финансовым потерям, травмам или даже гибели людей. Неопределенность может быть сложной и трудной для понимания. Часто невозможно точно предсказать события будущего. Таким образом, понимание неопределенности позволяет принимать более обоснованные решения в условиях риска, оценивать вероятность возникновения негативных событий и их возможные последствия, разрабатывать меры по снижению рисков и повышению устойчивости к непредвиденным обстоятельствам.

Неопределенность — ключевое условие для понимания риска. Уменьшение неопределенности приводит к снижению риска. Например, если предприятие, строящее новый объект в районе, подверженном землетрясениям, проведет исследование сейсмической активности в этом районе, это позволит снизить неопределенность относительно вероятности землетрясения и, соответственно, снизить риск. Очевидно, что вероятность не охватывает все аспекты проблемы экологической безопасности.

В ГОСТ Р 51897–2002 «Менеджмент риска. Термины и определения», анализирующем термины и понятия менеджмента риска, под «риском» понимается сочетание (т.е. произведение) вероятности P события A и его последствий S . Термин «риск» приводится, когда существует возможность негативных последствий (результатов события A). Под «вероятностью» в контексте ЭР понимается мера того, что неблагоприятное событие, связанное с окружающей средой, может произойти. Например, при рассмотрении вероятности загрязнения подземных вод в результате утечки химических веществ с промышленного предприятия вероятность P утечки химических веществ в течение года и вероятность отсутствия утечки $Q = 1 - P(A)$ являются характеристиками вероятности появления экологической проблемы в определенный период. Если, согласно данным анализа рисков, вероятность P утечки в течение года составляет 0,05 (5 %), то вероятность того, что утечки не произойдет в течение следующих пяти лет, составит:

$$P(A) = Q^5 = 0,95^5 = 0,77 \%. \quad (1)$$

Следовательно, вероятность того, что утечка произойдет хотя бы раз в течение пяти лет:

$$P(A) = 1 - Q^5 = 1 - 0,77 = 0,23 \%. \quad (2)$$

Этот вывод может быть проверен статистически. В нашем примере вероятность возникновения

хотя бы одной утечки химических веществ в течение пяти лет составила 23 %. Из этого следует, что вероятность $P(A)$, связанная с событием A , может быть оценена для данного интервала времени, т.е. в рамках специфического набора обстоятельств, при которых происходит явление. Важно понимать, что это упрощенная модель, демонстрирующая принципы оценки ЭР. В реальности, статистический анализ данных о прошлых утечках на аналогичных предприятиях, состоянии оборудования на конкретном объекте, эффективности применяемых мер безопасности и геологических факторах местности может подтвердить или скорректировать полученную вероятность. Иначе говоря, оценка риска всегда связана с определенными условиями и временными рамками. Изменение условий, например внедрение новых технологий безопасности, повышение квалификации персонала или изменение климата, существенно влияет на вероятность возникновения экологической проблемы.

Согласно ГОСТ Р 50779.10–2000 (ИСО 3534-1–93) «Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения», вероятность P есть действительное число в интервале от 0 до 1, относящееся к случайному событию A . Число может отражать относительную частоту в серии наблюдений или степень уверенности в том, что некоторое событие произойдет. Для высокой степени уверенности вероятность близка к единице.

Анализ риска. Анализ «риск есть сочетание...» включен в международные стандарты ISO 9000:2005 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь» (обновленная версия ISO 9000:2015 и ее аналог ГОСТ Р ИСО 9000–2015) (пункт 3.4.5) и ISO 14001:2004 «Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению» (обновленная версия ISO 14001:2015 и ее аналог ГОСТ Р ИСО 14001–2016) (пункт 3.20). В них подчеркивается, что применение статистических методов помогает измерять, описывать, анализировать, интерпретировать и моделировать изменчивость (случайность) событий даже при относительно ограниченном количестве данных, т.е. в условиях неопределенности. Статистический анализ таких данных может помочь лучше понять природу, масштаб и причины изменчивости, способствуя решению и даже предупреждению проблем, а также постоянному улучшению качества. Отсюда система экологического менеджмента должна учитывать риски в контексте неопределенности, а также возможности для оценки результатов деятельности и постоянного улучшения экологической безопасности [27].

Важные разъяснения относительно риска даны в обновленной версии ISO 14001:2015 (2021). В ней утверждается, что риск — это влияние неопределенности (uncertainty, U). Влияние выражается в отклонении от ожидаемого результата — позитивном или негативном. Акцент делается на том, что неопределенность — это состояние, связанное с недостат-

ком информации, понимания или знания о событии, его последствиях и вероятности, и характеризующееся разбросом значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине.

Экспоненциальное распределение для оценки случайных независимых событий. Значительную часть экологических рисков составляют случайные события, т.е. события, время и место наступления которых заранее неизвестны. К таким событиям относятся, например, аварии на предприятиях химической промышленности, разливы нефти, лесные пожары, вызванные человеческим фактором. Для описания и прогнозирования таких событий в рамках оценки ЭР часто используется модель случайных событий. Один из наиболее распространенных подходов к описанию и оценке случайных событий — модель Пуассона. Она основана на следующих предположениях:

- независимость событий: каждое событие происходит независимо от других событий, иначе говоря, наступление одного события никак не влияет на вероятность наступления других событий;
- стационарность процесса: вероятность наступления события в определенный момент времени не зависит от того, что происходило до этого, т.е. интенсивность потока событий (среднее количество событий в единицу времени) остается постоянной.

Оптимальная формула зависит от конкретной ситуации. Если точность расчетов имеет первостепенное значение, рассчитать вероятность возникновения N негативных событий можно по формуле, которая является общим выражением для модели Пуассона и дает точный результат для любой величины N :

$$P(N, t) = \frac{(\lambda t)^N}{N!} \cdot \exp(-\lambda t), \quad (3)$$

где N — количество событий, которое мы хотим рассчитать, вероятность; t — рассматриваемый период времени; λ — интенсивность потока событий (событий за единицу времени); $N!$ — факториал N , который учитывает количество способов, при которых N событий могут произойти в течение времени t .

Используя рекурсивное отношение, запишем формулу в виде:

$$P(N, t) = \frac{(\lambda t)}{N} \cdot P(N-1, t) \quad (4)$$

при $n = 0, 1, 2 \dots; \lambda \cdot t > 0$,

где $P(N, t)$ — вероятность возникновения N негативных событий за период времени t ; t — рассматриваемый период времени; λ — интенсивность потока, т.е. количество негативных событий (N) за единицу времени (например, за год), в данном случае 1 событие за год; $P(N-1, t)$ — вероятность того, что за время t произойдет ровно $N-1$ событий.

Начальное условие: сначала с помощью экспоненциальной функции $\exp(-\lambda t)$ вычисляем вероятность $P(0, t)$ того, что за время t не произойдет ни одного

события. Рекурсивный шаг: после того, как вычислили $P(0, t)$, используем формулу (3) для вычисления вероятности $P(N, t)$ того, что за время t произойдет ровно N событий. Повторяем шаг 2, пока не вычислим вероятность $P(N, t)$ для всех необходимых значений.

Контекст и пример. Здесь следует пояснить контекст формулы (4). Негативное событие (N) — конкретное событие, которое оказывает отрицательное воздействие на окружающую среду и увеличивает экологический риск; n — случайная величина, которая принимает значения от 1 и выше. Предположим, необходимо оценить риск загрязнения водоема в результате строительства промышленного объекта. Негативным событием (N) выступает сброс неочищенных сточных вод, а случайной величиной (n) — количество сбросов неочищенных сточных вод за год. Проанализировав исторические данные о подобных авариях, определяем, что среднее количество сбросов неочищенных сточных вод в год λ составляет 1. Это достаточное условие, чтобы говорить о наличии экологического риска. Рассчитаем вероятность возникновения хотя бы одного сброса. Чем выше вероятность возникновения большого количества сбросов (n), тем выше ЭР. С помощью формулы (4) найдем вероятность возникновения N сбросов за год.

Начальное условие: $P(0, t) = \exp(-\lambda t) = \exp(-1) \approx 0,3679$ (вероятность того, что за год не произойдет ни одного сброса неочищенных сточных вод). Теперь можно вычислить вероятности возникновения различного числа сбросов:

$$\begin{aligned} P(1, t) &= (\lambda t / N) \cdot P(0, t) = (1/1) \cdot 0,3679 = \\ &= 0,3679 \text{ (вероятность 1 сброса);} \\ P(2, t) &= (\lambda t / N) \cdot P(1, t) = (1/2) \cdot 0,3679 = \\ &= 0,18395 \text{ (вероятность 2 сбросов);} \\ P(3, t) &= (\lambda t / N) \cdot P(2, t) = (1/3) \cdot 0,18395 = \\ &= 0,06132 \text{ (вероятность 3 сбросов).} \end{aligned} \quad (5)$$

Продолжая этот процесс, вычисляются вероятности возникновения большего числа сбросов. Из этих расчетов видно, что при интенсивности потока $\lambda = 1$ наиболее вероятным является scenario с одним сбросом (вероятность около 36,8 %). Вероятности возникновения двух и более сбросов уменьшаются с увеличением числа сбросов.

Факторы, влияющие на риск. Дилемма состоит в следующем: 1) либо сосредоточить внимание на риске в виде затрат на наилучшие доступные технологии и систему технической безопасности B , и тогда вероятность аварии будет близка к 0; 2) либо — на управлении ущербом, связанным с аварией (страхование, создание special purpose vehicle, SPV и т.д.), и тогда вероятность аварии, наоборот, будет стремиться к 1. Следующая формула описывает вероятность аварии:

$$P(C) = P(A) \cdot P(-B|A), \quad (6)$$

где $P(C)$ — вероятность аварии; $P(A)$ — вероятность возникновения опасного события; $P(-B|A)$ — вероятность того, что опасное событие не будет предот-

вращено, при условии, что оно уже произошло. Это фактически и есть вероятность аварии, учитывая, что опасное событие уже случилось.

Предположим, что событие B всегда происходит, т.е. система безопасности всегда срабатывает и предотвращает аварию, тогда вероятность аварии будет равна вероятности возникновения опасного события:

$$P(C) = P(A), \quad (7)$$

если событие B всегда происходит.

Это означает, что усилия сосредоточены на риске и приняты меры по снижению вероятности возникновения опасного события. Если предположить, что событие B никогда не происходит, т.е. система безопасности никогда не срабатывает и не предотвращает аварию, то вероятность аварии будет равна 1:

$$P(C) = 1 - P(B), \quad (8)$$

если событие B никогда не происходит.

Данное выражение означает, что внимание сконцентрировано на ожидаемом ущербе и меры направлены на предотвращение ущерба от аварии. Ясно, что это предположение является крайне упрощенным. Формула не учитывает другие факторы, которые могут влиять на вероятность аварии, такие как человеческий фактор, внешние условия и т.д. В реальных системах всегда есть некоторая вероятность ложных срабатываний или пропусков. Конкретный подход, который выберет компания, зависит от ее целей и ресурсов. Но если компания стремится к минимизации риска, то она должна сконцентрироваться на мерах по предотвращению ущерба.

Пример расчета экологического риска. Формула (9) описывает вероятность того, что случайная величина, характеризующая опасное событие, примет определенное значение X :

$$P(A = X) = \exp(-\alpha \cdot X), \quad (9)$$

где α — частота аварий.

X представляет собой величину опасного события, достаточного для аварии, например, это могут быть вредные выбросы в атмосферу. Коэффициент α определяет скорость уменьшения вероятности возникновения опасного события: чем эффективнее системы безопасности, тем меньше вероятность того, что опасное событие произойдет.

Возьмем случай с концентрацией пыли на стройплощадке. Рассмотрим два сценария с разными значениями α : сценарий 1 ($\alpha = 0,2$) и сценарий 2 ($\alpha = 0,5$). Предположим, что благодаря более эффективным системам пылеподавления или в силу погодных условий скорость убывания вероятности выше. Сравним вероятности превышения допустимого уровня (5 мг/м³) для разных значений A (табл. 1).

Важно понимать, при большем значении α (сценарий 2) вероятность превышения допустимого уровня уменьшается быстрее с ростом концентрации пыли. Даже небольшое увеличение концентрации ЗВ приводит к значительному снижению вероятности превышения допустимых уровней. Более эффективными мерами (большее α) мы «сдвигаем» кривую

Табл. 1. Сравнение вероятности превышения допустимого уровня для разных значений A

Table 1. Comparison of the probability of exceeding the permissible level for different values of A

X , мг/м ³ mg/m ³	$P(A)$ ($\alpha = 0,2$)	$P(A)$ ($\alpha = 0,5$)	Вероятность превышения, % ($\alpha = 0,2$) Probability of exceedance, % ($\alpha = 0,2$)	Вероятность превышения, % ($\alpha = 0,5$) Probability of exceedance, % ($\alpha = 0,5$)
4	0,45	0,14	55	86
5	0,37	0,07	63	93
6	0,30	0,03	70	97

распределения влево, т.е. для любого конкретного значения X (концентрации загрязняющего вещества) вероятность превышения допустимого уровня становится ниже, чем при менее эффективных мерах (меньшее α). Однако данный подход к оценке вероятности имеет ограничения. При увеличении X вероятность превышения допустимого уровня все равно растет, но этот рост происходит медленнее при более эффективных мерах, которые не гарантируют полную защиту от превышения ПДК (рис. 1).

График на рис. 1, a показывает, как вероятность возникновения опасного события $P(A)$ зависит от концентрации пыли X и эффективности системы безопасности α . График на рис. 1, b фокусируется на вероятности превышения допустимого уровня концентрации, что является более практичным показателем с точки зрения безопасности.

Как видно, при $\alpha = 0,2$ увеличение концентрации с 4 до 5 мг/м³ приводит к увеличению вероятности превышения допустимого уровня с 55 до 63 % (рост на 8 %); при $\alpha = 0,5$ то же самое увеличение концентрации повышает вероятность с 86 до 93 % (рост на 7 %). Таким образом, хотя вероятность превышения все равно растет с увеличением концентрации, эффективные меры (большее α) делают этот

рост медленнее, и система становится более устойчивой к колебаниям концентрации ЗВ.

Модель оптимального распределения ресурсов. Формула (10) описывает вероятность того, что событие B не приведет к ущербу (т.е. $1 - P(B)$), как обратную функцию от величины этого события:

$$C(B) = \frac{b}{Y}, \quad (10)$$

где b — период (время), в течение которого были выделены средства на снижение ущерба.

В данном случае Y представляет собой величину события, которое направлено на предотвращение ущерба от аварии, например страховые выплаты. Константа b определяет величину ущерба, который будет нанесен в случае аварии, если событие B не произойдет. В примере с заводом коэффициент b связан с размером ущерба окружающей среде от ЧС: чем больше размер ущерба, тем меньше вероятность того, что событие B предотвратит урон.

Найдем такое сочетание вероятности опасного события и эффективности системы безопасности, при котором ожидаемый ущерб будет минимальным.

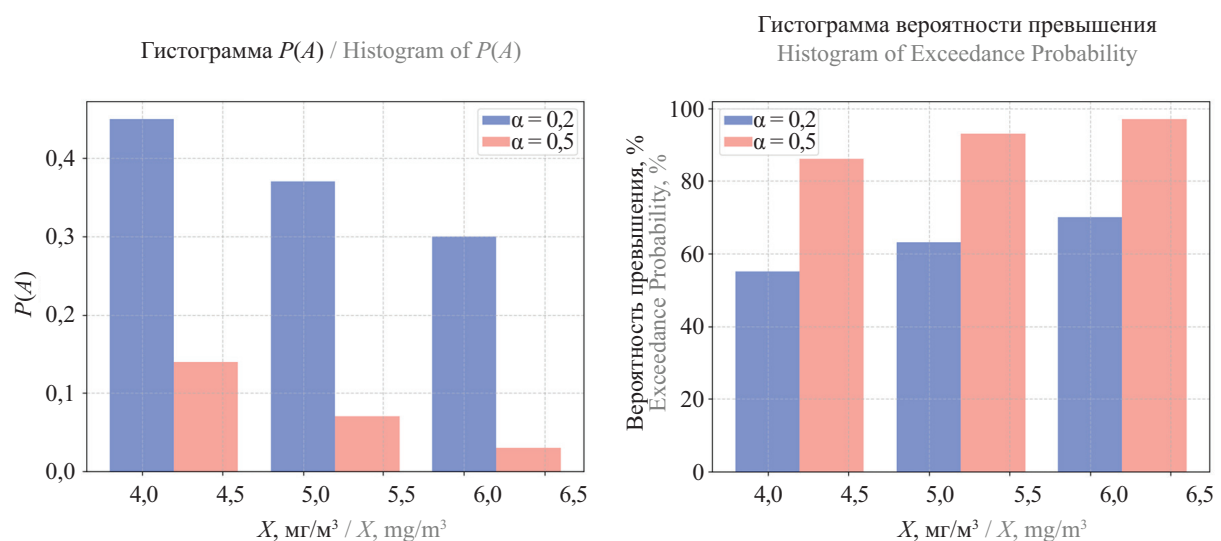


Рис. 1. Сдвиг кривой распределения. При менее эффективных мерах (меньшее α) вероятность превышения снижается медленнее

Fig. 1. Shift of the distribution curve. For less effective measures (smaller α), the probability of exceedance decreases more slowly

С помощью формулы $R = P \cdot C$ рассчитаем оптимальное распределение средств:

$$R(X_{\min}, Y_{\min}) = \min_{\{A, B\}} P(A) \cdot C(B) = \min_{\{A, B\}} \left[\exp(-\alpha \cdot X) \cdot \frac{b}{Y} \right], \quad (11)$$

где $R(X_{\min}, Y_{\min})$ — минимальный ожидаемый ущерб от аварии; $X_{\min}$ — оптимальное значение величины опасного события A ; $Y_{\min}$ — оптимальное значение величины события B ; $P(A)$ — вероятность возникновения опасного события с величиной X , например, $P(A) = \exp(-\alpha \cdot X)$, где α — некоторый параметр; $C(B)$ — величина ущерба от события B в зависимости от затрат на его смягчение Y , например, $C(B) = b/Y$, где b — некоторый параметр.

$R(X_{\min}, Y_{\min})$ указывает на то, что R является функцией двух переменных: $X_{\min}$ и $Y_{\min}$. Другими словами, значение R (минимальный ожидаемый ущерб) зависит как от оптимального значения затрат на предотвращение опасного события ($X_{\min}$), так и от оптимального значения затрат на минимизацию ущерба ($Y_{\min}$). Речь идет о функции, которая вычисляет ожидаемый ущерб в зависимости от сочетания этих двух параметров. Вкладываемые средства (X) направлены на снижение вероятности возникновения опасного события A . Обозначим ее вероятность как $P(A, X)$. Чем больше X , тем меньше $P(A, X)$. Вкладываемые же средства (Y) направлены на уменьшение ущерба от события B . Обозначим величину ущерба как $C(B, Y)$. Чем больше Y , тем меньше $C(B, Y)$. Чтобы найти значение R , нужно подставить в функцию конкретные оптимальные значения $X_{\min}$ и $Y_{\min}$, которые, в свою очередь, найдены в результате решения задачи оптимизации. Например, $P(A, X) = 1 - k_1 \cdot X$ (вероятность события A линейно убывает с ростом X) и $C(B, Y) = k_2/Y$ (величина ущерба от B обратно пропорциональна Y). В этом случае задача оптимизации будет состоять в минимизации функции: $R(X, Y) = (1 - k_1 \cdot X) \cdot (k_2/Y)$.

Если компания стремится к минимизации риска, то она должна выбрать такое значение $X_{\min}$, при котором вероятность возникновения опасного события будет минимальна. В этом случае значение $Y_{\min}$ будет определяться размерами ущерба от аварии. Если на первом плане будет минимизация ущерба, то следует рассчитать такое значение $Y_{\min}$, при котором ущерб в случае аварии будет минимален, а значение $X_{\min}$ определяться эффективностью систем безопасности.

Расчет оптимальных значений с помощью метода Монте-Карло. Метод Монте-Карло, учитывая случайные факторы, обеспечивает более реалистичное моделирование. Согласно алгоритму расчета $X_{\min}$ и $Y_{\min}$ с помощью данного метода, необходимо выполнить следующие шаги:

1) сгенерировать большое количество случайных значений для величин X и Y по коду: `random_numbers_X = np.random.rand(num_simulations);`

2) для каждого набора случайных значений рассчитать вероятность аварии и ожидаемый ущерб от аварии: $X = 1000 \cdot \text{random_numbers_X}$ (предполагая, что максимальное значение X равно 1000 млн руб.);

3) выбрать значения $X_{\min}$ и $Y_{\min}$, при которых ожидаемый ущерб от аварии будет минимальным. Например, рассмотрим значения коэффициентов $\alpha = 10$ и $b = 10\,000$.

Формулы (12) и (13) для генерации случайных значений для величин X и Y имеют следующий вид:

$$X = \text{round}(\alpha \cdot \text{rand}()); \quad (12)$$

$$Y = \text{round}(b \cdot \text{rand}()), \quad (13)$$

где X — случайная величина, характеризующая исход опасного события A ; Y — случайная величина, связанная с событием B ; α — коэффициент, определяющий экспоненциальный характер зависимости вероятности возникновения опасного события от его величины; b — коэффициент, определяющий величину ущерба в случае аварии.

При $\alpha = 10$ вероятность аварии $P(A)$ падает очень быстро с ростом X , поэтому уже при $X = 10$ она практически равна 0. Чтобы модель была информативна, введем три варианта: плавное убывание $P(A)$ ($\alpha = 0,009$), более плавное ($\alpha = 0,001$) и очень медленное убывание, которое подходит, если аварии крайне опасны, и даже большие затраты не гарантируют их предотвращения ($\alpha = 0,0001$).

Согласно расчетам по формуле (9) и преобразованной (10) как $P(B) = 1 - \exp(-Y/b)$ и формуле $C(A) = P(A) \cdot P(B) = \exp(-\alpha \cdot X) \cdot (1 - \exp(-Y/b))$ как произведении вероятности аварии ($P(A)$) и вероятности наличия ущерба при аварии ($P(B)$), вероятность аварии $P(A)$ экспоненциально убывает с увеличением значения X (затрат на снижение вероятности аварии). Y (средства на предотвращение ущерба) не влияют на $P(A)$. Ожидаемый ущерб от аварии $C(A)$ зависит от обоих параметров X и Y . Увеличение X приводит к снижению $C(A)$, а увеличение Y — к его росту (рис. 2).

График $P(A)$ демонстрирует экспоненциальное убывание вероятности аварии с ростом затрат на предотвращение (X). Это соответствует интуитивному представлению: чем больше инвестируется в безопасность, тем меньше вероятность аварии. Крутизна спада зависит от параметра α . Более крутой спад указывает на более быстрое снижение вероятности аварии при увеличении затрат.

Точечная диаграмма $C(A)$ отражает нелинейную зависимость ожидаемого ущерба от затрат на предотвращение (X). С одной стороны, увеличение X приводит к снижению вероятности аварии, что должно уменьшать ожидаемый ущерб. Однако увеличение Y , направленное на снижение ущерба в случае аварии, может приводить к росту $C(A)$. Это связано с тем, что более высокие затраты на предотвращение ущерба Y могут оправдываться только в случае более

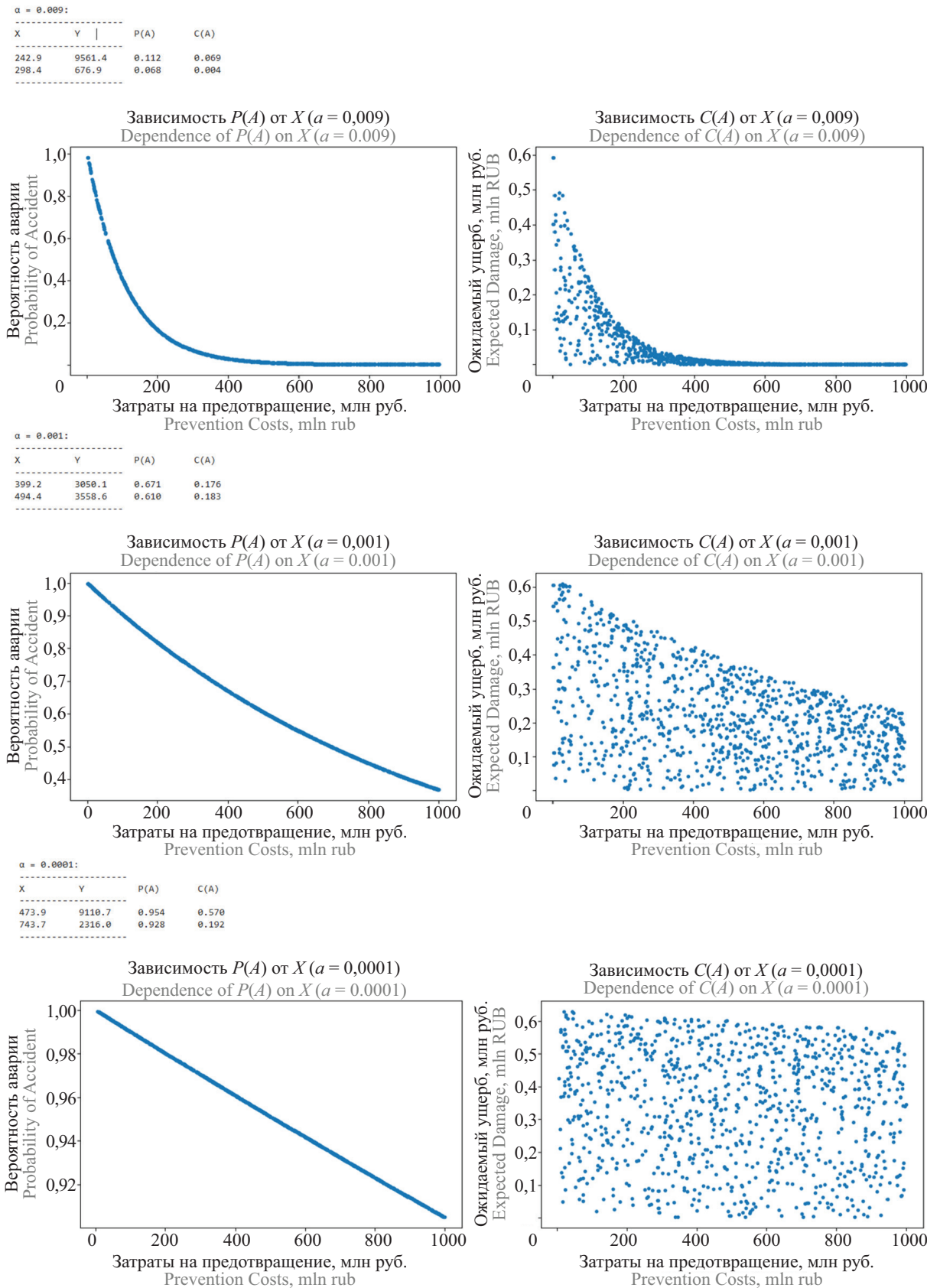


Рис. 2. Зависимость вероятности ($P(A)$) и ожидаемого ущерба ($C(A)$) от затрат на предотвращение (X). Варианты: ($\alpha = 0.009$), ($\alpha = 0.001$), ($\alpha = 0.0001$)

Fig. 2. Dependence of probability ($P(A)$) and expected damage ($C(A)$) on prevention costs (X). Options: ($\alpha = 0.009$), ($\alpha = 0.001$), ($\alpha = 0.0001$)

высокой вероятности аварии, что в итоге приводит к большему ожидаемому ущербу. Иначе говоря, даже при значительных инвестициях в безопасность остается вероятность крупной аварии с катастрофическими последствиями, что и объясняет рост ожидаемого ущерба при больших значениях X .

Метод Монте-Карло, продемонстрированный выше, дает общее представление о зависимости вероятности аварии и ожидаемого ущерба от затрат. Однако для более точного анализа и оптимизации распределения ресурсов необходимо учесть влияние системы безопасности (событие B) на эти показатели. Воспользуемся аналитическим подходом и рассмотрим следующие формулы:

$$P(A) = 1 - \exp(-\alpha \cdot X); \quad (14)$$

$$C(A) = 10\,000 \cdot (1 - P(A|B) \cdot P(B)), \quad (15)$$

где $P(A)$ — вероятность случайного события; $C(A)$ — ожидаемый ущерб от аварии; $P(A|B)$ — вероятность того, что опасное событие A приведет к аварии при условии, что произошло событие B ; $P(B)$ — вероятность того, что событие B сработает должным образом.

Формула (14) описывает, как затраты на предотвращение аварий (X) влияют на вероятность ее возникновения ($P(A)$). Параметр α отражает эффективность этих затрат: чем он выше, тем быстрее снижается вероятность аварии с ростом X .

Формула (15) показывает, что ожидаемый ущерб от аварии ($C(A)$) зависит от двух факторов:

- среднего значения ущерба (в данном случае 10 000 единиц);
- вероятности аварии с учетом системы безопасности ($1 - P(A|B) \cdot P(B)$).

Для оптимизации распределения ресурсов необходимо найти такое значение X , которое минимизирует $C(A)$. Важно установить связь между затратами на предотвращение (X) и вероятностью срабатывания системы безопасности ($P(B)$). Логично предположить, что с ростом X возрастает и $P(B)$, так как более высокие затраты обычно позволяют внедрить более надежную систему безопасности.

Чтобы определить оптимальное значение X , необходимо:

- задать конкретную функцию, связывающую X и $P(B)$;
- определить значение $P(A|B)$ — вероятность аварии при условии срабатывания системы безопасности;
- используя формулы (14) и (15), рассчитать $C(A)$ для разных значений X и выбрать то, которое минимизирует ожидаемый ущерб.

Данные формулы показывают, что ожидаемый ущерб от аварии равен произведению среднего значения ущерба от аварии (10 000 единиц) на ее вероятность. Последняя зависит от двух факторов: значения величины X (чем оно больше, тем меньше вероят-

ность аварии) и вероятности того, что событие B сработает должным образом (чем оно выше, тем меньше вероятность аварии).

Практическое применение модели: поиск оптимального X . Найдем такое значение X , которое минимизирует $C(A)$, учитывая при этом затраты на систему безопасности. Установим связь между X и $P(B)$ через вероятность того, что событие B не приведет к ущербу, описанную формулой (10) $C(B) = b/Y$. Здесь Y представляет собой величину события, направленного на предотвращение ущерба от аварии, а b — период (время), в течение которого были выделены средства на снижение ущерба.

Предположим, что Y прямо пропорционально затратам на предотвращение (X), т.е. $Y = kX$, где k — коэффициент пропорциональности. Тогда формула (10) примет вид:

$$C(B) = \exp(-Y/b) = \exp(-kX/b). \quad (16)$$

Так как $C(B)$ — это вероятность, что событие B не приведет к ущербу, то вероятность того, что B сработает должным образом, равна:

$$P(B) = 1 - C(B) = 1 - \exp(-kX/b). \quad (17)$$

Находим минимальное значение X при P , равном 0,1. Оно равно 69. Таким же образом находим значение Y при P , равном 0,9. Оно равно 90. При этих значениях величин X и Y вероятность аварии составит:

$$P(C) = P(A) \cdot (1 - P(B|A)) = P(A) \cdot (1 - 0,99) = 0,01 \cdot P(A). \quad (18)$$

При значениях $X_{\min} = 69$ млн руб. (ед.) и $Y_{\min} = 90$ млн руб. (ед.) ожидаемый ущерб от аварии составит 900 млн руб. (ед.). Для минимизации ожидаемого ущерба от аварии необходимо найти X , минимизирующее $C(A)$, учитывая зависимость $P(B)$ от X . Подставляя формулы (14) $C(A) = C(A|B) \cdot P(B) + C(A|\neg B) \cdot P(\neg B)$ и (15) $C(A|\neg B) = b \cdot P(A|\neg B)$ и учитывая найденную зависимость $P(B)$ от X , получаем:

$$C(A) = C(A|B) \cdot (1 - \exp(-kX/b)) + b \cdot P(A|\neg B) \cdot \exp(-kX/b). \quad (19)$$

Следующие параметры $\alpha = 10$, $b = 10\,000$, $k = 1$ (для упрощения расчетов), $P(A|B) = 0,01$ (выбираем низкую вероятность аварии при условии срабатывания системы безопасности, чтобы выразить ее эффективность). Подставляем выбранные значения параметров в формулу (19) для $C(A)$:

$$C(A) = C(A|B) \cdot (1 - \exp(-X/10\,000)) + 100 \cdot \exp(-X/10\,000). \quad (20)$$

Производная $dC(A)/dX$ отрицательна для всех $X > 0$, что означает, что функция $C(A)$ монотонно убывает с ростом X и стремится к асимптотическому значению $b \cdot P(A|\neg B) = 10\,000 \cdot 0,01 = 100$... В данной модели ожидаемый ущерб будет уменьшаться с ростом затрат на предотвращение (X), но никогда не достигнет нуля. Остаточный риск, равный 100 млн руб.,

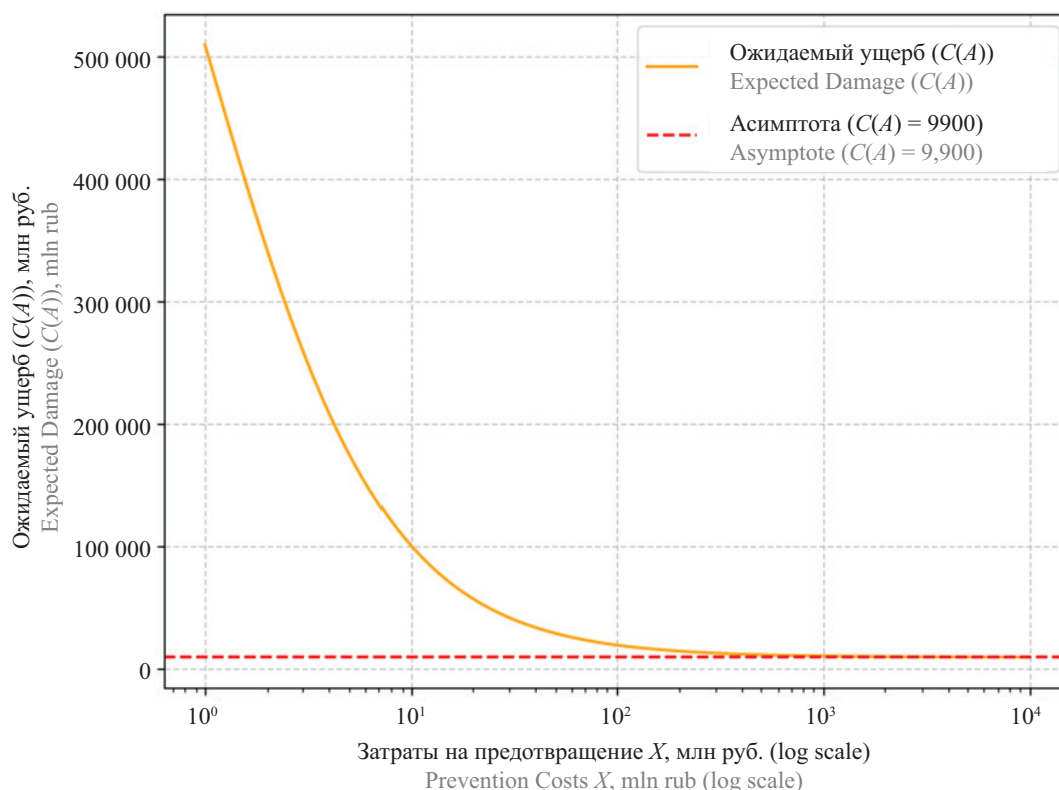


Рис. 3. Зависимость ожидаемого ущерба от затрат на предотвращение (log scale)

Fig. 3. Dependence of expected damage on prevention costs (log scale)

в данном случае невозможно полностью устранить даже при очень больших инвестициях в безопасность (рис. 3).

Отметим, что данная модель демонстрирует общую тенденцию снижения ожидаемого ущерба с ростом затрат на предотвращение аварий. Однако на практике фирма часто сталкивается с ограничениями бюджета и необходимостью найти баланс между снижением риска и разумными затратами. В предыдущем анализе были выявлены значения X и Y ($X = 69$ и $Y = 90$), которые минимизируют ожидаемый ущерб при учете эффективности системы безопасности. Важно отметить, что эти значения были получены при $P(B) = 0,9$ и $P(B) = 0,1$ соответственно. Для других значений $P(B)$ оптимальные значения X и Y будут другими. Таким образом, формулы (14)–(20) дают конкретный инструмент для количественной оценки риска, что позволяет принимать взвешенные решения об оптимальном распределении ресурсов.

Модель демонстрирует общую тенденцию снижения ожидаемого ущерба с ростом затрат на предотвращение аварий. Однако на практике фирма часто сталкивается с ограничениями бюджета и необходимостью найти баланс между снижением риска и разумными затратами. В предыдущем анализе были выявлены оптимальные значения X и Y , которые позволяют минимизировать ожидаемый ущерб при учете эффективности системы безопасности. Эти значения ($X = 69$ и $Y = 90$) служат ориентиром для при-

нятия решений о распределении ресурсов, даже если теоретически ущерб можно снижать и дальше за счет увеличения затрат. Формулы (14)–(19) дают конкретный инструмент для количественной оценки риска, что позволяет принимать взвешенные решения об оптимальном распределении ресурсов.

Однако формула (15) не отвечает сценарию, когда B не срабатывает. В этом случае авария происходит с вероятностью $P(A|B) = 1$, и ожидаемый ущерб должен быть равен C_damage (в данном примере 10 000). Правильный расчет (представленный ниже) должен учитывать вероятность несрабатывания B и использовать соответствующую условную вероятность, что отражено в формуле:

$$C(A) = P(A) \cdot (1 - P(B|A)) \cdot C_damage. \quad (21)$$

Анализ графиков

Далее исследуется влияние затрат на предотвращение ущерба (X) на различные показатели риска в трех сценариях:

- 1) *базовый сценарий*: исходный уровень риска без дополнительных мер;
- 2) *улучшенный сценарий*: сценарий с повышенной эффективностью мер по предотвращению ущерба;
- 3) *синергетический сценарий*: сценарий, где совместное применение мер по предотвращению ущерба и системы безопасности дает больший эффект, чем сумма отдельных мер.

Для анализа используются табл. 2–5.

Следующие графики демонстрируют взаимосвязь между затратами на предотвращение аварии (X), вероятностью возникновения аварии ($P(A)$), ожидаемым ущербом ($C(A)$) и эффективностью системы безопасности (B) (рис. 4).

Графики (рис. 4, a , b) построены методом вариации параметров. Они иллюстрируют важность комплексного подхода к управлению риском. Базовый сценарий показывает экспоненциальное снижение

вероятности аварии с ростом затрат. Улучшенный и сценарий с синергией демонстрируют более резкое снижение заданных показателей. Экспоненциальное снижение ожидаемого ущерба с ростом затрат вполне логично, так как чем больше вкладывают в безопасность, тем меньше вероятность аварии и, следовательно, меньше потенциальный ущерб. Этот график согласуется с формулой (14) $P(A = X) = 1 - \exp(-\alpha \cdot X)$, где α — параметр, определяющий скорость убывания вероятности с ростом величины этого события X .

Табл. 2. Вероятность аварии ($P(A)$) в зависимости от затрат на предотвращение (X), $P(A) = \exp(-\alpha \cdot X)$

Table 2. Accident probability ($P(A)$) as a function of prevention costs (X), $P(A) = \exp(-\alpha \cdot X)$

X , млн руб. mln rub	Базовый сценарий ($\alpha = 0,01$) Baseline scenario ($\alpha = 0.01$)	Улучшенный сценарий ($\alpha = 0,012$) Improved scenario ($\alpha = 0.012$)	Сценарий с синергией ($\alpha = 0,015$) Synergy scenario ($\alpha = 0.015$)
0	1,000	1,000	1,000
50	0,606	0,549	0,522
100	0,368	0,301	0,273
200	0,135	0,091	0,074
300	0,050	0,025	0,018
400	0,018	0,007	0,005
500	0,007	0,002	0,001
1000	0,000	0,000	0,000

Табл. 3. Ожидаемый ущерб ($C(A)$) в зависимости от затрат на предотвращение (X), $C(A) = C_damage \cdot (1 - P(A|B) \times P(B)) \cdot P(A)$

Table 3. Expected damage ($C(A)$) as a function of prevention costs (X), $C(A) = C_damage \cdot (1 - P(A|B) \cdot P(B)) \cdot P(A)$

X , млн руб. mln rub	Базовый сценарий Baseline scenario	Улучшенный сценарий Improved scenario	Сценарий с синергией Synergy scenario
0	9000,000	9000,000	9000,000
50	5455,035	4939,533	4681,845
100	3312,753	2732,103	2479,247
200	1217,029	814,769	657,566
300	450,996	248,087	184,337
400	164,569	73,895	51,817
500	61,947	22,310	14,934
1000	0,135	0,037	0,021

Табл. 4. Чувствительность вероятности аварии ($P(A)$) к затратам на предотвращение (X), $S(P(A)) = -(P(A(X + \Delta X)) - P(A(X)))/P(A(X)) \cdot 100\%$, где $\Delta X = 0,01 \cdot X$

Table 4. Sensitivity of accident probability ($P(A)$) to prevention costs (X), $S(P(A)) = -(P(A(X + \Delta X)) - P(A(X)))/P(A(X)) \times 100\%$, where $\Delta X = 0,01 \cdot X$

X , млн руб. mln rub	Базовый сценарий Baseline scenario	Улучшенный сценарий Improved scenario	Сценарий с синергией Synergy scenario
0	-1,000	-1,200	-1,500
50	-5,972	-7,167	-8,958
100	-10,948	-13,137	-16,422
200	-20,895	-25,074	-31,343
300	-30,844	-37,012	-46,264
400	-40,792	-48,951	-61,185
500	-50,741	-60,889	-76,106
1000	-99,499	-99,499	-99,499

Табл. 5. Чувствительность ожидаемого ущерба ($C(A)$) к затратам на предотвращение (X), $S(C(A)) = -(C(A(X + \Delta X)) - C(A(X)))/C(A(X)) \cdot 100 \%$, где $\Delta X = 0,01 \cdot X$

Table 5. Sensitivity of expected damage ($C(A)$) to prevention costs (X), $S(C(A)) = -(C(A(X + \Delta X)) - C(A(X)))/C(A(X)) \cdot 100 \%$, where $\Delta X = 0.01 \cdot X$

X , млн руб. mln rub	Базовый сценарий Baseline scenario	Улучшенный сценарий Improved scenario	Сценарий с синергией Synergy scenario
0	–0,100	–0,120	–0,150
50	–0,560	–0,672	–0,841
100	–1,021	–1,225	–1,532
200	–1,944	–2,333	–2,918
300	–2,867	–3,441	–4,303
400	–3,791	–4,549	–5,689
500	–4,714	–5,657	–7,075
1000	–9,429	–11,315	–14,151

Разные сценарии на графике можно интерпретировать как разные значения α . Формула (15) $C(A) = 10\,000 \cdot (1 - P(A|B) \cdot P(B))$ математически подтверждает этот вывод, показывая, что ожидаемый ущерб ($C(A)$) снижается при увеличении вероятности эффективного срабатывания системы безопасности ($P(B)$) и снижении условной вероятности аварии при условии срабатывания системы безопасности ($P(A|B)$). Также

формула (14) показывает, что ожидаемый ущерб снижается до 900 млн руб. при оптимальных значениях $X_{\min}$ и $Y_{\min}$. Сценарий с синергией на графике (рис. 4, б) демонстрирует наибольшую эффективность с точки зрения минимизации потерь.

Важно подчеркнуть, что графики (рис. 4, с, d) показывают, что эффективность инвестиций в безопасность зависит от чувствительности системы α

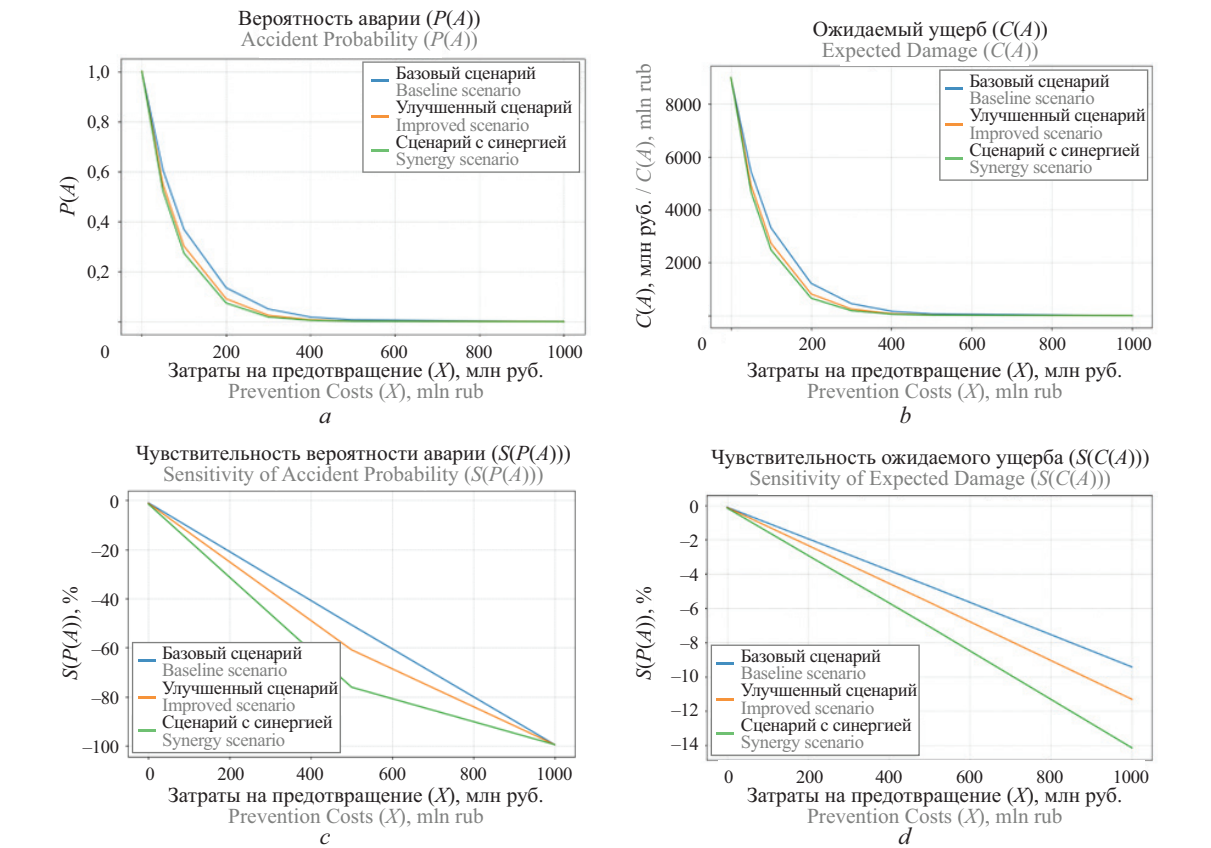


Рис. 4. Взаимосвязь между затратами на предотвращение аварии (X), вероятностью возникновения аварии ($P(A)$), ожидаемым ущербом ($C(A)$) и чувствительностью

Fig. 4. Relationship between accident prevention costs (X), probability of accident occurrence ($P(A)$), expected damage ($C(A)$) and sensitivity

(относительное изменение $P(A)$ или $C(A)$ при изменении затрат (X) на 1 %). Для построения графиков использовалась формула:

$$P(A) = (dP/dX)/P(A) \cdot 100 \% = (\alpha \cdot \exp(-\alpha \cdot X))/(1 - \exp(-\alpha \cdot X)) \cdot 100 \%. \tag{22}$$

Знаменатель $(1 - \exp(-\alpha \cdot X))$ стремится к 0 при X , стремящемся к бесконечности, что приводит к росту чувствительности при увеличении затрат. Высокая чувствительность означает, что даже небольшие изменения в затратах на предотвращение (X) приводят к существенному изменению вероятности аварии ($P(A)$) или ожидаемого ущерба ($C(A)$). В базовом сценарии при затратах $X = 100$ млн руб. чувствительность составит примерно 1 %. Это означает, что увеличение затрат на 1 % (1 млн руб.) снизит вероятность аварии на 0,01 (1 %). В сценарии с синергией (розовая линия) чувствительность еще выше, чем в улучшенном сценарии, отражая максимальный эффект от инвестиций.

Предположим, при затратах $X = 500$ млн руб. чувствительность $C(A)$ в базовом сценарии составляет 3 %, т.е. увеличение затрат на 1 % (5 млн руб.) снизит ожидаемый ущерб на 0,15 (3 %). В сценарии с синергией чувствительность может быть значительно выше, что говорит о более эффективном использовании инвестиций в безопасность. Анализ графика (рис. 4, *d*) позволяет сделать вывод, что при затратах около 505 млн руб. в базовом сценарии каждый дополнительный процент инвестиций в безопасность будет приводить к снижению ожидаемого ущерба примерно на 5 % относительно текущего уровня.

Для более детального анализа сценария с эффектом синергии рассмотрим следующую таблицу, которая содержит численные значения $P(A)$, $C(A)$ и чувствительности для разных уровней затрат на предотвращение (X) (табл. 6).

$P(A)$: как и ожидается, $P(A)$ уменьшается с ростом затрат на предотвращение (X). Это соответствует формуле (14): $P(A) = 1 - \exp(-\alpha \cdot X)$.

$C(A)$, млн руб.: $C(A)$ рассчитывается с учетом вероятности аварии ($P(A)$), фиксированного ущерба (C_{damage}) и вероятности срабатывания системы

безопасности ($P(B)$), как показано в формуле (14): $C(A) = 10\,000 \cdot (1 - P(A|B) \cdot P(B))$.

Чувствительность $P(A)$, %: показывает, на сколько процентов изменится вероятность аварии ($P(A)$) при увеличении затрат на предотвращение (X) на 1 %. Чувствительность уменьшается с ростом затрат, что означает, что эффективность каждой дополнительной единицы вложенных средств снижается.

Чувствительность $C(A)$, %: показывает, на сколько процентов изменится ожидаемый ущерб ($C(A)$) при увеличении затрат на предотвращение (X) на 1 %. Аналогично чувствительности $P(A)$ чувствительность $C(A)$ также уменьшается с ростом затрат.

Разберем сценарий с синергией (табл. 5):

$X = 0$ млн руб.; $S(P(A)) = -1,5 \%$. Это означает, что если мы увеличим затраты на предотвращение на 1 % (с 0 до 0,01 млн руб.), то вероятность аварии снизится на 1,5 % от текущего уровня (который равен 1).

$X = 50$ млн руб.; $S(P(A)) = -8,958 \%$. Здесь чувствительность больше по модулю (−8,958 против −1,5 %). Это значит, что увеличение затрат на 1 % (с 50 до 50,5 млн руб.) приведет к более значительному снижению вероятности аварии, чем при $X = 0$.

$X = 100$ млн руб.; $S(P(A)) = -16,422 \%$. Чувствительность продолжает усиливаться. Каждый процент увеличения затрат на предотвращение дает все больший эффект, на ранних этапах (при малых X) даже небольшие вложения могут дать заметный эффект, а при больших X для достижения такого же снижения $P(A)$ требуются более существенные инвестиции. Аналогично можно проанализировать и табл. 6. Отрицательные значения $S(C(A))$ также говорят о том, что увеличение затрат на предотвращение (X) приводит к снижению ожидаемого ущерба ($C(A)$), причем эта зависимость усиливается с ростом X .

Ограничения модели. Тем не менее ожидаемый ущерб зависит не только от величины событий, но и от их вероятности. Событие с меньшей величиной ущерба может приводить к большему ожидаемому ущербу, если оно происходит чаще. Тогда алгоритм расчета заключается не в том, чтобы сравнивать величины этих событий и выбирать меньшее значение, а находить среднюю величину ущерба. Предположим, что событие A имеет величину ущерба 10 тыс. ед.

Табл. 6. Данные для сценариев, включая с эффектом синергии

Table 6. Data table for the scenario with synergy effect

X , млн руб. mln rub	$P(A)$	$C(A)$, млн руб. mln rub	Чувствительность $P(A)$, % Sensitivity $P(A)$, %	Чувствительность $C(A)$, % Sensitivity $C(A)$, %
1	0,985	9045	−9,85	−0,94
50	0,606	5455	−7,27	−0,70
100	0,368	3313	−5,45	−0,52
200	0,135	1217	−3,38	−0,32
300	0,050	451	−2,25	−0,21
400	0,018	164	−1,56	−0,15
500	0,007	62	−1,13	−0,11
1000	0,000	1	−0,55	−0,05

и вероятность 0,1, а событие B имеет величину ущерба 5 тыс. ед. и вероятность 0,9. Выбор меньшего значения из величин событий (5 тыс. руб.) не подходит для расчета ожидаемого ущерба, так как не учитываются вероятности событий A и B . Ожидаемый ущерб будет больше. Формула для его вычисления следующая:

$$E[U] = P(A) \cdot C_damage(A) + P(B) \cdot C_damage(B), \quad (23)$$

где $E[U]$ — математическое ожидание ущерба (expected value of damage); $P(A)$ и $P(B)$ — вероятности наступления состояний или событий A и B ; $C_damage(A)$ и $C_damage(B)$ — величины ущерба в случае наступления состояний A и B соответственно.

События A и B происходят независимо друг от друга, и наступление одного события не влияет на вероятность наступления другого. $C_damage(A)$ и $C_damage(B)$ могут быть разными.

Расчет ожидаемого ущерба. $E[U]$ обозначает математическое ожидание (expected value) ущерба (U). Математическое ожидание в данном контексте представляет собой средневзвешенную величину ущерба от всех возможных событий (A и B), где веса — это вероятности наступления A и B . Например, если событие A имеет величину ущерба 10 тыс. ед. и вероятность 0,1, а событие B имеет величину ущерба 5 тыс. ед. и вероятность 0,9, то математическое ожидание ущерба будет равно:

$$E[U] = 0,1 \cdot 10\,000 + 0,9 \cdot 5000 = 5500 \text{ руб.} \quad (24)$$

Важно отметить, что задача нахождения минимальных оптимальных значений ($X_{\min}$, $Y_{\min}$) отличается от задачи расчета ожидаемого ущерба. $X_{\min}$ и $Y_{\min}$ относятся к оптимизации затрат на предотвращение аварий (X) и затрат на ликвидацию последствий (Y) с целью минимизации общего риска. Ожидаемый ущерб — это средневзвешенная оценка возможных потерь с учетом вероятностей разных сценариев и не обязательно совпадает с минимально достижимым уровнем ущерба.

Адаптивная формула и учет неопределенности. Обоснованным шагом для обеспечения универсальности расчета ожидаемого ущерба служит адаптивная формула. Она рассчитывает ожидаемый ущерб, когда есть одно опасное событие (A), которое может привести к ущербу, и система безопасности (B), которая может снизить этот ущерб:

$$R(A, B) = P(A) \cdot C_damage \cdot (1 - P(B|A)), \quad (25)$$

где $P(A)$ — вероятность возникновения опасного события A ; C_damage — фиксированная величина ущерба, если событие происходит (например, 10 тыс. ед.) в случае аварии; $P(B|A)$ — вероятность того, что событие B сработает должным образом, при условии, что произошло событие A .

Эта формула учитывает условную вероятность $P(B|A)$ и фиксированный ущерб C_damage , что делает модель более гибкой и адаптируемой к разным ситуациям, чем простая формула $R = P \cdot C$.

В контексте расчета ожидаемого ущерба $P(B|A)$ играет важную роль. Она позволяет учитывать влияние системы безопасности (события B) на величину ожидаемого ущерба. Если система безопасности работает должным образом, то ущерб будет меньше. Замена $\exp(-\alpha X) \cdot (b/Y)$ на $P(B|A) \cdot C_damage$ дает возможность учесть условную вероятность события B и величину ущерба C_damage ; а выражение $1 - P(B|A)$ — вероятность того, что система безопасности B не сработает должным образом, когда происходит опасное событие A .

Значение условной вероятности $P(B|A)$ необходимо для расчета. Без него нельзя точно рассчитать ожидаемый ущерб, так как неизвестно, насколько эффективна система защиты (B) в контексте события A . Предположим, что $P(B|A)$ равна 0,9, т.е. вероятность того, что система безопасности сработает должным образом, составляет 90 %. Тогда $1 - P(B|A)$ равна 0,1, т.е. в 10 % случаев система безопасности не сможет предотвратить ущерб, что приведет к более высокому ожидаемому ущербу.

Другой пример. Даны два значения $P(B|A)$: 1) если $P(B|A) = 0,1$ (т.е. система защиты (B) с высокой вероятностью сработает, когда происходит событие A), то ожидаемый ущерб будет ниже; 2) если $P(B|A) = 0,9$ (т.е. система защиты (B) с низкой вероятностью сработает, когда происходит событие A), то ожидаемый ущерб будет выше. Рассчитаем с помощью формулы (25) ожидаемый ущерб, учитывая вероятность события A , а также эффективность системы защиты (B).

Сценарий 1: $P(B|A) = 0,1$ (высокая вероятность срабатывания системы защиты, эффективно предотвращающей ущерб):

$$R(A, B) = 0,1 \cdot 10\,000 \cdot (1 - 0,1) = 900. \quad (26)$$

Сценарий 2: $P(B|A) = 0,9$ (низкая вероятность срабатывания системы защиты, к тому же она не эффективна):

$$R(A, B) = 0,1 \cdot 10\,000 \cdot (1 - 0,9) = 100. \quad (27)$$

Ожидаемый ущерб значительно ниже в сценарии с низкой вероятностью срабатывания системы защиты (100 ед.). Хотя система защиты срабатывает с высокой вероятностью (0,9), опасное событие (A) также происходит с вероятностью 0,1. Поэтому, несмотря на эффективную защиту, ущерб все же возникает с определенной вероятностью. Все это приводит к более высокому ожидаемому ущербу. В другом случае система защиты срабатывает с низкой вероятностью (0,1), однако опасное событие (A) происходит с высокой вероятностью 0,9 и приводит к меньшему ожидаемому ущербу. Так получается потому, что вероятность события B остается неизменной, независимо от наступления события A .

Следующая формула позволяет учесть различные сценарии и вероятности наступления обоих событий A и B с соответствующими им величинами ущерба:

$$R(A, B) = P(A) \cdot C_{\text{damage}} \cdot (1 - P(B|A)) + (1 - P(A)) \cdot C_{\text{damage}}(B), \quad (28)$$

где $P(B|A)$ — вероятность того, что система защиты B не сработает при наступлении события A . Если система защиты не сработает, то ущерб будет равен $C_{\text{damage}}(A)$; $1 - P(A)$ — вероятность того, что событие A не произойдет. В этом случае ущерб будет равен $C_{\text{damage}}(B)$, который описывает потери при наступлении события B ; $C_{\text{damage}}(B)$ — величина ущерба, связанная с событием B . Она описывает потенциальные потери при наступлении события B .

Это уравнение учитывает как ожидаемый ущерб при наступлении события A и срабатывании системы B , так и ожидаемый ущерб при отсутствии события A и независимом наступлении события B . Теперь пересчитаем исходную задачу с использованием данной формулы:

$$R(A, B) = 0,1 \cdot 10\,000 \cdot (1 - P(B|A)) + (1 - 0,1) \times 5000, \text{ если } P(B|A) = 0,1;$$

$$R(A, B) = 0,1 \cdot 10\,000 \cdot (1 - 0,1) + (1 - 0,1) \cdot 5000;$$

$$R(A, B) = 0,1 \cdot 10\,000 \cdot 0,9 + 0,9 \cdot 5000;$$

$$R(A, B) = 900 + 4500 = 5400, \text{ если } P(B|A) = 0,9;$$

$$R(A, B) = 0,1 \cdot 10\,000 \cdot (1 - 0,9) + (1 - 0,1) \cdot 5000;$$

$$R(A, B) = 0,1 \cdot 10\,000 \cdot 0,1 + 0,9 \cdot 5000;$$

$$R(A, B) = 1000 + 4500 = 5500.$$

Таким образом, при $P(B|A) = 0,1$, когда система защиты B с высокой вероятностью срабатывает при наступлении события A , ожидаемый ущерб составляет 5400 ед. Во втором случае при $P(B|A) = 0,9$ он выше. Вычисление показывает, что при более высокой вероятности срабатывания системы защиты B (сценарий 1) ожидаемый ущерб оказывается ниже, чем в сценарии 2. Это соответствует ожидаемым результатам, так как в сценарии, где система защиты имеет большую вероятность сработать, она может успешно предотвратить или снизить ущерб, в результате чего ожидаемый ущерб становится меньше. Расчет ожидаемого ущерба для двух сценариев подтверждает важность учета вероятностей событий при оценке риска. Однако неотъемлемой частью определения остается фактор неопределенности.

Когда речь идет о множестве возможных сценариев и есть необходимость рассмотреть общий ожидаемый ущерб, то используется формула (23), поскольку в ней $C_{\text{damage}}(A)$ — величина ущерба, если происходит событие A , представляет собой потенциально разные значения ущерба в разных сценариях. Формулы (25)–(28) служат для вычисления ожидаемого ущерба в рамках конкретного сценария, где происходит событие A , и система защиты может не сработать.

Нормализованная адаптация формулы. Формулу (9), где вероятность возникновения опасного события A описывается экспоненциальным распределе-

нием, также можно адаптировать к вышеуказанному контексту расчета ожидаемого ущерба:

$$P_{\text{норм}}(X_{\min}) = \frac{P(X_{\min})}{\sum_{A=X_{\min}}^{X_{\max}} P(A)}, \quad (29)$$

где $P_{\text{норм}}(X_{\min})$ — это нормированная вероятность возникновения опасного события с величиной $X_{\min}$. Нормирование здесь важно для того, чтобы учитывать вклад данного события в контексте всех возможных значений случайного события A в диапазоне от $X_{\min}$ до $X_{\max}$. Показатель будет находиться в диапазоне от 0 до 1, так как является отношением вероятности конкретного события к общей вероятности всех событий в данном промежутке. Если $P_{\text{норм}}(X_{\min})$ близко к 1, это указывает на то, что событие с величиной $X_{\min}$ имеет большую вероятность относительно всех других событий в диапазоне, значение $P_{\text{норм}}(X_{\min})$, близкое к 0, говорит о низкой вероятности $A_{\min}$; $P(X_{\min})$ — базовая вероятность возникновения опасного события с величиной $X_{\min}$; $\sum_{A=X_{\min}}^{X_{\max}} P(A)$ — сумма вероятностей всех возможных значений события A в диапазоне от $X_{\min}$ до $X_{\max}$.

Формула (29) представляет собой нормализованную вероятность для минимального значения $X_{\min}$ в контексте анализа рисков или оценки эффективности систем безопасности. Если X представляет собой меру эффективности системы предотвращения ущерба, то $P_{\text{норм}}(X_{\min})$ указывает на риск отказа системы при ее минимальной эффективности (например, нормированная вероятность того, что концентрация пыли будет равна 5 мг/м^3 , и произойдет случайное событие «авария», учитывая все возможные значения X в диапазоне от 5 до 10 мг/м^3). При выборе между различными вариантами системы безопасности $P_{\text{норм}}(X_{\min})$ может помочь оценить, насколько вероятно, что система будет работать с минимально допустимой эффективностью. Формула полезна для оптимизации параметров системы, чтобы минимизировать вероятность работы системы на минимально допустимом уровне эффективности. Тем не менее у данного варианта оценки опасности есть ограничения. Так, предполагается, что каждое значение X в диапазоне от $X_{\min}$ до $X_{\max}$ имеет ненулевую вероятность. Это означает, что система может работать с любой эффективностью в указанном диапазоне, хотя некоторые уровни эффективности более вероятны, чем другие. В действительности, некоторые значения X могут быть физически невозможны или крайне маловероятны. Например, если X представляет собой процент времени безотказной работы системы, значение 0 % (полный отказ) невозможно, поскольку запланированы ее резервные компоненты. Представим, что X — это эффективность фильтра очистки воздуха, измеряемая в процентах задержанных частиц. $X_{\min} = 70 \%$ и $X_{\max} = 99 \%$. Формула предполагает, что фильтр может работать с любой эффективностью между 70 и 99 %. Однако

из-за физических ограничений конструкции фильтра эффективность ниже 75 % невозможна. Поэтому, если игнорировать это ограничение, то $P_{\text{норм}}(X_{\text{мин}})$ недооценивается, поскольку знаменатель формулы будет включать вероятности невозможных значений X . Следует отметить, что значение $P_{\text{норм}}(X_{\text{мин}})$ само по себе не говорит о том, насколько «хорошо» или «плохо» работает система. Интерпретация этого значения зависит от конкретного контекста и значения X . Даже небольшое значение $P_{\text{норм}}(X_{\text{мин}})$ может быть неприемлемым, если указывает на риск загрязнения окружающей среды и угрозу здоровью людей, проживающих или работающих вблизи стройки. Таким образом, данная формула предполагает заранее определить, какой уровень $P_{\text{норм}}(X_{\text{мин}})$ является допустимым в конкретном контексте.

Более гибкая модель. Более гибкая модель реализуется в следующей формуле:

$$P(A) = P(A|B) \cdot P(B) + P(A|\neg B) \cdot P(\neg B), \quad (30)$$

где $P(A)$ — вероятность возникновения события A , т.е. вероятность наступления опасности, приводящей к аварии или негативным последствиям для окружающей среды (например, работа системы очистки воды); $P(A|B)$ — условная вероятность наступления события A при условии срабатывания системы безопасности B . Это означает, что $P(A|B)$ оценивает вероятность возникновения опасности в случае, если система безопасности сработает и предотвратит аварию или снизит ее последствия (вероятность эффективной очистки воды при наличии электроснабжения); $P(B)$ — вероятность срабатывания системы безопасности B (штатная работа электроснабжения, необходимого для работы системы очистки); $P(A|\neg B)$ — условная вероятность наступления события A при условии, что система безопасности B не сработает. Это означает, что $P(A|\neg B)$ оценивает вероятность возникновения опасности в случае, если система безопасности не сработает и не предотвратит аварию или снизит ее последствия (например, вероятность очистки воды при отключении электроснабжения возможна за счет резервного генератора); $P(\neg B)$ — вероятность того, что система безопасности B не сработает (отключение электроснабжения).

Формула (32) еще больше уточняет модель, рассматривая как сценарий штатного функционирования системы безопасности (B), так и сценарий ее несрабатывания ($\neg B$). В ней суммируются вероятности двух сценариев (сценарий 1 (B): электроснабжение работает штатно, вероятность эффективной очистки воды в этом случае — $P(A|B)$; сценарий 2 ($\neg B$): электричество отключено, вероятность эффективной очистки воды — $P(A|\neg B)$). Эта модель позволяет учесть влияние мер по предотвращению аварии или снижению ее последствий, что делает оценку вероятности более реалистичной. В отличие от экспоненциального распределения, которое определяется только параметром α и не учитывает влияние внеш-

них факторов, эта формула более гибкая и адаптируемая к различным сценариям, дает возможность моделировать ситуации, когда вероятность наступления события A зависит от различных факторов, включая срабатывание системы безопасности B . По сравнению с формулой (29) данный подход рассматривает влияние действия системы безопасности B на вероятность наступления события A , а также включает анализ неопределенности в срабатывании системы безопасности B и ее влияние на вероятность наступления события A . Она позволяет учитывать различные сценарии и вероятности наступления события A при различных условиях системы предотвращения ущерба.

Еще раз подчеркнем. Формула $R = P \cdot C$ в различных ее видах предполагает, что риск является линейной функцией вероятности и последствий, т.е. риск увеличивается пропорционально увеличению P или C . Тем не менее в реальной жизни риск не всегда является линейной функцией. Например, сценарий с низкой вероятностью и высоким ущербом может быть более опасным, чем сценарий с высокой вероятностью и низким ущербом. Рассмотрим следующие два сценария:

Сценарий 1: Вероятность аварии составляет 1 %, а ущерб в случае аварии — 1 млрд руб. Тогда $R = 0,01 \cdot 1\,000\,000\,000$ руб. = 10 000 000 руб.

Сценарий 2: Вероятность аварии составляет 10 %, а ущерб в случае аварии — 10 млн руб. Тогда $R = 0,1 \cdot 10\,000\,000$ руб. = 1 000 000 руб.

В соответствии с формулой $R = P \cdot C$ количественное значение риска для обоих сценариев одинаково и равно 10 млн руб. Однако, очевидно, что сценарий 1 является более опасным, чем сценарий 2, тем самым в указанной формуле не учитывается тот факт, что ущерб от аварии может иметь более сильное влияние на риск, чем вероятность аварии. Для учета нелинейности риска в настоящее время используются различные методы корректировки факторов вероятности и последствий [29, 30].

Полуколичественный подход. ГОСТ Р 51898–2002 «Аспекты безопасности. Правила включения в стандарты» и вслед за ним ГОСТ Р 12.0.006–2002 «Система стандартов безопасности труда. Общие требования к системе управления охраной труда в организации» трактуют риск R как сочетание вероятности P нанесения ущерба и тяжести (S) этого ущерба. В ГОСТ Р ISO 31000–2019 «Менеджмент риска. Принципы и руководство» понятие риска определяется в соответствии с ISO 31000 и служит для прояснения менеджмента любых типов риска как влияния неопределенности на цели. Риск описывается более оптимальной в оценке рисков формулой:

$$\begin{aligned} \text{Риск}(R) &= \\ &= \text{Вероятность}(P) \cdot \text{Тяжесть события}(S), \end{aligned} \quad (31)$$

где «Тяжесть события» (Severity of the event) означает значительность последствий; вред, который может

нанести опасность; стохастические условия реализации решения; подверженность возможности потерять неблагоприятные или благоприятные обстоятельства; шанс или ситуацию ожидаемых потерь или достижения цели; интенсивность, размер и величину того, что ценят (жизни, окружающую среду, деньги и т.д.). Потери и выгоды, например, выраженные в деньгах или числе погибших, являются способами определения серьезности последствий. При этом здесь речь идет о рисках как воздействии неопределенности (условий недостатка информации) на поставленные цели. Ущерб рассматривается как нанесение физического повреждения или другого вреда здоровью людей, или вреда имуществу или окружающей среде. Соответственно, безопасность понимается как отсутствие недопустимого риска; опасность — как потенциальный источник возникновения ущерба; допустимый риск — как тот, который в данной ситуации считают приемлемым при существующих общественных ценностях.

ГОСТ Р 54135–2010 «Экологический менеджмент. Руководство по применению организационных мер безопасности и оценки рисков. Защита экологических природных зон. Общие аспекты и мониторинг» рассматривает риск как сочетание вероятности события и его последствий. Это есть вероятность нанесения вреда окружающей среде с учетом его тяжести.

Из содержания ГОСТ Р 54934–2012/OHSAS 18001:2007 «Системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья. Требования» следует, что вероятность и последствия нежелательного или опасного события могут быть условно классифицированы. Обычно их разделяют на 5 рангов, каждый из которых характеризуется, например, следующими качественными показателями: минимальный, низкий, средний, высокий и максимальный (в зависимости от поставленных целей и обоснованной точности оценки риска степеней может быть и 3, и 10, и т.д., дополненных весовыми коэффициентами). Затем

этим уровням присваиваются соответствующие цвета опасности или баллы, например от 1 до 5 (табл. 7).

В матрице рисков «тяжесть события» часто ранжируется по 4-балльной шкале следующим образом (табл. 8).

Далее строится матрица рисков. Соответствующие области рисков наглядно окрашиваются в цвета степени опасности и отмечаются соответствующей цифрой произведения вероятности (*P*) и последствий события (*S*). Уровень риска с ростом вероятности и последствий события растет от зеленого к красному, или от 1 до 25. Тем самым полуколичественный метод представления рисков облегчает задачу разработки соответствующих мероприятий по обеспечению их снижения на соответствие требованиям стандартов (табл. 9).

Таким образом, на основе оценки вероятности наступления и размера ущерба можно рассчитать как количественное, так и качественное значение риска.

Сценарный подход. Более совершенным в оценке риска является сценарный подход с параметрами, которые позволяют корректировать факторы вероятности и последствий. Как уже отмечалось, риск не всегда — линейная функция: сценарий с низкой вероятностью и высоким ущербом может быть более опасным, чем сценарий с высокой вероятностью и низким ущербом. Этому есть объяснение. Согласно классической парадигме относительной частоты, вероятность интерпретируется как повторяющееся бесконечное число раз. Событие происходит, если анализируемая ситуация гипотетически «повторялась». Следовательно, оценки риска могут быть более или менее точными по сравнению с лежащим в основе истинным риском. В этом случае неопределенности в оценках могут быть очень большими и их трудно выразить. С точки зрения байесовской перспективы вероятность представляется как мера неопределенности событий и последствий, рассматриваемая аналитиком риска и основанная на доступной исходной информации.

Табл. 7. Ранжирование риска нежелательного или опасного события

Table 7. Ranking the risk of an undesirable or dangerous event

Тип риска Risk type	Обозначение Designation	Баллы Points
Минимальный (очень низкий) риск Minimal (very low) risk	OHP VLR	$0 < P < 5$
Низкий риск Low risk	HP LR	$5 < P < 10$
Средний риск Average risk	CP AR	$10 < P < 15$
Высокий риск High risk	BP HR	$15 < P < 20$
Максимальный (очень высокий) риск Maximum (very high) risk	OBP VHR	$20 < P < 25$

Табл. 8. Шкала уровней риска

Table 8. Risk level scale

Уровень риска Risk level	Описание Description	Баллы Points
Малый Small	Условия эксплуатации окружающей среды не представляют опасности и не наносят потерь системе «промышленный объект – природа». Тем не менее фоновые значения риска негативного воздействия сохраняются, ухудшая качество природной среды. Они приведут к менее чем незначительным последствиям. Те особи, для которых помехи оказались непреодолимыми, погибнут Environmental operating conditions do not pose a danger and do not cause losses to the “industrial facility – nature” system. Nevertheless, the background values of the risk of negative impact remain, worsening the quality of the natural environment. They will result in less than minor consequences. Those individuals for whom the obstacles turned out to be insurmountable will die	1
Незначительный Insignificant	Недостатки негативного воздействия на экосистемы могут быть устранены или контролироваться без серьезных повреждений природных объектов, подчиняющихся закону внутреннего динамического равновесия Disadvantages of negative impact on ecosystems can be eliminated or controlled without serious damage to natural objects that obey the law of internal dynamic equilibrium	2
Критический Critical	Недостатки эксплуатации природных активов могут привести к тяжелым травмам, заболеваниям или серьезным потерям в системе “промышленный объект – природа”. Требуется незамедлительно принять корректирующие меры Deficiencies in the operation of natural assets can lead to severe injuries, illnesses or serious losses in the industrial facility – nature system. Corrective action must be taken immediately	3
Катастрофический Catastrophic	Условия эксплуатации окружающей среды таковы, что антропогенная нагрузка превысила способность природы к самовосстановлению. Человеческий фактор, недостатки конструкции, отказ элементов, подсистем или компонентов, а также недостатки процедуры могут привести к гибели людей, серьезным потерям видов в экосистеме. С точки зрения принципа Ле Шателье – Брауна, данный уровень потерь может вызвать гибель соответствующей экосистемы. Требуется немедленное прекращение небезопасной деятельности Environmental operating conditions are such that the anthropogenic load has exceeded nature’s ability to self-heal. Human error, design flaws, failure of elements, subsystems or components, and procedural deficiencies can result in loss of life and serious loss of species in an ecosystem. From the point of view of the Le Chatelier – Brown principle, this level of losses can cause the death of the corresponding ecosystem. Immediate cessation of unsafe activities is required	4

Табл. 9. Ранговая матрица риска

Table 9. Risk ranking matrix

Очень высокая. Очень вероятно (1 раз в полгода) Very high. very likely (once every six months)	5	CP ₅ AR ₅	BP ₁₀ HR ₁₀	OBP ₁₅ VHR ₁₅	OBP ₂₀ VHR ₂₀	OBP ₂₅ VHR ₂₅
Высокая. Вероятно (1 раз в год) High. Probably (once a year)	4	HP ₄ LR ₄	CP ₈ AR ₈	BP ₁₂ HR ₁₂	BP ₁₆ HR ₁₆	OBP ₂₀ VHR ₂₀
Средняя. Возможно (1 раз в 5 лет) Average Maybe (once every 5 years)	3	ONP ₃ VLR ₃	HP ₆ LR ₆	CP ₉ AR ₉	BP ₁₂ HR ₁₂	OBP ₁₅ VHR ₁₅

Низкая. Маловероятно (1 раз в 10 лет) Low Unlikely (once every 10 years)	2	OHP_2 VLR_2	HP_4 LR_4	HP_6 LR_6	CP_8 AR_8	BP_{10} HR_{10}
Очень низкая. Крайне маловероятно (1 раз в 25 лет) Very low Extremely unlikely (once every 25 years)	1	OHP_1 VLR_1	OHP_2 VLR_2	OHP_3 VLR_3	HP_4 LR_4	CP_5 AR_5
Вероятность (P) Probability (P)		1	2	3	4	5
		Незначительные Minor	Ограниченные Limited	Тяжелые Severe	Очень тяжелые Very severe	Катастрофические Catastrophic
		Последствия (тяжесть) событий (S) Consequences (severity) of events (S)				

В этом случае вероятность — это субъективная мера неопределенности, зависящая от доступного ее знания. Эталоном является некий стандарт, назначенный оценщиком риска, но при этом нет ссылки на правильную или истинную вероятность. Назначенные вероятности зависят от конкретных базовых знаний и могут давать неверные прогнозы. В этих условиях сценарный подход можно назвать более достоверным и полным в плане анализа и оценки рисков. Он заключается в том, что рассматриваются различные сценарии развития событий, которые могут привести к возникновению риска. Для каждого сценария оценивается вероятность его наступления и размер ущерба, который может быть причинен в случае его реализации, т.е. для каждого сценария идентифицируется его описание si , вероятность его наступления pi и последствия, которые могут быть причинены в случае его реализации xi [31]:

$$R = \{(si, pi, xi)\}, i = 1, 2, \dots, N. \tag{32}$$

Такой подход имеет ряд преимуществ. Во-первых, он позволяет учитывать различные сценарии развития событий, что делает оценку рисков более полной и достоверной. Во-вторых, он дает возможность оценивать риски в количественном выражении, что упрощает их сопоставление и принятие решений по управлению рисками.

Рассмотрим несколько примеров, которые иллюстрируют преимущества такого подхода.

Пример 1.

Предположим, что рассматривается строительство нового завода. Для оценки экологических рисков необходимо рассмотреть следующие сценарии:

Сценарий 1: авария на производственном оборудовании, приводящая к выбросу ЗВ в окружающую среду (возможный ущерб 100 млн руб.).

Описание (si): авария на производственном оборудовании, в результате которой в окружающую среду попадают ЗВ.

Вероятность (pi): 0,01 — вероятность того, что авария произойдет в течение одного года.

Последствия (xi):

- загрязнение воздуха и воды;
- поражение флоры и фауны;
- ухудшение качества жизни людей.

Сценарий 2: разлив нефтепродуктов при транспортировке сырья (возможный ущерб 200 млн руб.).

Описание (si): разлив нефтепродуктов при транспортировке сырья.

Вероятность (pi): 0,02 — вероятность того, что разлив произойдет в течение одного года.

Последствия (xi):

- загрязнение почвы и воды;
- поражение флоры и фауны;
- ухудшение качества жизни людей.

Сценарий 3: нарушение правил обращения с опасными отходами, приводящее к их попаданию в окружающую среду (возможный ущерб 300 млн руб.).

Описание (si): нарушение правил обращения с опасными отходами, в результате которого в окружающую среду попадают опасные отходы.

Вероятность (pi): 0,03 — вероятность того, что нарушение произойдет в течение одного года.

Последствия (xi):

- загрязнение почвы, воды и воздуха;
- поражение растений и животных;
- угроза здоровью людей.

Сценарий 4: нарушение правил эксплуатации инженерных систем, приводящее к загрязнению окружающей среды (возможный ущерб 400 млн руб.).

Описание (si): нарушение правил эксплуатации инженерных систем, в результате которого в окружающую среду попадают ЗВ.

Вероятность (pi): 0,04 — вероятность того, что нарушение произойдет в течение одного года.

Последствия (xi):

- загрязнение воздуха и воды;

Табл. 10. Размер ущерба в случае его реализации

Table 10. Amount of damage if realized

Сумма ущерба, млн руб. Amount of damage, mln rub	Номер сценария Scenario number
$R = 0,01 \cdot 100\,000\,000 = 1\,000\,000$	Сценарий 1 Scenario 1
$R = 0,02 \cdot 200\,000\,000 = 4\,000\,000$	Сценарий 2 Scenario 2
$R = 0,03 \cdot 300\,000\,000 = 9\,000\,000$	Сценарий 3 Scenario 3
$R = 0,04 \cdot 400\,000\,000 = 16\,000\,000$	Сценарий 4 Scenario 4

- поражение растений и животных;
- ухудшение качества жизни людей.

Для каждого сценария необходимо оценить вероятность его наступления и размер ущерба в случае его реализации:

- вероятность аварии на производственном оборудовании оценивается на основе анализа данных об аналогичных авариях, произошедших на других предприятиях;
- вероятность разлива нефтепродуктов оценивается на основе анализа данных о частоте и масштабах аварий на транспорте;
- вероятность нарушения правил обращения с опасными отходами оценивается на основе анализа данных о соблюдении этих правил на других предприятиях;
- размер ущерба, причиненный в случае аварии на производственном оборудовании, зависит от типа загрязняющих веществ, которые выпущены в окружающую среду, их количества и концентрации;
- размер ущерба в случае разлива нефтепродуктов зависит от количества разлившихся нефтепродуктов, их свойств и места разлива;
- размер ущерба вследствие нарушения правил обращения с опасными отходами зависит от типа опасных отходов, их количества и свойств.

Количественное значение риска (R) рассчитывается по формуле (32) (табл. 10).

Таким образом, сценарный подход на основе оценки вероятности наступления и размера ущерба для каждого сценария позволяет рассчитать не только более полное и достоверное количественное значение риска, но и его полуколичественные характеристики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка ЭР является важным инструментом для обеспечения экологической безопасности в сфере жилищного и промышленного строительства. Выбор методов оценки экологического риска зависит от конкретных условий строительства и требований, предъявляемых к экологической безопасности. Сценарный подход является одним из наиболее эффективных методов оценки ЭР, который позволяет

учесть все возможные сценарии развития событий и оценить их последствия.

Но остаются вопросы, каким образом следует определить понятие «экологический риск»? Какие характеристики должны учитываться при определении экологического риска? Необходимо разработать более точное определение экологического риска в строительстве при формулировании экологических мероприятий и оценке соответствия их выполнения (возможна разработка аналога японской системы экологической безопасности CASBEE). Смысл ЭР связан не только с определением степени опасного или катастрофического воздействия промышленных источников на природу в пределах допустимых показателей и материального ущерба в виде налогов, сборов, тарифов, различных возмещающих платежей и штрафов (плату за природные ресурсы можно рассчитывать как дополнительный доход от использования природного ресурса повышенной продуктивности, так и на основе издержек замещения данного ресурса). Экологический риск также предполагает анализ и оценку:

- уязвимости природной среды (чем уязвимее экосистема, тем выше риск негативного воздействия, тем более рискованным и скачкообразным может быть смещение природного равновесия);
- величины экологического резерва;
- порога экологической безопасности.

Характеристика природных уязвимостей является условием сохранения равновесного состояния экосистемы и, следовательно, природного баланса, включая среду обитания человека. Если с 2008 по 2017 г. ежегодно выбрасывалось в атмосферу около 40 гигатонн парниковых газов в результате сжигания ископаемого топлива и изменений в землепользовании, то такого рода интенсивный процесс негативного воздействия стал причиной накопления огромных потерь окружающей среды: по массе выбросы заместили обитание на планете 252 млн голубых китов на многие сотни лет вперед в рамках сбалансированной сукцессии (последовательной смены биоценозов, протекающих под влиянием как внешних, так и внутренних факторов). Необратимое катастрофическое смещение природного баланса, напри-

мер, стабильность биосферы окажется подорванной при потере 20–30 % видов, приведет к переоценке критериев экологического состояния природных объектов и тем самым к отказу от исходных значений антропогенных факторов окружающей среды, столь важных для надежного использования строительных объектов и промышленных технологий. Разработка указанного контекста сценарного подхода требует дальнейших исследований⁴ [32–36].

Предметом дальнейшего изучения является и сценарный подход. Как следует применять сценарный подход для оценки ЭР в строительстве? Какие рекомендации можно дать по применению сценарного подхода? Из анализа проблемы ясно, что при применении сценарного подхода необходимо учитывать следующие этапы: 1) выявить все возможные сценарии развития событий, которые могут привести к негативному воздействию на окружающую среду; 2) оценить вероятность наступления каждого сценария; 3) определить тяжесть последствий каждого сценария; 4) рассчитать риск как произведение ве-

роятности наступления сценария и тяжести его последствий. Кроме того, оценка ЭР является лишь первым шагом на пути к обеспечению экологической безопасности строительства. Необходимо также разрабатывать и внедрять меры по снижению ЭР до приемлемого уровня. Авторами приведены меры по снижению вероятности опасности и меры по снижению последствий опасности при строительстве.

Таким образом, в ходе исследования предлагается новый комбинированный метод оценки ЭР в строительстве, сочетающий в себе количественную оценку на основе теории вероятностей, полуколичественный подход с использованием матриц рисков и качественный анализ на основе сценариев. Этот метод позволяет получить более полную и точную оценку риска, учитывая различные потенциальные сценарии и их последствия, а также неопределенность, присущую прогнозированию экологических рисков. Применение метода демонстрируется на примерах строительных проектов, показывая, как результаты оценки риска могут быть использованы для принятия решений по управлению проектами и снижению рисков. Разработанный метод оценки ЭР дает возможность повысить эффективность управления экологической безопасностью в сфере жилищного и промышленного строительства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Vinogradova N., Kravchenko D., Kurochkina V.V. Impact of construction activities on the environment of cities // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 937. Issue 4. P. 042019. DOI: 10.1088/1755-1315/937/4/042019

2. Yamagami M., Ikemori F., Nakashima H., Hisatsune K., Ueda K., Wakamatsu S. et al. Trends in PM_{2.5} concentration in Nagoya, Japan, from 2003 to 2018 and impacts of PM_{2.5} countermeasures // Atmosphere. 2021. Vol. 12. Issue 5. P. 590. DOI: 10.3390/atmos12050590

3. Desouza C.D., Marsh D.J., Beevers S.D., Molden N., Green D.C. A spatial and fleet disaggregated approach to calculating the NOX emissions inventory for non-road mobile machinery in London // Atmospheric Environment: X. 2021. Vol. 12. P. 100125. DOI: 10.1016/j.aeaao.2021.100125

4. Кравцова М.В., Васильев А.В., Нагайцева М.П., Кравцов А.В. Номенклатурный анализ объемов образования отходов строительства и сноса // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. № 4–4. С. 810–816. EDN WTPZXZ.

5. Костюченко Е. «Норникель» прямо сейчас сливает ядовитые отходы в озеро Пясино. Спецкоры «Новой» и «Гринпис» передают с места событий // Новая газета от 28.06.2020.

6. Яковенко Д., Ляlikова А. «Мы болеем и умираем»: чего добился «Норникель», потратив десятки миллиардов рублей на экологию // Forbes. 2020. URL:

<https://www.forbes.ru/milliardery/405047-my-boleem-i-umiraem-chego-dobilysya-nornikel-potrativ-desyatki-milliardrov-rublej?ysclid=lq7q54qva3309658738>

7. Kurochkina V.V. Formation of depressive areas in the area of quarries and mines on the example of the city of Bakal // Lecture Notes in Networks and Systems. 2023. Vol. 575. Pp. 1–12. DOI: 10.1007/978-3-031-21219-2_1

8. Рыжанушкина Ю.А., Габрин К.Э. Эколого-ориентированный подход к управлению инновационным развитием регионального строительного комплекса // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. 2018. Т. 12. № 1. С. 133–141. DOI: 10.14529/em180116. EDN YTMJPW.

9. Шубина Е.В., Жук П.М., Потапов А.Д. Методы оценки экологических рисков в строительстве // Вестник МГСУ. 2009. № 2. С. 143–147. EDN KYKZKP.

10. Смирнова О.П., Вавилова М.А. Методические подходы к управлению рисками при внедрении системы экологического менеджмента на промышленном предприятии // Вестник Академии знаний. 2023. № 1 (54). С. 409–415. EDN TPKIRS.

11. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М. : Айрис-пресс, 2012.

12. Meadows D.H., Randers J., Meadows D.L. Limits to Growth. The 30-Year Update. London : Earthscan, 2006.

13. Balsalobre-Lorente D., Nur T., Topaloglu E.E., Evcimen C. The dampening effect of geopolitical risk and economic policy uncertainty in the linkage between economic complexity and environmental degradation in the G-20 // *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 351. P. 119679. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119679
14. Smirnova E. Environmental risk analysis in construction under uncertainty // *Reconstruction and Restoration of Architectural Heritage*. 2020. Pp. 222–227. DOI: 10.1201/9781003129097-47
15. Nezhnikova E., Larionov A., Smirnova E. Ecological risk assessment to substantiate the efficiency of the economy and the organization of construction // *Human and Ecological Risk Assessment*. 2021. Vol. 27. Issue 8. Pp. 2069–2079. DOI: 10.1080/10807039.2021.1949262
16. Moazeni M., Ebrahimpour K., Mohammadi F., Heidari Z., Ebrahimi A. Human health risk assessment of Triclosan in water: Spatial analysis of a drinking water system // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2023. Vol. 195. Issue 10. DOI: 10.1007/s10661-023-11789-3
17. Nguyen H.D., Macchion L. Risk management in green building : a review of the current state of research and future directions // *Environment, Development and Sustainability*. 2022. Vol. 25. Issue 3. Pp. 2136–2172. DOI: 10.1007/s10668-022-02168-y
18. Smirnova E. The use of the Monte Carlo method for predicting environmental risk in construction zones // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1614. Issue 1. P. 012083. DOI: 10.1088/1742-6596/1614/1/012083
19. Kalia A., Gill S. Corporate governance and risk management: A systematic review and synthesis for future research // *Journal of Advances in Management Research*. 2023. Vol. 20. Issue 3. Pp. 409–461. DOI: 10.1108/JAMR-07-2022-0151
20. Jamalnia A., Gong Y., Govindan K., Bourlakis M., Mangla S.K. A decision support system for selection and risk management of sustainability governance approaches in multi-tier supply chain // *International Journal of Production Economics*. 2023. Vol. 264. P. 108960. DOI: 10.1016/j.ijpe.2023.108960
21. Wang X., Bouzembrak Y., Oude Lansink A.G.J.M., van der Fels-Klerx H.J. Weighted Bayesian network for the classification of unbalanced food safety data: Case study of risk-based monitoring of heavy metals // *Risk Analysis*. 2023. Vol. 43. Issue 12. Pp. 2549–2561. DOI: 10.1111/risa.14120
22. Proto R., Recchia G., Dryhurst S., Freeman A.L.J. Do colored cells in risk matrices affect decision-making and risk perception? Insights from randomized controlled studies // *Risk Analysis*. 2023. Vol. 43. Issue 10. Pp. 2114–2128. DOI: 10.1111/risa.14091
23. Смирнова Е.Э. Оценка рисков в российских и международных стандартах безопасности и устойчивого развития // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2023. № 1 (46). С. 57–71. EDN OFRJSZ.
24. Теличенко В.И., Слесарев М.Ю. Проблема и решение системы оценки экологической безопасности строительства в мегаполисе // *Экология урбанизированных территорий*. 2013. № 1. С. 13–17. EDN PZTSLL.
25. Slesarev M., Kovrigin A., Kafanova J. Mathematical and mental modeling for ecological reconstruction of the environment of construction objects // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 869. Issue 6. P. 062017. DOI: 10.1088/1757-899X/869/6/062017
26. Slesarev M. Modeling and formation of environmental safety management systems of construction technologies // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 258. P. 09084. DOI: 10.1051/e3sconf/202125809084
27. Smirnova E., Larionov A., Shkarovskiy A. Risk management model in ISO-standards as the implementation of environmental safety for housing construction // *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2023. Vol. 25. Pp. 282–288. DOI: 10.54740/ros.2023.030
28. Larionov A., Nezhnikova E., Smirnova E. Risk assessment models to improve environmental safety in the field of the economy and organization of construction: A case study of Russia // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Issue 24. P. 13539. DOI: 10.3390/su132413539
29. Zhang Z., Gong J., Plaza A., Yang J., Li J., Tao X. et al. Long-term assessment of ecological risk dynamics in Wuhan, China: Multi-perspective spatiotemporal variation analysis // *Environmental Impact Assessment Review*. 2024. Vol. 105. P. 107372. DOI: 10.1016/j.eiar.2023.107372
30. Aven T., Renn O. Risk Management and Governance. Berlin, Heidelberg : Springer, 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-13926-0
31. Kaplan S., Garrick B.J. On the quantitative definition of risk // *Risk Analysis*. 1981. Vol. 1. Issue 1. Pp. 11–27. DOI: 10.1111/J.1539-6924.1981.TB01350.X
32. Смирнова Е.Э. Экологические стандарты управления качеством окружающей среды. СПб. : СПбГАСУ, 2023.
33. Моисеенкова Т.А., Хаскин В.В. Методика расчета экологической техноёмкости территории (к проекту 2.5.6.). М. : Российская экономическая академия им. Г.В. Плеханова, 1992.
34. Теличенко В.И., Ланидус А.А., Слесарев М.Ю. Анализ и синтез образов экологически ориентированных инновационных технологий строительного производства // *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18. № 8. С. 1298–1305. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1298-1305. EDN RNDOCL.
35. Реймерс Н.Ф. Природопользование : словарь-справочник. М. : Мысль, 1990. 637 с.
36. Никулина Н.Л. Проблемы оценки экологической безопасности региона // *Экономика региона*. 2008. № S4. С. 62–67. EDN JWWVPZ.

Поступила в редакцию 11 января 2024 г.

Принята в доработанном виде 10 октября 2024 г.

Одобрена для публикации 14 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Аркадий Николаевич Ларионов** — доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой экономики и управления в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 655750, Scopus: 55817390000, ResearcherID: I-2797-2013, ORCID: 0000-0001-9706-5131; proflarionov@mail.ru;

Елена Эдуардовна Смирнова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры техносферной безопасности; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);** 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 438628, Scopus: 57074849400, ResearcherID: ABG-5327-2021, ORCID: 0000-0002-9860-9230; esmirnovae@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Vinogradova N., Kravchenko D., Kurochkina V.V. Impact of construction activities on the environment of cities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 937(4):042019. DOI: 10.1088/1755-1315/937/4/042019
2. Yamagami M., Ikemori F., Nakashima H., Hisatsune K., Ueda K., Wakamatsu S. et al. Trends in PM_{2.5} concentration in Nagoya, Japan, from 2003 to 2018 and impacts of PM_{2.5} countermeasures. *Atmosphere*. 2021; 12(5):590. DOI: 10.3390/atmos12050590
3. Desouza C.D., Marsh D.J., Beevers S.D., Molden N., Green D.C. A spatial and fleet disaggregated approach to calculating the NOX emissions inventory for non-road mobile machinery in London. *Atmospheric Environment: X*. 2021; 12:100125. DOI: 10.1016/j.aeaoa.2021.100125
4. Kravtsova M., Vasilyev A., Nagaytseva M., Kravtsov A. Nomenclatural analysis of volumes of waste construction and dismantling. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2015; 17(4-4): 810-816. EDN WTPXZX. (rus.).
5. Kostyuchenko E. Norilsk Nickel is right now dumping toxic waste into Lake Pyasino. Special correspondents from Novaya and Greenpeace report from the scene. *New newspaper* dated of 28.06.2020.
6. Yakovenko D., Lyalikova A. "We are sick and dying": What Norilsk Nickel achieved by spending tens of billions of rubles on the environment. *Forbes* dated of 04.08.2020. URL: <https://www.forbes.ru/milliardery/405047-my-boleem-i-umiraem-chego-dobil-sya-nornikel-potrativ-desyatki-milliardov-rublej?ysclid=lq7q54qva3309658738>
7. Kurochkina V.V. Formation of depressive areas in the area of quarries and mines on the example of the city of Bakal. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023; 575:1-12. DOI: 10.1007/978-3-031-21219-2_1
8. Ryzhanushkina Yu.A., Gabrin K.E. Environmentally oriented approach to management of innovative development of regional construction complex. *Bulletin of SUSU. Series "Economics and Management"*. 2018; 12(1):133-141. DOI: 10.14529/em180116. EDN YTMJPW. (rus.).
9. Shubina Ye.V., Zhuk P.M., Potapov A.D. Methods for assessing environmental risks in construction. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2009; 2:143-147. EDN KYKZKP. (rus.).
10. Smirnova O.P., Vavilova M.A. Methodological approaches to risk management in the implementation of an environmental management system at an industrial enterprise. *Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2023; 1(54):409-415. EDN TPKIRS. (rus.).
11. Vernadskiy V.I. *Biosphere and noosphere*. Moscow, Iris-press, 2012. (rus.).
12. Meadows D.H., Randers J., Meadows D.L. *Limits to Growth. The 30-Year Update*. London, Earthscan, 2006.
13. Balsalobre-Lorente D., Nur T., Topaloglu E.E., Evcimen C. The dampening effect of geopolitical risk and economic policy uncertainty in the linkage between economic complexity and environmental degradation in the G-20. *Journal of Environmental Management*. 2024; 351:119679. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119679
14. Smirnova E. Environmental risk analysis in construction under uncertainty. *Reconstruction and Restoration of Architectural Heritage*. 2020; 222-227. DOI: 10.1201/9781003129097-47
15. Nezhnikova E., Larionov A., Smirnova E. Ecological risk assessment to substantiate the efficiency of the economy and the organization of construction. *Human and Ecological Risk Assessment*. 2021; 27(8):2069-2079. DOI: 10.1080/10807039.2021.1949262
16. Moazeni M., Ebrahimpour K., Mohammadi F., Heidari Z., Ebrahimi A. Human health risk assessment of Triclosan in water: Spatial analysis of a drinking water system. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2023; 195(10). DOI: 10.1007/s10661-023-11789-3
17. Nguyen H.D., Macchion L. Risk management in green building : a review of the current state of research

and future directions. *Environment, Development and Sustainability*. 2022; 25(3):2136–2172. DOI: 10.1007/s10668-022-02168-y

18. Smirnova E. The use of the Monte Carlo method for predicting environmental risk in construction zones. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1614(1):012083. DOI: 10.1088/1742-6596/1614/1/012083

19. Kalia A., Gill S. Corporate governance and risk management : a systematic review and synthesis for future research. *Journal of Advances in Management Research*. 2023; 20(3):409–461. DOI: 10.1108/JAMR-07-2022-0151

20. Jamalnia A., Gong Y., Govindan K., Bourlakis M., Mangla S.K. A decision support system for selection and risk management of sustainability governance approaches in multi-tier supply chain. *International Journal of Production Economics*. 2023; 264:108960. DOI: 10.1016/j.ijpe.2023.108960

21. Wang X., Bouzemrak Y., Oude Lansink A.G.J.M., van der Fels-Klerx H.J. Weighted Bayesian network for the classification of unbalanced food safety data: Case study of risk-based monitoring of heavy metals. *Risk Analysis*. 2023; 43(12):2549–2561. DOI: 10.1111/risa.14120

22. Proto R., Recchia G., Dryhurst S., Freeman A.L.J. Do colored cells in risk matrices affect decision-making and risk perception? *Insights from randomized controlled studies*. *Risk Analysis*. 2023; 43(10):2114–2128. DOI: 10.1111/risa.14091

23. Smirnova E.E. Risk assessment in Russian and international safety and sustainable development standards. *Modern Problems of Civil Protection*. 2023; 1(46):57–71. EDN OFRJSZ. (rus.).

24. Telichenko V.I., Slesarev M.Yu. System of assessment of ecological safety of construction processes in the megalopolis: problem and solution. *Ecology of Urban Areas*. 2013; 1:13–17. EDN PZTSLL. (rus.).

25. Slesarev M., Kovrigin A., Kafanova J. Mathematical and mental modeling for ecological reconstruction of the environment of construction objects. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 869(6):062017. DOI: 10.1088/1757-899X/869/6/062017

26. Slesarev M. Modeling and formation of environmental safety management systems of construction

technologies. *E3S Web of Conferences*. 2021; 258:09084. DOI: 10.1051/e3sconf/202125809084

27. Smirnova E., Larionov A., Shkarovskiy A. Risk management model in ISO-standards as the implementation of environmental safety for housing construction. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2023; 25:282–288. DOI: 10.54740/ros.2023.030

28. Larionov A., Nezhnikova E., Smirnova E. *Risk assessment models to improve environmental safety in the field of the economy and organization of construction: A case study of Russia*. *Sustainability*. 2021; 13(24):13539. DOI: 10.3390/su132413539

29. Zhang Z., Gong J., Plaza A., Yang J., Li J., Tao X. et al. Long-term assessment of ecological risk dynamics in Wuhan, China: Multi-perspective spatio-temporal variation analysis. *Environmental Impact Assessment Review*. 2024; 105:107372. DOI: 10.1016/j.eiar.2023.107372

30. Aven T., Renn O. *Risk Management and Governance*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-13926-0

31. Kaplan S., Garrick B.J. *On the quantitative definition of risk*. *Risk Analysis*. 1981; 1(1):11–27. DOI: 10.1111/J.1539-6924.1981.TB01350.X

32. Smirnova E.E. *Environmental standards for environmental quality management*. St. Petersburg, SPbGASU, 2023. (rus.).

33. Moiseyenkova T.A., Khaskin V.V. *Methodology for calculating the environmental technical intensity of a territory (to project 2.5.6.)*. Moscow, Russian Economic Academy named after G.V. Plekhanov, 1992. (rus.).

34. Telichenko V.I., Lapidus A.A., Slesarev M.Yu. Analysis and synthesis of images of environmentally oriented innovative technologies of construction production. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(8):1298–1305. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1298-1305. EDN RNDACL. (rus.).

35. Reymers N.F. *Nature Management: Dictionary-reference Book*. Moscow, Mysl, 1990; 637. (rus.).

36. Nikulina N.L. Problems of the estimation of ecological safety of region. *Economy of Regions*. 2008; S4:62–67. EDN JWVWPZ. (rus.).

Received January 11, 2024.

Adopted in revised form on October 10, 2024.

Approved for publication on October 14, 2024.

B I O N O T E S : **Arkady N. Larionov** — Doctor of Economic Sciences, Professor, Head of the Department of Economics and Management in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 655750, Scopus: 55817390000, ResearcherID: I-2797-2013, ORCID: 0000-0001-9706-5131; proflarionov@mail.ru;

Elena E. Smirnova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technosphere Safety; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeiskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RSCI: 438628, Scopus: 57074849400, ResearcherID: ABG-5327-2021, ORCID: 0000-0002-9860-9230; esmirnovae@yandex.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the publication.

The authors declare no conflict of interest.