

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ РИСКОВ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ

У. С. Постникова¹, В. В. Москвичев²

¹ Институт машиноведения имени А. А. Благонравова РАН (Москва, Российская Федерация)

² Красноярский филиал Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий (Красноярск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 19 июня 2025 г.

Для цитирования

Постникова У. С., Москвичев В. В. Оценка и прогнозирование техногенных рисков арктических территорий Красноярского края при реализации инвестиционных проектов // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 16, № 1. — С. ?—?. — DOI: 10.25283/2223-4594-2026-1-?-?.

Освоение арктических территорий России представляет собой приоритетное направление социально-экономического развития и обеспечения национальной безопасности. Арктическая зона Красноярского края характеризуется суровыми природно-климатическими условиями, наличием стратегически важных объектов, а также высокой степенью техногенной, экологической и социальной уязвимости. Рассмотрены региональные особенности арктических территорий Красноярского края, проведена идентификация ключевых источников угроз, включая промышленное освоение и инфраструктурные риски. Предложена методология оценки и прогнозирования реализованных и потенциальных техногенных территориальных рисков с использованием байесовских сетей. Построены вероятностно-графические модели причинно-следственных зависимостей, на основе которых определены муниципальные образования с наиболее высокими уровнями риска. Полученные результаты способствуют формированию научно обоснованных рекомендаций для повышения комплексной безопасности арктических территорий.

Ключевые слова: Арктическая зона Красноярского края, реализованные техногенные риски, потенциальные техногенные риски, вероятностно-графические модели, байесовские сети.

Введение

В рамках социально-экономического развития и обеспечения национальной безопасности России решающее значение имеет освоение арктических территорий, что объясняется рядом факторов¹:

- Арктика является источником более 80% природного газа и 17% нефти, добываемых в стране (по оценкам экспертов, в континентальном шельфе Арктики содержится более 85,1 трлн м³ природного газа и 17,3 млрд т нефти, что делает ее стратегическим ресурсом для развития минерально-сырьевой базы страны);

- существует угроза возникновения в Арктической зоне опасных аварийных событий и катастроф из-за антропогенного воздействия и климатических изменений, как следствие этого — риски для экономической системы страны, экологии и безопасности в целом;
- в Арктической зоне имеются объекты стратегических сил сдерживания, предназначенные для предотвращения агрессии против России и ее союзников.

Основными препятствиями для развития Арктической зоны Российской Федерации являются: сложная транспортная доступность и неблагоприятные природно-климатические условия, включая специфические световые и температурные режимы, вечномерзлые грунты и частые опасные метеорологические явления. Эти факторы негативно сказыва-

¹ Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года. — Указ Президента РФ от 26 октября 2020 г. № 645.

ются на здоровье населения, повышают энергоемкость промышленного производства, увеличивают расходы на поддержание инженерной инфраструктуры и повышают риск аварий и чрезвычайных ситуаций. Арктический ландшафт в настоящее время претерпевает изменения в связи с усилением экологических и антропогенных процессов, которые создают новые риски, но и открывают потенциал для человеческой деятельности в Арктике [1; 2]. Арктическая зона нуждается в научно обоснованном планировании и управлении со стороны лиц, принимающих решения, и инвесторов. Устойчивое развитие арктических регионов осложняется их большой чувствительностью к хозяйственной деятельности, что приводит к высокой актуальности разработки мер, направленных на обеспечение территориальной безопасности. Указанные проблемы и постановки являются предметом активных исследований как в России [1—6], так и за рубежом [7—9]. В последнее десятилетие особое внимание акцентируется на оценках рисков социально-экономического развития жизнедеятельности и освоения Арктической зоны [3]. Применительно к территориям Красноярского края ранее были выполнены исследования общей картины оценки рисков муниципальных образований по данным государственных докладов МЧС России, Ростехнадзора, Росприроднадзора и других структур [4], даны предварительные оценки рисков нефтегазодобывающих территорий, уровня безопасности ГЭС Ангаро-Енисейского каскада, системы мониторинга экологической безопасности Норильской промышленной зоны [5]. После экологической катастрофы на Норильской нефтебазе в 2020 г. [10] рядом крупных финансовых промышленных групп («Норникель»², «Газпром»³, «Транснефть»⁴) разработаны планы и программы по снижению рисков аварийных ситуаций и повышению защищенности объектов Арктической зоны от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Однако эти мероприятия имеют недостаточное научное обеспечение и принимаются без комплексного анализа территорий и часто без учета требований рискориентированного подхода, как предполагают соответствующие нормативные документы федерального

уровня⁵. Обеспечение устойчивого развития арктических территорий возможно при учете и анализе факторов опасности, разработке стратегий, направленных на минимизацию рисков, сохранение экосистем и поддержку социального благополучия населения региона.

Цель работы — прогнозирование техногенных рисков Арктической зоны Красноярского края в условиях многофакторных воздействий (усиленного освоения, реализации инвестиционных проектов).

Арктическая зона Красноярского края включает четыре муниципальных образования: город Норильск, Таймырский Долгано-Ненецкий, Туруханский, Эвенкийский районы. Общая площадь Арктической зоны края — 1093,77 тыс. км², там проживают более 220 тыс. человек⁶. Устойчивое развитие и безопасность арктических территорий подвергаются воздействию ряда опасных факторов, обусловленных природно-климатическими особенностями, перспективами промышленного освоения, урбанизацией и наличием опасных промышленных объектов. К ключевым из них относятся [11]:

1. Природно-климатические факторы:

- Экстремальные климатические условия (климат территории относится к абсолютно дискомфортной зоне): низкие температуры (среднегодовая температура января составляет -50°C), сильные ветры и продолжительная полярная ночь, значительная часть территории — ледники и вечная мерзлота (до 46,2% общей площади Красноярского края) создают сложности для жизни и хозяйственной деятельности в регионе. Кроме того, высокая сезонная изменчивость погоды увеличивает вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций.
- Изменение климата: потепление в Арктике приводит к таянию вечной мерзлоты, что вызывает деформацию объектов гражданской и промышленной инфраструктуры, повышает риск наводнений и изменяет экосистемы.
- Природные катастрофы: арктический регион подвержен таким явлениям, как ледяные штормы, снегопады, паводки и обвалы берегов, что представляет угрозу для населения и промышленной деятельности.

2. Экологические риски при промышленном освоении:

- Загрязнение окружающей среды в результате активного промышленного освоения: добыча полезных ископаемых, топливная (нефтегазовая), металлургическая, пищевая промышленность, про-

² Белая книга о ликвидации последствий аварии на ТЭЦ-3 АО «НТЭК» и мерах, принятых в компании (<https://nornickel.ru/files/ru/investors/white-paper-2020.pdf>).

³ СТО Газпром 18000.1-002-2020. Единая система управления производственной безопасностью. Идентификация опасностей и управление рисками в области производственной безопасности (<https://invest.gazprom.ru/d/textpage/4b/75/04-sto-gazprom-18000.1-002-2020-esupb-identifikatsiya-opasnostej.pdf?ysclid=mism1qxt7k535761427>).

⁴ Транснефть. Отчет об устойчивом развитии 2020 (https://finance.transneft.ru/upload/iblock/e15/harowemjwak47jwdpp81lduvso5wuszh/sustainable_development_2020.pdf?ysclid=mism3bfm2434201100).

⁵ Указ Президента РФ «Об утверждении Основ государственной политики Российской Федерации в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций на период до 2030 года» от 11 января 2018 г. № 12.

⁶ Стратегия социально-экономического развития северных и арктических территорий и поддержки коренных малочисленных народов Красноярского края до 2035 года. – Утв. распоряжением Правительства Красноярского края от 3 февраля 2023 г. № 81-р.

Проблемы регионов

- изводство и распределение электроэнергии, газа, воды, промышленные объекты увеличивают риск разливов нефти, выбросов вредных веществ и накопления отходов, что негативно сказывается на хрупких арктических экосистемах.
- Нарушение экосистем: строительство и эксплуатация промышленных объектов могут привести к разрушению мест обитания диких животных и изменению природных ландшафтов.
 - Активное судоходство: рост судоходства по Северному морскому пути приводит к риску аварий, разливов нефтепродуктов, разрушению береговых линий и негативно влияет на морские экосистемы.
 - 3. Урбанизация и социальные факторы:
 - Давление на инфраструктуру: рост городов в Арктике требует развития инфраструктуры, что со-пряжено с экологическими рисками и высокими затратами. Строительство дорог, мостов и коммуникаций на вечной мерзлоте требует специальных технологий и постоянного мониторинга состояния объектов.
 - Доступ к медицинским услугам затрудняют отдаленность населенных пунктов и сложные климатические условия, что повышает риск заболеваний и эпидемий, особенно в условиях изменения климата.
 - 4. Опасные промышленные объекты:
 - Риски аварий: наличие потенциально опасных объектов повышает вероятность аварий, способных нанести значительный ущерб окружающей среде и здоровью населения.

- Системы жизнеобеспечения: экстремальные климатические условия требуют бесперебойной работы систем электро-, тепло- и водоснабжения. Аварии на этих объектах могут повлечь за собой серьезные последствия вплоть до необходимости эвакуации населения.
- Угроза загрязнения воздуха: выбросы промышленных предприятий, транспортных средств и энергетических объектов могут ухудшать качество воздуха, что особенно опасно в условиях низких температур и ограниченной вентиляции в зимний период.

Большая часть арктических территорий только подлежит освоению, основная хозяйственная деятельность сконцентрирована в населенных пунктах и вдоль линейных объектов транспортной инфраструктуры. До 2035 г. на территориях Арктической зоны Красноярского края планируется 8 различных инвестиционных проектов на общую сумму более 10 трлн руб. (табл. 1).

Климатические особенности, техногенная нагрузка, активное хозяйственное освоение могут привести к дестабилизации природной системы, возникновению опасных и чрезвычайных ситуаций, экологическим проблемам и снижению качества жизни человека в экстремальных условиях проживания. Таким образом, приоритетная задача — обе-

Таблица 1. Перечень инвестиционных проектов, направленных на развитие арктических территорий Красноярского края

Table 1. The list of investment projects aimed at the development of the Arctic zone of the Krasnoyarsk Territory

№	Инвестиционный проект	Направление	Муниципальное образование	Инвестиции, млн руб.
1	Строительство новых добывающих мощностей и модернизация шахты «Заполярная» («Южный кластер») (ПАО «ГМК «Норильский Никель»)	Добыча полезных ископаемых (благородные металлы)	Город Норильск	90 473
2	Модернизация и расширение мощностей Талнахской обогатительной фабрики (ПАО «ГМК «Норильский никель»)	Добыча полезных ископаемых (цветные и благородные металлы)	То же	75 000
3	Реализация комплексного экологического проекта «Серный проект 2.0» (ПАО «ГМК «Норильский никель»)	То же	»	123 189
4	Разработка месторождений металлов платиновой группы Черногорское и Норильск-1 (южная часть) (ООО «Русская Платина»)	»	»	521 000
5	Многофункциональный туристический комплекс «Затундра» (ПАО «Горно-металлургическая компания «Норильский никель», ООО «Васта Дискавери»)	Туризм	Таймырский Долгано-Ненецкий муниципальный район	20 000

Окончание табл. 1

№	Инвестиционный проект	Направление	Муниципальное образование	Инвестиции, млн руб.
6	Восточный путь на Северный полюс (Barneo AG, ООО «Барнео», Красноярское краевое отделение Русского географического общества)	»	То же	320
7	Инвестиционный проект «Восток Ойл» по освоению нефтегазовых месторождений и строительству промышленной инфраструктуры (ООО «Восток Ойл»)	Добыча полезных ископаемых (нефть и газ)	»	9 888 000
8	Освоение Сырадасайского угольного месторождения (ООО «Северная звезда»)	Добыча полезных ископаемых (уголь)	»	33 820

Примечание. Составлено авторами на основе «Стратегии социально-экономического развития северных и арктических территорий и поддержки коренных малочисленных народов Красноярского края до 2035 года».

Note. Compiled by the authors on the basis of the “Strategy for the socio-economic development of the northern and Arctic territories and support for the indigenous peoples of the Krasnoyarsk Territory until 2035”.

спечение комплексной безопасности территорий регионов холодного климата.

Методы исследования

Безопасность территории определяется отсутствием или минимальным влиянием поражающих факторов на жизнь и здоровье населения, окружающую природную среду, стратегически, критически важные объекты и объекты технического регулирования. Техногенная безопасность обычно рассматривается как совокупность мероприятий, направленных на предотвращение или снижение ущерба от поражающих факторов аварий.

Анализ территориальной техногенной безопасности осуществляется в три этапа.

Первый этап. Оценка уязвимости территории включает идентификацию опасных факторов на основе статистических данных^{7,8} и анализа нормативных документов, устанавливающих основные приоритеты развития⁹.

Второй этап. Оценка текущих рисков, связанная с расчетом и визуализацией рисков и причин их возникновения, включая реализованные риски (те, что уже произошли и привели к материальному ущербу, такие как крупные транспортные аварии, промышленные пожары, взрывы и пр.) и потенциальные риски (те, что могут произойти из-за наличия и функционирования потенциально опасных объектов), а также последующее выявление основных причин возникновения опасных событий.

Для оценки реализованных рисков используется классическая формула [12]. Оценка потенциальных рисков при возникновении аварий на опасных про-

изводственных объектах основывается на суммировании среднего показателя вероятности опасного события и соответствующих условиям поправочных коэффициентов [13]. Полученная таким способом уточненная вероятность умножается на возможный ущерб:

$$P_i^* = x \cdot 10^{-(N_i + n_1 + n_2 + n_3)} U_i^*,$$

где P_i^* — уточненная вероятность наступления определенного опасного фактора с учетом поправочных коэффициентов; x — значение целой части средней вероятности P_i^* ; N_i — показатель дробной части средней вероятности (например, если средняя вероятность опасного события равна $2 \cdot 10^{-4}$, то $x = 2$, а $N_i = -4$); n_1 — поправка на категорию риска чрезвычайных ситуаций (табл. 2); n_2 — поправка на категорию риска охраны труда (табл. 2); n_3 — поправка, учитывающая наличие или отсутствие аварийно-спасательного формирования (табл. 2); U_i^* — возможный ущерб при реализации аварийной ситуации.

Для определения причинно-следственных связей как для реализованных, так и для потенциальных рисков предлагается использовать байесовский подход [14]. Байесовские сети представляют собой графические модели событий и процессов на основе объединения математического аппарата теории вероятностей и теории графов [15]. Байесовский метод представляет собой удобный инструмент для анализа сложных процессов и событий, связанных с неопределенностью.

Байесовская сеть доверия представляет собой направленный ациклический граф. Граф записывается как набор условий независимости: каждая переменная независима от ее основного события, при таких условиях вероятность события вершины

⁷ <https://rosstat.gov.ru/folder/10705>,

⁸ <https://mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii>,

⁹ Стратегия социально-экономического развития...

Таблица 2. Значения поправочных коэффициентов

Table 2. Correction factor values

Категория риска чрезвычайных ситуаций		Категория риска охраны труда		Обеспеченность аварийно-спасательными формированиями	
Уровень	Значение n_1	Уровень	Значение n_2	Показатель	Значение n_3
Низкий	-1	Низкий	-1	Наличие	-1
Умеренный	0	Умеренный	0	Отсутствие	1
Средний	0,5	Средний	0,5		
Значительный	0,75	Значительный	0,75		
Высокий	1	Высокий	1		

Примечание. Составлено авторами на основе статистических данных МЧС России, Роструда и Ростехнадзора.

Note. Compiled by the authors on the basis of statistical data from the Ministry of Emergency Situations of Russia, Rostrud and Rostechnadzor.

будет рассчитываться с помощью формулы полной вероятности

$$P(A) = P(B_1)P(A|B_1) + \\ + P(B_2)P(A|B_2) + \dots + P(B_n)P(A|B_n),$$

где $P(A)$ — полная вероятность случайного события при условии, что B_1, B_2, \dots, B_n — полная группа попарно несовместных событий и их объединение совпадает с пространством элементарных событий проводимого испытания; $P(A|B_i)$ — условная вероятность (вероятность наступления события A при условии B_i); $P(B_1, \dots, B_n)$ — априорная, или безусловная, вероятность наступления события B_1, \dots, B_n .

По определению условной вероятности вероятность произведения каждого составляющего можно представить как

$P(AB_i) = P(A|B_i)P(B_i)$ при $i = 1, \dots, n$, а значит, полная вероятность события записывается в виде $P(A) = \sum_{i=1}^n P(A|B_i)P(B_i)$. Для расчета условных вероятностей определенного события $P(A|B_i)$ вводится формула Байеса

$$P(A|B_i) = P(B_i)P(A|B_i) \left[P(B_1)P(A|B_1) + \right. \\ \left. + P(B_2)P(A|B_2) + \dots + P(B_n)P(A|B_n) \right]^{-1},$$

где $P(B_i)$ — априорная, или безусловная, вероятность наступления события B_i , где $i = 1, \dots, n$.

Третий этап. Оценка будущих потенциальных рисков, включающая сбор информации об инвестиционных проектах, реализуемых на рассматриваемой территории, и их влиянии на уровень потенциально-го техногенного риска.

Результаты исследования

На рис. 1 представлено ранжирование территорий по уровню техногенного реализованного и потенциального риска.

При оценке техногенного реализованного риска высокие значения получены для Таймырского Долгано-Ненецкого, Эвенкийского, Туруханского и Богочанского районов, потенциальные — для города Норильск, Таймырского Долгано-Ненецкого, Эвенкийского, Кежемского районов.

Для каждого вида риска были построены вероятностно-графические модели причинно-следственных связей. Представленные вероятностно-графические модели могут дополняться новыми переменными и зависимостями, учитывать частные случаи и специфику производства и территории. На рис. 2 представлена вероятностно-графическая модель причин, влияющих на реализованный техногенный риск. Модель построена с использованием академической версии программного обеспечения «BayesFusion, LLC» (<http://www.bayesfusion.com/>).

При расчете техногенного реализованного риска вероятность возникновения опасного техногенного события суммировалась с вероятностью возникновения чрезвычайной ситуации; таким образом, в случае техногенного опасного события вероятность варьируется от $5,5 \cdot 10^{-5}$ до $6,6 \cdot 10^{-4}$, а вероятность чрезвычайной ситуации в среднем составляет $3,3 \cdot 10^{-5}$. По данным МЧС России, ущерб при наступлении опасного техногенного события варьируется от 500 тыс. до 200 млн руб., при наступлении чрезвычайной ситуации техногенного характера — от 200 млн до 32 млрд руб.

В табл. 3 представлены значения техногенного реализованного риска по причинам для муниципальных образований Арктической зоны Красноярского края.

При анализе причин, связанных с реализацией техногенных опасностей, основной вклад для каж-

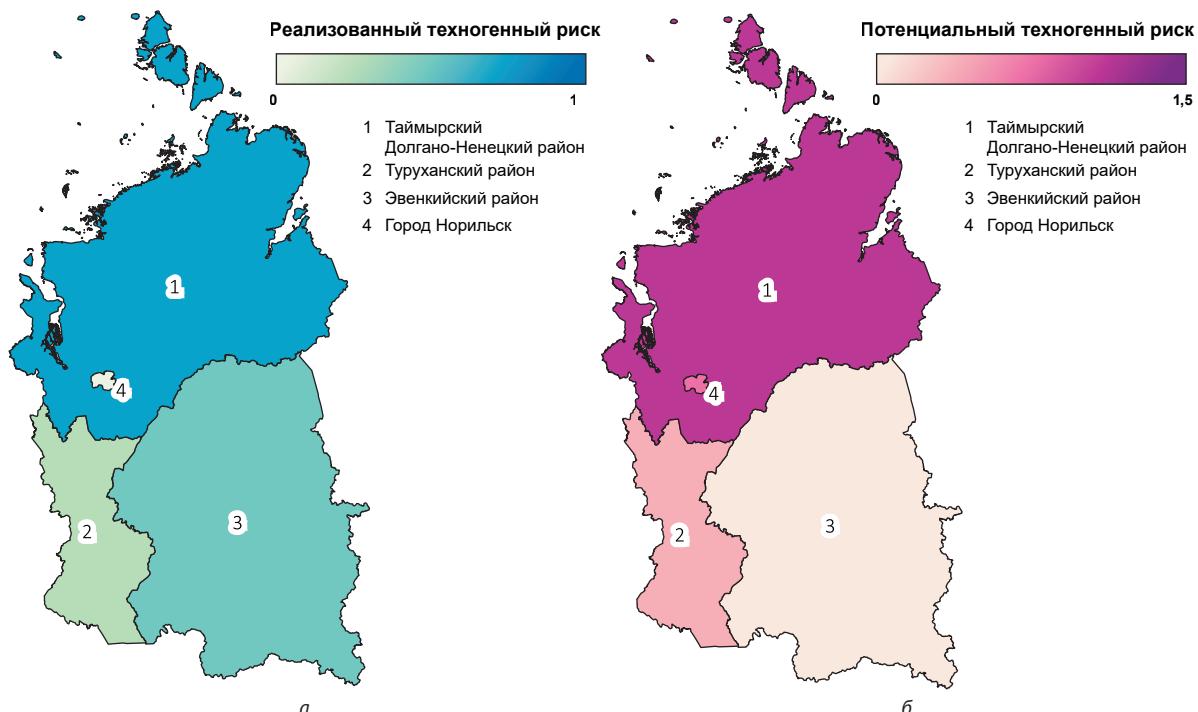
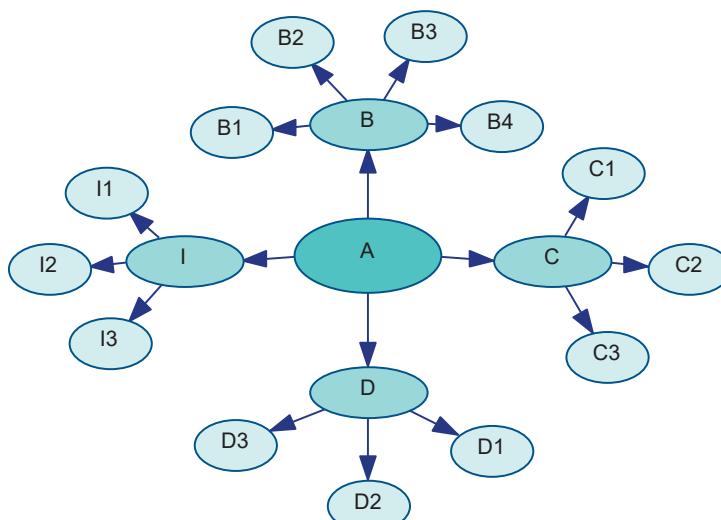


Рис. 1. Ранжирование Арктической зоны Красноярского края по уровню риска: а – техногенный реализованный риск, год⁻¹·млн руб.; б – техногенный потенциальный риск, год⁻¹·млн руб. Составлено авторами по результатам расчетов на основе статистических данных МЧС России с использованием программного обеспечения Qgis

Fig. 1. Ranking the Arctic zone of the Krasnoyarsk Territory by risk level: а – man-made realized risk, year⁻¹·million rubles; б – man-made potential risk, year⁻¹·million rubles. Compiled by the authors based on the results of calculations according to statistical data from the Russian Emergencies Ministry using Qgis software



Расшифровка обозначений в вероятностно-графической модели

A	Техногенный реализованный риск	CC3	Аварии на пожаровзрывоопасных объектах
B	Системы транспорта	D	Инженерные системы
B1	ДТП	D1	Нарушение водоснабжения
B2	Аварии на воздушном транспорте	D2	Нарушение теплоснабжения
B3	Аварии на водном транспорте	D3	Нарушение электроснабжения
B4	Аварии на железнодорожном транспорте	I	Жилые объекты и с массовым пребыванием людей
C	Промышленные объекты	I1	Пожары
CC1	Аварии на химически опасных объектах	I2	Взрывы
CC2	Аварии на радиационно опасных объектах	I3	Обрушение конструкций

дого муниципального образования вносит сценарий А→I→I1 (возникновение бытовых пожаров и на объектах с массовым пребыванием людей).

Высокий риск фиксируется при реализации сценария А→B (аварии на системах транспорта) для Таймырского Долгано-Ненецкого и Эвенкийского районов. При анализе сценария А→C (аварии на промышленных объектах) наихудшая ситуация наблюдается в Эвенкийском районе (связана с авариями на пожаровзрывоопасных объектах сценария А→C→C3). Наибольшая частота аварии на инженерных сетях сценария А→D зафиксирована в Таймырском Долгано-Ненецком районе. Наихудшая пожарная обстановка сценария А→I выявлена в Таймырском Долгано-Ненецком районе

Рис. 2. Вероятностно-графическая модель техногенного реализованного риска
Fig. 2. Probabilistic and graphical model of man-made realized risk

Проблемы регионов

Таблица 3. Техногенный реализованный риск для муниципальных образований Арктической зоны Красноярского края

Table 3. Man-made realized risk for municipalities of the Krasnoyarsk Territory, Arctic zone

Обозначение сценария	Арктическая зона Красноярского края			
	Город Норильск	Таймырский Долгано-Ненецкий район	Туруханский район	Эвенкийский район
A→B	0,010038469	0,239058548	0,036145	0,0487763
A→B→B1	0,002602566	0,074705796	0	0,0042415
A→B→B2	0,006692313	0,074705796	0,030120837	0,0233281
A→B→B3	0,000371795	0,089646956	0,006024167	0,0190866
A→B→B4	0,000371795	0	0	0,0021207
A→C	0,00521	0,014941159	0,012048	0,0191346
A→C→C1	0,001115385	0	0,003012084	0,0063622
A→C→C2	0,000371795	0	0	0
A→C→C3	0,003717951	0,014941159	0,009036251	0,0127245
A→D	0,00521	0,059764637	0	0,010604
A→D→D1	0,002602566	0	0	0
A→D→D2	0	0	0	0,0021207
A→D→D3	0,002602566	0,059764637	0	0,0084829
A→I	0,03718	0,19423507	0,063253757	0,0996749
A→I→I1	0,036435924	0,19423507	0,063253757	0,0996749
A→I→I2	0,000371795	0	0	0
A→I→I3	0,000371795	0	0	0

Примечание. Составлено авторами по результатам расчетов.

Note. Compiled by the authors based on the results of calculations.

На рис. 3 представлена вероятностно-графическая модель возникновения аварийной ситуации на потенциально опасном объекте, которая включает три основных фактора опасности — технико-технологический, человеческий и влияние окружающей природной среды.

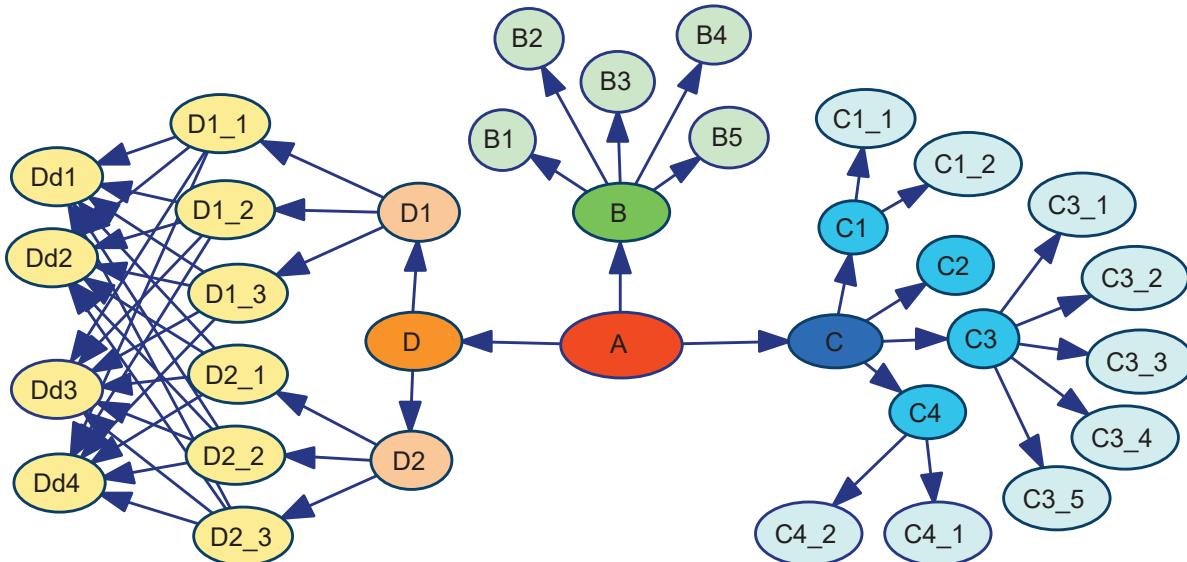
Техногенный потенциальный риск определяется зависимостью вероятности возможных аварий на различных потенциально опасных объектах и возможном ущербе от реализации аварии на рассматриваемой территории.

Величины ущерба, используемые для оценки потенциального техногенного риска, варьируются в зависимости от типа объекта. Так, для гидродинамических опасных объектов средний ущерб равен 68,4 млн руб., для пожаровзрывоопасных ущерб изменяется в пределах от 100 тыс. руб. до 450 млн руб., для химически опасных — от 100 тыс. руб. до 79,03 млн руб.

Гидродинамические опасные объекты функционируют на территории двух муниципальных обра-

зований: города Норильска и Туруханского района. Наибольший потенциальный техногенный риск зафиксирован на территории Туруханского района и равен $1,8 \cdot 10^{-2}$. Высокий риск обусловлен одним из распространенных сценариев аварийной ситуации, а именно неудовлетворительной организацией производства работ A→D→D2→D2_1 в условиях формирования снегозапасов, намного превышающих многолетние значения, что может привести к разрушению напорного фронта, сопровождающемуся образованием прорыва.

Химически опасные объекты функционируют в городе Норильске и Таймырском Долгано-Ненецком районе. Наибольший потенциальный риск возникновения аварийной ситуации на химически опасном объекте определен на территории Норильска и составляет $2,7 \cdot 10^{-2}$, что связано с наличием большего числа рассматриваемых объектов, а также с показателями ущерба при реализации неблагоприятного сценария. Одним из распространенных сценариев аварии является A→D: ошибочные действия персо-



Расшифровка обозначений в вероятностно-графической модели

A	Возникновение аварийной ситуации на потенциально опасном объекте	C3_5	Эксплуатация оборудования за пределами эксплуатационных сроков
B	Фактор окружающей природной среды	C4	Неудовлетворительное состояние зданий, сооружений, территории
B1	Природные пожары	C4_1	Запыленность помещений
B2	Геофизические опасные явления	C4_2	Загазованность помещений
B3	Геологические опасные явления	D	Человеческий фактор
B4	Метеорологические опасные явления	D1	Ошибки оперативного персонала
B5	Гидрологические опасные явления	D1_1	Нарушения требований безопасности
C	Фактор технико-технологический	DD2_1	Нарушения трудового распорядка и дисциплины труда
C1	Конструкционные недостатки и недостаточная надежность технических систем	D1_3	Прочие ошибки
C1_1	Ошибки проектирования	DD2_2	Ошибки должностных лиц
C1_2	Недостатки проектной, конструкторской и другой документации	DD2_1	Неудовлетворительная организация производства работ
C2	Несовершенство технологического процесса	DD2_2	Эксплуатация неисправных технических систем
C3	Нарушения технологического процесса	D2_3	Использование оперативного персонала не по специальности
C3_1	Дефекты вследствие эксплуатации оборудования	Dd1	Опыт
C3_2	Заводские дефекты оборудования	Dd2	Возраст
C3_3	Низкое качество обслуживания технической системы	Dd3	Психофизическое состояние
C3_4	Низкое качество ремонта	Dd4	Образование

Рис. 3. Вероятностно-графическая модель возникновения аварийной ситуации на потенциально опасном объекте
Fig. 3. Probabilistic graphical model of an emergency situation at a potentially dangerous facility

нала в условиях разгерметизации емкости с серной кислотой, что может привести к серьезным последствиям для персонала, повреждение оборудования и коммуникаций и загрязнение почвы и воды, требующее срочной нейтрализации.

Потенциальная радиационная опасность Арктической зоны Красноярского края связана с работой ледоколов с ядерными энергетическими установками, которые в случае наступления аварийной ситуации приведут к значительным последствиям для населения. Потенциальный риск радиационной аварийной ситуации характерен только для трех муниципальных образований Красноярского края: города Норильск, Таймырского Долгано-Ненецкого и Туруханского районов. По данным Ростехнадзора, вероятность возникновения и ущерб для рассматриваемых территорий одинаковы. Ущерб при реализации радиационной аварии начинается от 250 млн

руб. Потенциальный техногенный риск для сценария А→В равен $2,1 \cdot 10^{-4}$, для сценариев А→С и А→Д — соответственно $9 \cdot 10^{-4}$ и $1,89 \cdot 10^{-3}$.

Наибольшую потенциальную опасность представляют пожаровзрывоопасные объекты, что обусловлено преобладанием их (72%) по отношению к другим видам опасных объектов ¹⁰. Пожаровзрывоопасные объекты наиболее уязвимы к возникновению аварийной ситуации, что подтверждается анализом видов источников возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера [12]. Наибольший потенциальный риск возникновения аварийной ситуации на пожаровзрывоопасном объекте выявлен на территории Таймырского Долгано-Ненецкого (риск равен 1,1) и Туруханского (риск равен 0,19) районов. Одной из причин высокого ри-

¹⁰ <https://www.gosnadzor.ru/?ysclid=m9qy0npwon480815921>.

Проблемы регионов

Таблица 4. Изменения потенциального техногенного риска от повышения количества потенциально опасных объектов при реализации инвестиционных проектов

Table 4. Changes in potential man-made risk from an increase in the number of potentially hazardous facilities during the implementation of investment projects

№	Наименование муниципального образования	Количество потенциально опасных объектов на 2025 г.	Количество потенциально опасных объектов при реализации инвестиционных проектов	Будущий потенциальный техногенный риск	Увеличение риска, %
3	Город Норильск	19	4	0,81	2,53
9	Таймырский Долгано-Ненецкий район	11	2	1,12	1,82
10	Туруханский район	18	0	0,24	0
11	Эвенкийский район	6	0	0,06	0

ска является концентрация пожаровзрывоопасных объектов: так, на территории Таймырского Долгано-Ненецкого района функционирует 8 объектов, а на территории Туруханского района — 16. Основные возможные причины возникновения аварийных ситуаций связаны с неудовлетворительной организацией работ, что может привести:

- к взрыву различных контейнеров и емкостей с взрывчатыми веществами и материалами;
- к разгерметизации резервуаров с горюче-смазочными материалами и их воспламенению.

Большая часть арктических территорий только подлежит освоению, как видно из табл. 1. Однако инвестиционные проекты, направленные на развитие арктических территорий Красноярского края, также будут влиять на повышение потенциального техногенного риска и снижение общего уровня безопасности территорий за счет возникновения дополнительных угроз, связанных с увеличением числа потенциально опасных объектов. В табл. 4 представлены перечень функционирующих на данный момент объектов, и их изменение при реализации запланированных инвестиционных проектов.

При анализе будущих рисков от реализации инвестиционных проектов наихудшая ситуация наблюдается в Норильске. Таким образом, при освоении арктических территорий необходимо учитывать существующие высокие риски и проводить мероприятия, направленные на повышение защищенности территории [16], что позволит минимизировать различные виды угроз.

Обсуждение результатов

Развитие арктических территорий требует новых подходов к задачам управления. Устойчивость территории связана с противостоянием различным видам угроз. Переход к устойчивому развитию направлен на обеспечение решения социально-экономических проблем и сохранению благоприятной окружающей среды и природно-ресурсного потенциала.

Проблемы роста угроз как для жизни и здоровья населения, так и для состояния окружающей среды связаны с возрастанием антропогенного воздействия. В обоих случаях получение качественных и количественных оценок риска неблагоприятных ситуаций и воздействий становится ключевой задачей, решение которой определяет качество и эффективность разработки и реализации управленических решений по защите населения и состояния окружающей среды.

В ходе исследования получены следующие результаты.

1. Приведен перечень опасных факторов, влияющих на устойчивое развитие арктических территорий с учетом природно-климатических особенностей, перспектив промышленного освоения, особенностей урбанизации. Перечень факторов служит отправной точкой для оценки допустимых нагрузок, а также для адаптации проектных решений в условиях растущей антропогенной активности.

2. Предложена математическая модель оценки рисков потенциальных и реализованных техногенных рисков арктических территорий Красноярского края на основе байесовского подхода, который позволяет учитывать в моделях несколько переменных одновременно, что обеспечивает им преимущества по сравнению с традиционными стратегиями построения моделей оценки рисков. Разработанные вероятностно-графические модели оценки рисков представляют собой гибкий инструмент поддержки управленических решений и позволяет учитывать неопределенности и актуализировать оценки по мере поступления новых данных, что особенно важно для арктических территорий, где уровень предсказуемости чрезвычайных ситуаций низкий, а последствия — потенциально катастрофические. Модель может использоваться при проведении оценки воздействия на окружающую среду, технико-экономических обоснований и разработки планов реагирования.

3. Ранжирование муниципальных образований Арктической зоны Красноярского края по уров-

нию техногенной опасности с использованием ГИС-технологий обеспечивает пространственную привязку рисков и позволяет выделить критические территории, требующие первоочередного внимания при планировании мер безопасности. Результаты картографирования могут быть интегрированы в региональные и муниципальные информационные системы, использоваться при территориальном планировании, проектировании инфраструктуры.

4. Проведен анализ влияния реализации инвестиционных проектов на уровень потенциального риска, который продемонстрировал необходимость предварительной комплексной экспертизы при реализации новых экономических инициатив в Арктике. Показано, что даже позитивно оцениваемые с экономической точки зрения проекты в Норильске и Таймырском Долгано-Ненецком районе могут существенно повысить уровень техногенной нагрузки на территорию. Это подчеркивает необходимость включения оценки риска в обязательную практику при планировании крупных промышленных и инфраструктурных инициатив в Арктической зоне.

Таким образом, полученные результаты являются не только научно значимыми, но и обладают практической ценностью, позволяя повысить обоснованность управленческих решений, минимизировать риски для населения и окружающей среды, а также содействовать устойчивому и безопасному освоению Арктической зоны Красноярского края.

Выводы

Арктические территории сегодня становятся ключевым вектором роста экономического потенциала страны. Именно поэтому вопросы обеспечения устойчивого и безопасного их развития выходят на передний план. Оценка и снижение рисков становятся не просто научной задачей, а элементом стратегии национальной безопасности.

Ключевое внимание уделяется внедрению количественных методов оценки рисков как основного критерия территориальной безопасности. Такие методы позволяют выявлять потенциальные угрозы, прогнозировать сценарии их развития и обоснованно формировать меры по их минимизации.

Одной из важнейших научных задач становится системная идентификация угроз, способных нарушить устойчивость ключевых связей в социально-природно-экономических структурах [17—19]. Это требует, во-первых, четкого определения приоритетных интересов общества, подверженных потенциальному риску в средне- и долгосрочной перспективе, и, во-вторых, структурирования этих угроз по сферам жизнедеятельности. Совершенствование управления арктическими территориями невозможно без анализа и оценки рисков. Только устойчивое развитие, основанное на стратегическом планировании, детальном анализе рисков, использовании новейших технологий, осуществлении экономически оправданной деятельности и прежде всего на умеренности и бережном отношении к природе, позво-

лит сохранить территории и уникальные экосистемы для будущих поколений [1; 2; 20].

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-79-00015) «Анализ безопасности арктических территорий на основе рискориентированного подхода».

Литература/References

1. Москвичев В. В. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты: Тематический блок «Региональные проблемы безопасности. Раздел I. Мониторинг, риски и безопасность Сибирского федерального округа». — М.: Знание, 2024. — 644 с.
Moskvichev V. V. Safety of Russia. Legal, socio-economic and scientific-technical aspects: Thematic block "Regional safety issues. Section I. Monitoring, risks and security of the Siberian Federal District". Moscow, Knowledge, 2024, 644 p. (In Russian).
2. Москвичев В. В. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты: Тематический блок «Региональные проблемы безопасности. Раздел II: Территориальные риски регионов Сибири. Кузбасс. Енисейская Сибирь. Байкал». — М.: Знание, 2024. — 624 с.
Moskvichev V. V. Safety of Russia. Legal, socio-economic and scientific-technical aspects: Thematic block "Regional safety problems. Section II Territorial risks of Siberian regions. Kuzbass. Yenisei Siberia. Baikal". Moscow, Knowledge, 2024, 624 p. (In Russian).
3. Фортов В. Е., Махутов Н. А., Москвичев В. В., Фомин В. М. Машиностроение России: техника Сибири, Севера и Арктики. — Красноярск: Сибир. федер. ун-т, 2018. — 178 с.
Fortov V. E., Makhutov N. A., Moskvichev V. V., Fomin V. M. Mechanical engineering of Russia: equipment of Siberia, the North and the Arctic. Krasnoyarsk, Siberian Federal Univ., 2018, 178 p. (In Russian).
4. Левкевич В. Е., Лепихин А. М., Москвичев В. В. и др. Безопасность и риски устойчивого развития территорий. — Красноярск: Сибир. федер. ун-т, 2014. — 224 с.
Levkovich V. E., Lepikhin A. M., Moskvichev V. V., Nikitenko P. G., Nicheporchuk V. V., Shaparev N. Ya., Shokin Yu. I. Security and risks of sustainable development of territories. Krasnoyarsk, Siberian Federal Univ., 2014, 224 p. (In Russian).
5. Лепихин А. М., Москвичев В. В., Чернякова Н. А., Ничепорчук В. В. Оценка антропогенных рисков нефтегазодобывающих территорий Сибири // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2013. — № 5. — С. 42—52.
Lepikhin A. M., Moskvichev V. V., Tchernyakova N. A., Nicheporchuk V. V. Man-made risk assessment for oil and gas producing areas of Siberia. Safety and emergencies problem, 2013, no. 5, pp. 42—52. (In Russian).
6. Курило А. Е., Дружинин П. В., Шкиперова Г. Т., Прокопьев Е. А. Социально-экономическое раз-

- вение прибрежных муниципальных районов Беломорья // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 2 (38). — С. 97—108. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-97-108.
- Kurilo A. E., Druzhinin P. V., Shkiperova G. T., Prokopiev E. A. Socio-economic development of coastal municipal areas of the White Sea region. Arctic: Ecology and Economy, 2020, no. 2 (38), pp. 97—108. DOI: 10.25283/22234594-2020-2-97-108. (In Russian).
7. Hjort J., Karjalainen O., Aalto J., Westermann S., Romanovsky V. E., Nelson F. E., Etzelmüller B., Luoto M. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century. Nature Communications, 2018, vol. 9, no. 5147.
8. Karjalainen O., Aalto J., Luoto M., Westermann S., Romanovsky V. E., Nelson F. E., Etzelmüller B., Hjort J. Circumpolar permafrost maps and geohazard indices for near future infrastructure risk assessments. Scientific Data, 2019, vol. 6, no. 190037.
9. Jaskólsk M. W. Challenges and perspectives for human activity in Arctic coastal environments — a review of selected interactions and problems. Miscellanea geographica — regional studies on development, 2021, vol. 25, no. 2, pp. 127—143. DOI: 10.2478/mgrsd-2020-0036.
10. Самсонова И. В., Потравный И. М., Павлова М. Б., Семенова Л. А. Оценка убытков, причиненных коренным малочисленным народам Севера в Таймырском Долгано-Ненецком районе Красноярского края вследствие разлива дизельного топлива на ТЭЦ-3 в Норильске // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 2. — С. 254—265. — DOI: 10.25283/2223-45942021-2-254-265.
- Samsonova I. V., Potravny I. M., Pavlova M. B., Semyonova L. A. Assessment of losses caused to the indigenous peoples of the North in the Taimyr Dolgano-Nenets District of the Krasnoyarsk Territory due to the diesel spill at TPP3 in Norilsk. Arctic: Ecology and Economy, 2021, vol. 11, no. 2, pp. 254—265. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-254-265. (In Russian).
11. Москвичев В. В., Постникова У. С., Тасейко О. В., Ефремова И. С. Анализ устойчивости техносферы арктических территорий Красноярского края с использованием вероятностно-графических моделей // Вычисл. технологии. — 2023. — Т. 28, № 4. — С. 45—56. — DOI: 10.25743/ICT.2023.28.4.005.
- Moskvichev V. V., Postnikova U. S., Taseiko O. V., Efremova I. S. Analysis of the stability of the technosphere of the Arctic territories of the Krasnoyarsk territory using probabilistic and graphical models. Computational Technologies, 2023, vol. 28, no. 4, pp. 45—56. DOI: 10.25743/ICT.2023.28.4.005. (In Russian).
12. Москвичев В. В., Бычков И. В., Потапов В. П. и др. Информационная система территориального управления рисками развития и безопасностью // Вестн. Рос. акад. наук. — 2017. — № 8. — С. 696—705.
- Moskvichev V. V., Bychkov I. V., Potapov V. P., Taseiko O. V., Shokin Yu. I. Information system for territorial risk and safety management development. Herald of the Russian Academy of Sciences., 2017, no. 8, pp. 696—705. (In Russian).
13. Востоков В. Ю. К вопросу определения частоты аварийных ситуаций на объектах, осуществляющих деятельность с использованием пожароизвестоопасных и аварийно химически опасных веществ // Проблемы анализа риска. — 2007. — Т. 4, № 4. — С. 413—418.
- Vostokov V. Yu. On the issue of determining the frequency of emergency situations at facilities operating with the use of fire-explosive and emergency chemically hazardous substances. Issues of risk analysis, 2007, vol. 4, no. 4, pp. 413—418. (In Russian).
14. Постникова У. С. Риск-ориентированный подход в вопросах безопасности трудового процесса // Безопасность труда в пром-сти. — 2025. — № 3. — С. 43—48. — DOI: 10.24000/0409-2961-2025-3-43-48.
- Postnikova U. S. A risk-oriented approach to the safety of labor process. Occupational Safety in Industry, 2025, no. 3, pp. 43—48. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-3-43-48. (In Russian).
15. Pan L., Zheng Y., Zheng J., Xu B., Liu G., Wang M., Yang D. Characteristics of Chemical Accidents and Risk Assessment Method for Petrochemical Enterprises Based on Improved FBN. Sustainability, 2022, vol. 14, iss. 19. DOI: 10.3390/su141912072.
16. Потравная Е. В. Взаимодействие бизнеса и коренных народов Севера: чего ждет население после аварии в Норильске? // ЭКО. — 2021. — № 7. — С. 19—39. — DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2021-7-19-39.
- Potravnaya E. V. Interaction between Business and Indigenous Peoples of the North: What does the Population Expect after the Norilsk Accident? ECO, 2021, no. 7, pp. 19—39. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2021-7-19-39. (In Russian).
17. Пучков В. А., Авдотьина Ю. С., Авдотьин В. П. Административно-правовые режимы управления природным и техногенным рисками. — М.: Всерос. науч.-исслед. ин-т по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2011. — 328 с.
- Puchkov V. A., Avdotina Yu. S., Avdotin V. P. Administrative and Legal Regimes for Managing Natural and Man-Made Risks. Moscow, All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2011, 328 p. (In Russian).
18. Арефьева Е. В., Прус Ю. В., Котосонов А. С. Подход к оценке показателей устойчивости систем жизнеобеспечения населения // Технологии гражданской безопасности. — 2024. — Т. 21, № 4 (82). — С. 40—46.
- Arefyeva E. V., Prus Yu. V., Kotosonov A. S. An approach to assessing sustainability indicators of the population life support systems. Civil Security Technologies, 2024, vol. 21, no. 4 (82), pp. 40—46. (In Russian).
19. Липина С. А. Устойчивое развитие российской Арктики: возможности и перспективы // Охрана окружающей среды и заповед. дело. — 2024. — Т. 5, № 3 (15). — С. 71—80.

- Lipina S. A. Sustainable development of the Russian Arctic: opportunities and prospects. Environment Protection and Nature Reserve Management, 2024, vol. 5, no. 3 (15), pp. 71—80. (In Russian).
20. Торцев А. М. Освоение природных ресурсов и социально-экономическое развитие прибрежных территорий Архангельской области // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 2 (38). — С. 109—121. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-109-121.
- Tortsev A. M. The coastal territories of the Arkhangelsk region: the development of natural resources and socio-economic development. Arctic: Ecology and Economy, 2020, no. 2 (38), pp. 109—121. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-109-121. (In Russian).

Информация об авторах

Постникова Ульяна Сергеевна, кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН (115191, Россия, Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4), e-mail: ulyana-ivanova@inbox.ru.

Москвичев Владимир Викторович, доктор технических наук, профессор, научный руководитель Красноярского филиала Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий (660049, Россия, Красноярск, просп. Мира, д. 53).

ASSESSMENT AND FORECASTING OF MAN-MADE RISKS IN THE ARCTIC ZONE OF KRASNOYARSK TERRITORY DURING THE IMPLEMENTATION OF INVESTMENT PROJECTS

Postnikova, U. S.¹, Moskvichev, V. V.²

¹ Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

² Federal Research Center for Information and Computational Technologies (Krasnoyarsk, Russian Federation)

The article was received on June 19, 2025

For citing

Postnikova U. S., Moskvichev V. V. Assessment and Forecasting of Man-made Risks in the Arctic zone of Krasnoyarsk Territory during the Implementation of Investment Projects. Arctic: Ecology and Economy, 2026, vol. 16, no. 1, pp. ?-. DOI: 10.25283/2223-4594-2026-1-?-?. (In Russian).

Abstract

The development of the Arctic territories of the Russian Federation represents a priority area for socio-economic advancement and national security. The Arctic zone of the Krasnoyarsk Territory is characterized by severe natural and climatic conditions, the presence of strategically important facilities, as well as a high degree of technogenic, environmental, and social vulnerability. The paper considers the regional features of the Arctic area of the Krasnoyarsk Territory, identifies key sources of threats, including industrial development and infrastructure-related risks. A methodology is proposed for the assessment and forecasting of both realized and potential man-made territorial risks using Bayesian networks. Probabilistic-graphical models of cause-and-effect relationships are constructed that allow identifying municipalities with the highest levels of risk. The results contribute to the development of scientifically grounded recommendations aimed at enhancing the overall safety of Arctic territories.

Keywords: Arctic zone of the Krasnoyarsk Territory, realized man-made risks, potential man-made risks, probabilistic and graphical models, Bayesian networks.

Funding

The Russian Science Foundation grant supported the study (project no. 24-79-00015 “Analysis of the Arctic territories safety based on a risk-oriented approach”).

Information about the authors

Postnikova, Ulyana Sergeevna, PhD of Engineering Sciences, Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences (4, Maly Kharitonovskiy Lane, Moscow, Russia, 115191), e-mail: ulyana-ivanova@inbox.ru.

Moskvichev, Vladimir Viktorovich, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Scientific Director of the Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies (53, Mira Ave., Krasnoyarsk, Russia, 660049).