

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЗДАНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЖКК. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ЭКОЛОГИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.051

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.6

Система классификации и оценки территориальных рисков при строительстве гражданских объектов в Арктике

Валентин Валентинович Волгин, Роман Олегович Самсонов,
Максим Олегович Кузьмич

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность освоения Арктической зоны Российской Федерации обуславливается Указом Президента РФ от 26.10.2020 № 645 (в ред. от 27.02.23) «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года». Освоение Арктической зоны сопровождается особыми рисками, связанными с экстремальными природно-климатическими условиями и деградацией многолетней мерзлоты. По разным оценкам, температура воздуха в Арктике растет в 3 раза быстрее среднемировой, что приводит к просадке мерзлоты и создает множественные серьезные как экологические, так и социальные угрозы. Для строительства гражданских объектов в таких суровых условиях необходима система управления рисками на предынвестиционной стадии, которая включает в себя классификацию территориальных и организационно-технологических рисков и оценку интегрального индекса пригодности участка.

Материалы и методы. Приводятся основные результаты научно-исследовательской работы по анализу и характеристике территориальных и организационно-технологических рисков в Арктике. Предложен подход многофакторной классификации рисков территории, используя геоинформационные данные и экспертные весовые коэффициенты. Также предложена шкала интегрального индекса пригодности территории.

Результаты. Сформирована классификация рисков для строительства гражданских объектов в арктическом секторе Российской Федерации. Предложена формула интегрального индекса пригодности территории, учитывающая весовой вклад каждой категории. На примере гипотетического участка в Ямало-Ненецком автономном округе показано применение методики: рассчитанный индекс пригодности соответствует классу «значительно опасный» и требует мероприятия по адаптации.

Выводы. Разработанная система позволяет на предынвестиционном этапе планировать качественное ранжирование потенциальной площадки строительства по уровню риска и обосновать принятие решений. Ее применение способствует повышению безопасности и устойчивости инфраструктуры в Арктике за счет выбора оптимальных территорий и/или разработки защитных мер на предынвестиционном этапе строительства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Арктика, арктический сектор, строительство в условиях вечной мерзлоты, классификация рисков, интегральный индекс пригодности, строительство гражданских зданий, строительство в Арктике

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Волгин В.В., Самсонов Р.О., Кузьмич М.О. Система классификации и оценки территориальных рисков при строительстве гражданских объектов в Арктике // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 4. Ст. 6. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.6

Автор, ответственный за переписку: Максим Олегович Кузьмич, maksads@yandex.ru.

System for classifying and assessing territorial risks in the construction of civil facilities in the Arctic

Valentin V. Volgin, Roman O. Samsonov, Maxim O. Kuzmich

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

ABSTRACT

Introduction. The relevance of developing the Arctic zone of the Russian Federation is determined by Decree of the President of the Russian Federation No. 645 of October 26, 2020 (as amended on February 27, 2023) "The Strategy for the Develop-

ment of the Arctic Zone of the Russian Federation and Ensuring National Security for the Period until 2035". The development of the Arctic zone is accompanied by specific risks associated with extreme natural and climatic conditions and the degradation of permafrost. According to various estimates, the air temperature in the Arctic is rising three times faster than the global average, which leads to permafrost subsidence and creates multiple serious environmental and social threats. The construction of civil facilities in such harsh conditions requires a risk management system at the pre-investment stage, which includes the classification of territorial and organizational and technological risks and the assessment of an integral site suitability index.

Materials and methods. This paper presents the main results of research work on the analysis and characterization of territorial and organizational-technological risks in the Arctic. An approach to the multifactorial classification of territorial risks using geoinformation data and expert weighting coefficients is proposed. A scale for the integral suitability index of a territory is also proposed.

Results. A classification of risks for the construction of civil facilities in the Arctic sector of the Russian Federation has been developed. A formula for an integral index of territorial suitability is proposed, taking into account the weight contribution of each category. The application of the methodology is demonstrated using the example of a hypothetical site in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug: the calculated suitability index corresponds to the "significantly hazardous" class and requires adaptation measures.

Conclusions. The developed system allows for the pre-investment stage to plan a qualitative ranking of potential construction sites by risk level and justify decision-making. Its application contributes to improving the safety and sustainability of infrastructure in the Arctic by selecting optimal territories and/or developing protective measures at the pre-investment stage of construction.

KEYWORDS: Arctic, Arctic sector, construction in permafrost conditions, risk classification, integral suitability index, civil building construction, construction in the Arctic

FOR CITATION: Volgin V.V., Samsonov R.O., Kuzmich M.O. System for classifying and assessing territorial risks in the construction of civil facilities in the Arctic. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(4):6. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.6

Corresponding author: Maxim O. Kuzmich, maksads@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Освоение Арктической зоны Российской Федерации тесно связано с уникальными вызовами и рисками, оказывающими большое влияние на строительство гражданских объектов. Ключевые факторы риска включают в себя экстремальные климатические условия, деградацию многолетней мерзлоты, отсутствие инфраструктуры и другие особенности региона. По оценкам Межправительственной группы экспертов по изменению климата ООН, темпы, с которыми на Земле становится жарче, возрастают. Так, средняя температура на планете вырастет на 1,5 °C уже к 2030 г., на 10 лет раньше, чем ожидалось прежде. При этом сильнее всего повышение температуры на планете ощущается на ее полюсах и выражается в быстром таянии льдов и вечной мерзлоты¹ [1]. Согласно международной программе арктического мониторинга и оценки (Arctic Monitoring and Assessment Programme — AMAP) и информации Арктического совета, несущая способность грунтов в зонах вечной мерзлоты снизится на 25–50 % в период с 2015 по 2025 г., на месторождениях Ямала — на 50–70 % [2]. Эти изменения создают угрозу устойчивости зданий и инфраструктуры. По данным статистики, более 50 % существующей инфраструктуры в вечной мерзлоте расположено в зонах с высоким риском протаивания грунтов. Стоит также отметить, что в настоящее время до 30 % зданий в от-

дельных городах имеют деформации и повреждения конструкций из-за деградации основания [3].

Строительство гражданских объектов в Арктике сталкивается не только с техническими трудностями, но и с высокими территориальными рисками. Под территориальными рисками понимаются угрозы, которые связаны со свойствами конкретной местности, которые могут оказывать негативное влияние на сроки и стоимость строительства. В условиях Арктики к таким рискам можно отнести:

- инженерно-геологические (нестабильные грунты, геокриологические процессы, глубина протаивания мерзлоты, подземные воды);
- криогенные (деградация мерзлоты, водозастой, температурная неоднородность);
- климатические (экстремальные температуры, снежные заносы, короткий строительный сезон, обледенение);
- логистические (отсутствие круглогодичного доступа, зимник и ледовые переправы, высокая стоимость доставки, удаленность от снабжения);
- инфраструктурные (отсутствие сетей, проблемы с подключением, необходимость подъездных путей);
- экологические (особо охраняемые природные территории (ООПТ) и миграционные пути, чувствительные экосистемы, водоохранные и санитарные зоны).

В современных реалиях возрастает потребность в изучении влияния деградации мерзлоты на инфраструктуру и разработке подхода к оценке рисков. Зарубежный опыт показывает, что исследователи применяют геоинформационные модели для графического представления опасных зон, примером может

¹ Как строить на века на тающей мерзлоте обсудили на II Форуме «Арктика – Регионы» // Восточный центр государственного планирования. 2024. URL: <https://vostokgosplan.ru/en/kak-stroit-na-veka-na-tajushhej-merzlote-obsudili-na-ii-forume-arktika-regiony/>

служить проект The Arctic Risk Map от норвежской компании DNV GL², основанный на базе ArcGIS for Server. Этот проект интегрирует информацию о температуре, штормовой активности, ледовой обстановке, наличии спасательных служб и т.п. В отечественных научных работах анализируется устойчивость конструкций и сооружений в условиях изменчивого климата (потепление и т.д.) [4, 5], предлагаются методики инженерной защиты оснований [6–8]. Однако нет единой системы классификации территориальных рисков для арктического строительства объектов гражданского назначения. Настоящее научное исследование предлагает восполнить этот пробел, предлагая структурированный подход к идентификации и оценке рисков, ориентированных на арктические территории. Новизна представленной работы заключается в адаптации имеющихся методов риск-менеджмента к условиям Крайнего Севера с учетом современных технологий и тенденций изменения окружающих факторов среды.

Цель исследования — разработка и описание системы классификации территориальных рисков и метода оценки интегрального показателя пригодности участка для гражданского строительства в Арктической зоне Российской Федерации.

В российской академической литературе существуют эмпирические свидетельства системного влияния криогенных процессов на инфраструктуру арктических городов (деформация фундаментов, термокарст, просадки, нарушение дренажа) и имеется необходимость региональной корректировки инженерных решений и мониторинга мерзлоты [9]. Итоговые работы по адаптации инфраструктуры Арктики делают акцент на меры охлаждения оснований, развитие сетей и улучшение технологий в градостроительстве и эксплуатации [10]. Публикации по проектированию и устройству оснований в условиях многолетнемерзлых грунтов (ММГ) описывают технологические решения (свайные поля, теплоизоляция, конструктивные схемы для сейсмо- и морозостойкости) и граничные условия их применимости [11]. Параллельно с этим развиваются подходы к оценке геодинамических и природно-техногенных рисков на проектах, ориентированных на Крайний Север, — от вероятностных до нечетких классификаторов и экспертных весов [12].

Инженерные обзоры и тематические статьи предлагают обширный спектр мер адаптации: предотвращение притока тепла в грунт, усиление отвода тепла (пассивные/активные системы термостабилизации), усиление основания и насыпей, а также корректировку конструктивных схем и режимов производства [13, 14].

² Картография Арктики: природные условия, освоение и риски // Esri CIS. ArcReview. URL: <https://arcreview.esri-cis.ru/2017/05/10/arctic-development-mapping/>

Рассмотрим российскую практику: *газотранспортный коридор «Бованенково – Ухта» (ЯНАО) как северная «голова» системы «Ямал – Европа»*. Для выдачи газа с полуострова Ямал в Единую глубоководную систему Европейской части России (ЕГТС) построены две нитки «Бованенково – Ухта», включая сложные прибрежно-морские и заболоченные участки. Применены решения по защите изоляции в мерзлых и скальных грунтах (подушки, амортизирующие слои), противоэрозионные мероприятия (георешетки, берегоукрепление), удержание грунта на откосах, утяжеления на переходах водотоков. Цель — минимизация теплопритока к трубе и деформаций основания на фоне термокарста и сезонного оттаивания³.

«Ухта – Торжок» и экспортный маршрут «Ямал – Европа». Российская часть «Ямал – Европа» начинается в Торжке; газ из ЯНАО поступает по коридору «Бованенково – Ухта – Торжок». Пермафрост-критичные решения сосредоточены на северном плече («Бованенково – Ухта»), тогда как «Ухта – Торжок» в основном вне криолитозоны и обеспечивает пропускную способность и давление⁴.

«Сила Сибири». Трасса пересекает районы с ледонасыщенной мерзлотой и экстремальными температурами до –60 °С. Используются стали и сварочные технологии для низкотемпературной работы, подход strain-based design на потенциально деформируемых участках, усиленный геоэкологический мониторинг, сезонное планирование работ, локальные меры дренажа и снегозадержания [15].

Нефтепроводная система Восточная Сибирь – Тихий океан (ВСТО). На пермафрост-участках применяются сезонно-действующие термостабилизаторы (двухфазные трубы/ТРСТ) для поддержания отрицательных температур основания, теплоизоляция, дренаж и инженерная защита откосов/насыпей; проводится регулярный мониторинг эффективности устройств⁵.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Научная работа носит комплексный подход и опирается на данные методологии структурированного анализа рисков. Для составления системы классификации рисков были собраны сведения о факторах, влияющих на строительные проекты в Арктике.

³ Бованенковское НГКМ и система магистральных газопроводов Бованенково – Ухта // Газпром. URL: <https://proektirovanie.gazprom.ru/press/ehntsiklopediya-proektirovshchika/krupnejshie-proekty/bovanenkovskoe-ngkm-i-sistema/>

⁴ Ukhta – Torzhok (Yamal) 2 Gas Pipeline // Global energy monitor WIKI. URL: https://www.gem.wiki/Ukhta-Torzhok_%28Yamal%29_2_Gas_Pipeline

⁵ ООО «Транснефть – Восток» обследовало системы термостабилизации на объектах в зоне вечной мерзлоты // Ясис. URL: <https://ysia.ru/ooo-transneft-vostok-obsledovalo-sistemy-termostabilizatsii-na-obektah-v-zone-vechnoj-merzloty/>

За основу формирования перечня рисков приняты категории, рекомендованные экспертами, ориентированные на арктические проекты: природно-климатические, инженерно-геологические, инфраструктурно-логистические и экологические.

Рассмотрим каждую из описанных выше категорий рисков для строительства объектов гражданского назначения в Арктике.

Природно-климатические риски. К ним относятся экстремальные температуры воздуха, сильные ветры, обильные снегопады и метели, дрейфующий лед и образование наледи. Они влияют на увеличение сроков строительства, повышенный износ техники и конструкций, необходимость в уникальных технологиях. Также из-за перечисленных факторов возникают трудности с рабочей деятельностью инженеров, строительных бригад и т.д.

Инженерно-геологические риски. В данную группу входят риски, связанные с состоянием грунтов основания, например наличие многолетней мерзлоты, глубина сезонного протаивания, ледонасыщенность грунта, риск термокарста, просадок и наледей. Эти риски позиционируются как ключевые, так как устойчивость и сбалансированность основания — это сохранность всего сооружения.

Инфраструктурно-логистические риски. Транспортные системы в основном удалены от развитых арктических территорий, также имеются проблемы с инженерными коммуникациями. Отсутствие круглогодичных дорог, портов, ограниченная доступность — все это создает риски удорожания завоза материалов, задержки доставки техники и снабжения. Отмечаются необходимость строительства автономных источников энергии, ограниченные мощности местных сетей, отсутствие квалифицированных бригад на месте (для устранения экстренных ситуаций, поломок и т.д.).

Экологические риски. Сюда относятся ООПТ и миграционные пути животных, чувствительные экосистемы, а также водоохранные и санитарные зоны. Эти факторы накладывают ограничения на размещение площадки и график работ. Какие-то территории не подходят для строительства, где-то нужны увеличенные буферы. Возникают дополнительные требования к шуму, защите воды и почв.

Каждый из перечисленных блоков расписан на более детальные показатели (факторы риска). Для каждого фактора определены качественные и количественные градации риска. Например, по расстоянию до инфраструктуры: менее 50 км — низкий риск (близкое расположение к действующей инфраструктуре), 50–200 км — средний, более 200 км — высокий (труднодоступная местность).

Метод оценки и весовые коэффициенты. Для количественной оценки территориального риска используется метод балльной оценки с последующим суммированием с весовыми коэффициентами. Каждому фактору риска X_i присваивается значение

индекса r_i по шкале от 0 до 1, где 0 — отсутствие угрозы, а 1 — максимальная неблагоприятная ситуация. Баллы могут устанавливаться и коррелироваться на основе измеренных данных или экспертной оценки. Весовые коэффициенты блоков могут быть приняты равными, если считать все группы равнозначно важными, либо дифференцированными на основе экспертного ранжирования. В научном исследовании в базовом варианте приняты равные веса блоков ($a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = 0,25$). После присвоения баллов всем факторам и вычисления средних значений по блокам рассчитывается интегральный индекс пригодности территории $I_{\text{пр}}$ — обобщенный критерий, отражающий степень приемлемости участка для строительства. Индекс формируется как взвешенная сумма (или среднее) баллов по основным блокам рисков с учетом их весов:

$$I_{\text{пр}} = \sum_{j=1}^m a_j R_j,$$

где $m = 4$ — число блоков; R_j — сводный риск по j -му блоку (0 — отсутствует, 1 — максимально критический). В простейшем случае (когда используются равные a_j) $I_{\text{пр}}$ есть среднее арифметическое четырех сводных оценок. В данной работе под индексом пригодности понимается доля рискованной составляющей: 0 означает полностью пригодный (безрисковый участок), 1 — полностью непригодный, без чрезвычайных мер. Таким образом, чем выше индекс пригодности, тем серьезнее суммарный территориальный риск и тем менее привлекательна площадка для строительства.

Для интерпретации интегрального индекса разработана шкала категоризации. Опираясь на подход, описанный в научных исследованиях [16], предложенных для нефтегазовых объектов в Арктике, установим семь градаций риска по величине $r = I_{\text{пр}}$:

- безопасная территория: $r < 0,2$. Практически не несет угроз для строительства, стандартные условия;
- слабо опасная: $0,2 < r < 0,3$. Небольшие риски, легко контролируемые штатными решениями;
- умеренно опасная: $0,3 < r < 0,45$. Средний уровень рисков, требуются специальные меры в проекте;
- опасная: $0,45 < r < 0,6$. Высокий риск, значительное влияние на проект, необходимость серьезных инженерных решений;
- значительно опасная: $0,6 < r < 0,8$. Очень высокий риск, без адаптационных мероприятий реализация проекта крайне усложняется;
- чрезвычайно опасная: $0,8 < r < 0,9$. Чрезвычайно высокий риск, строительство на таком участке почти всегда экономически нецелесообразно или технически сложно;
- катастрофически опасная: $r > 0,9$. Риск недопустимо высок, территория практически непригодна для освоения в текущих условиях.

Эти категории приводят оценку к понятному уровню, чтобы принятые решения были обоснова-

ны, корректны и удобны. Стоит отметить, что пороговые значения выбраны исходя из анализа научной литературы, их можно варьировать под конкретные требования проекта. Предложенная шкала учитывает российский опыт риск-оценки для арктических территорий [17].

Данные и инструменты. С целью практической реализации изложенного подхода предполагается использование ГИС-платформы для сбора и анализа пространственных данных и рисков. В рамках исследования сформирован набор условных сведений для демонстрационного примера: климатические параметры (температура воздуха и т.д.); геокриологические характеристики — обобщенные результаты мониторинга мерзлоты, проводимого Научным центром изучения Арктики [18]; инфраструктурные сведения — спутниковые снимки, открытые карты дорог и поселков. Интеграция комплекса данных в ГИС позволяет наглядно идентифицировать ключевые факторы риска на карте и сопоставить информацию по разным участкам. К примеру, при помощи Arctic Risk Map или аналогичного приложения можно визуально оценить, находится ли рассматриваемый участок в зоне частых штормов, в зоне миграции животных или рядом с особо охраняемыми территориями. В настоящей работе для упрощения все оценки проведены аналитически, однако в перспективе предлагается разработать цифровой инструмент — ГИС ориентированную систему поддержки принятия решений, куда будут интегрированы и прописаны модели расчета индекса пригодности. Этот инструмент сможет автоматически присваивать баллы по факторам на основе загруженных слоев (карта мерзлоты, климатические карты, транспортная схема), а затем выдавать интегральную оценку и рекомендацию по категории риска.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общая характеристика системы. В результате проведенного исследования сформирована целостная система классификации и оценки территориальных рисков, предназначенная для предварительного анализа территорий для строительства в Арктике. Система включает: описательную структуру рисков; метод балльной оценки факторов и расчета интегрального индекса пригодности; шкалирование индекса по категориям риска с интерпретацией; рекомендации — типовые предложения по мерам для каждой категории риска.

Описательная структура рисков. Составлена древовидная схема рисков проекта строительства в Арктике (рисунок). Вершина — Территориальный риск проекта, далее идет разветвление на 6 категорий первого уровня: инженерно-геологические; криогенные; климатические; логистические; инфраструктурные; экологические. Каждая категория, в свою очередь, расписана на 4–5 конкретных показателей. Такое детальное описание дает возможность сконцентрировать сбор данных по каждому пункту.

Пример расчета для гипотетического участка в ЯНАО

Для демонстрации работы системы рассмотрим условный пример. Предположим, что планируется строительство жилого микрорайона в Ямало-Ненецком автономном округе в 30 км к северо-востоку от г. Новый Уренгой. Местность — плато с высотами, примерно 60 м над уровнем моря, покрытое лесотундрой. Исходные данные (гипотетические, но близкие к средним значениям для этой локации): среднегодовая температура –8 °С, расчетная минимальная –50 °С; продолжительность зимы ~ 8 месяцев; роза ветров — частые сильные ветры зи-



Схема территориальных рисков проектов строительства в Арктике

мой; снег выпадает до 2 м за зиму. Грунты — вечная мерзлота с температурой на глубине фундамента ~ -3 °С, мощность сезонно-талого слоя 1,5–2 м; рельеф относительно ровный, но близко протекает река (потенциальное подтопление при паводке исключено, так как участок на возвышенности). Сейсмичность района низкая (не более 6 баллов). Инфраструктура: ближайшая асфальтированная дорога — в 25 км; электрические сети отсутствуют, но в будущем планируется строительство ЛЭП; до железной дороги ~ 40 км; доставка грузов возможна зимой напрямую от Уренгоя. Подводя итог: у участка высокий инженерно-геокриологический риск (теплая мерзлота со льдом), умеренно высокий климатический риск (экстремальный холод и ветры), инфраструктурный риск средний (относительная близость города, но отсутствие инженерных коммуникаций на локации), социально-экономический риск умеренный (необитаемая зона). Проведем количественную оценку по методике:

- инженерно-геокриологический блок: $R_{\text{инж-гео}} \approx 0,65$;
- климатический блок $R_{\text{клим}} \approx 0,7$;
- инфраструктурный блок $R_{\text{инф}} \approx 0,55$;
- социально-экономический блок $R_{\text{соц-экон}} \approx 0,5$.

Далее просуммируем получившиеся веса: $I_{\text{пр}} = 0,25(0,65 + 0,7 + 0,55 + 0,5) \approx 0,6$. Это значение попадает в диапазон 0,6–0,8 — «значительно опасная» категория риска. Такой участок еще может быть пригоден для поставленной задачи, но требует серьезных мер: в данном случае необходимо предусмотреть дорогие фундаменты на сваях с термосифонами для охлаждения грунта (чтобы предотвратить его оттаивание) и т.д. Этот пример иллюстрирует практическую ценность методики: еще на этапе планирования инвестор и проектировщики могут составить «портрет» территории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Строительство в Арктике сопряжено с уникальным сочетанием природных и техногенных рисков, требующих особого внимания на этапах планирования, проектирования и эксплуатации объектов. Разработка системы классификации и оценки территориальных рисков позволяет структурированно подходить к этой задаче. Классификация рисков по ка-

тегориям (климатическим, экологическим, социально-экономическим и др.) дает возможность охватить все аспекты угроз, связанных с территорией строительства. Количественная оценка и моделирование рисков, в свою очередь, дают инструменты для прогноза и сравнения вариантов — это основа для принятия обоснованных управленческих решений.

Применение описанной системы на практике означает, что до начала строительства можно идентифицировать наиболее опасные факторы для конкретной площадки (будь то вероятное протаивание мерзлоты, зона возможного подтопления или отсутствие резервных путей снабжения) и оценить, насколько критичным будет их влияние. Это позволяет заложить в проект необходимые меры защиты: усиленные конструкции, дополнительные ресурсы, планы по чрезвычайным ситуациям. В ходе реализации проекта непрерывный мониторинг и пересмотр оценок риска обеспечивают актуальность принятых мер на всем протяжении жизненного цикла объекта.

Важно подчеркнуть, что в условиях ускоренного изменения климата и активизации хозяйственного освоения Арктики система управления рисками не остается статичной. Она эволюционирует, опираясь на данные исследований и технологические инновации. Например, выявление новых опасных геологических процессов, связанных с деградацией мерзлоты, ведет к пересмотру классификации рисков и методов их оценки; появление более точных климатических моделей улучшает прогнозирование экстремальных нагрузок и т.д. Таким образом, система классификации и оценки рисков должна быть гибкой и адаптивной, регулярно обновляемой совместными усилиями ученых, инженеров и управленцев.

Внедрение системного подхода к оценке территориальных рисков при строительстве в Арктике позволит значительно повысить безопасность и эффективность проектов. Классификация рисков обеспечивает всестороннее видение проблем, оценка — количественное понимание вероятности и последствий, а последующее управление рисками — снижение этих вероятностей и последствий до приемлемого уровня. Все это служит залогом устойчивого развития арктических регионов, сохранения жизни и здоровья людей, а также защиты уникальной природы Севера при освоении его богатств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Халбашкеев А. Таяние вечной мерзлоты: риски и решения для нефтегазового сектора // Нефтегазовая промышленность. 2022. № 2. URL: <https://dprom.online/mtindustry/tayaneeye-vyechnoyi-myerzloti-reeskee-ee-ryeshyeneeya/>

2. Янушкевич К. Эксперты ООН оценили темпы глобального потепления: +1,5 °С к 2030 году // РБК. 2022.

URL: <https://trends.rbc.ru/trends/green/611250239-a794709fafa6108>

3. Hjort J., Streletskiy D., Dore G., Wu Q., Bjella K., Luoto M. Impacts of permafrost degradation on infrastructure // Nature Reviews Earth & Environment. 2022. Vol. 3. Issue 1. Pp. 24–38. DOI: 10.1038/s43017-021-00247-8

4. Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В., Бадина С.В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А. и др. Адаптация инфраструктуры Арктики и Субарктики к изменениям температуры мерзлых грунтов // Криосфера Земли. 2021. Т. 25. № 6. С. 3–15. DOI: 10.15372/KZ20210601. EDN HEVLIU.

5. Охлопкова Т.В., Гурьянов Г.Р., Плотников А.А. Строительство и проектирование зданий и сооружений в условиях вечной мерзлоты // Инженерный вестник Дона. 2018. № 4 (51). С. 184. EDN ZMNXP.

6. Плотников А.А., Гурьянов Г.Р. Современные методы охлаждения многолетнемерзлых грунтовых оснований многоэтажных жилых зданий // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 5. С. 535–544. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.535-544. EDN XLDIRY.

7. Огороков Н.С., Коркишко А.Н., Коржикова А.П. Экспериментальное исследование принудительно вентилируемой сваи // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 5. С. 665–677. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.5.665-677. EDN TVUCZV.

8. Климов А.С., Емельянов Р.Т., Чумакова Е.В., Климова О.Л. Метод охлаждения околосвайных многолетнемерзлых грунтов в зоне экстремального северного климата // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 4. С. 138–146. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-138-146. EDN FJSKTM.

9. Гребенец В.И., Кизяков А.И., Маслаков А.А., Сократов С.А., Стрелецкая И.Д., Толманов В.А. и др. Влияние опасных криогенных процессов на инфраструктуру городов в Арктике // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2022. № 2. С. 25–36. EDN MXVVKH.

10. Doré G., Niu F., Brooks H. Adaptation Methods for Transportation Infrastructure Built on Degrading Permafrost // Permafrost and Periglacial Processes. 2016. Vol. 27. Issue 4. Pp. 352–364. DOI: 10.1002/ppp.1919

11. Рзаев Ч.Т. Выбор типа конструкций фундаментов на многолетнемерзлых грунтах // Наука се-

годня: глобальные вызовы и механизмы развития : мат. Междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 25–27. EDN YOGSIT.

12. Yu W., Zhang T., Lu Y., Han F., Zhou Y., Hu D. Engineering risk analysis in cold regions: State of the art and perspectives // Cold Regions Science and Technology. 2020. Vol. 171. P. 102963. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102963

13. Wu Q., Ma W., Lai Y., Cheng G. Permafrost Degradation Threatening the Qinghai–Xizang Railway // Engineering. 2025. Vol. 49. Pp. 177–189. DOI: 10.1016/j.eng.2024.01.023

14. Du S., Ye Z. Analysis and Applications of the Two Phases Closed Thermosyphon Technology in the Highways in Permafrost Regions : a Review // Applied Sciences. 2024. Vol. 14. Issue 10. P. 4185. DOI: 10.3390/app14104185

15. Varlamov S., Skryabin P., Zhirkov A., Wen Z. Monitoring the Permafrost Conditions along Pipeline Routes in Central Yakutia, Russia // Land. 2022. Vol. 11. Issue 12. P. 2331. DOI: 10.3390/land11122-331

16. Streletskiy D.A., Suter L., Shiklomanov N., Porfiriev B.N., Eliseev D.O. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost // Environmental Research Letters. 2019. Vol. 14. Issue 2. P. 025003. DOI: 10.1088/1748-9326/aaf5e6

17. Степанов Р.О., Ахметшин Т.Р. Оценки геодинамических рисков для нефтегазовых комплексов Арктической зоны // Российская Арктика. 2021. № 1 (12). С. 50–61. DOI: 10.24412/2658-4255-2021-1-50-61. EDN FVZZGL.

18. Шейн А.Н., Краев Г.Н., Камнев Я.К. Геофизические исследования при организации и обслуживании региональной сети мониторинга мерзлоты в ЯНАО // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2022. Т. 2. № 1. С. 321–327. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-1-321-327. EDN VXXFRR.

Поступила в редакцию 27 августа 2025 г.

Принята в доработанном виде 15 сентября 2025 г.

Одобрена для публикации 24 сентября 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Валентин Валентинович Волгин** — кандидат технических наук, доцент кафедры организации строительства и управления недвижимостью, проректор; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; VolginVV@gic.mgsu.ru;

Роман Олегович Самсонов — доктор технических наук, профессор, научный руководитель лаборатории «Организационно-технологические системы использования искусственного интеллекта в строительстве»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SamsonovRO@mgsu.ru;

Максим Олегович Кузьмич — аспирант; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; maksads@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The development of the Arctic zone of the Russian Federation is closely linked to unique challenges and risks that have a significant impact on the construction of civil facilities. Key risk factors include extreme climatic conditions, permafrost degradation, lack of infrastructure and other characteristics of the region. According to estimates by the UN Intergovernmental Panel on Climate Change, the rate at which the Earth is getting warmer is increasing. The average global temperature is expected to rise by 1.5 °C by 2030, 10 years earlier than previously expected. The most significant increase in global temperatures is being felt at the poles, where it is causing rapid melting of ice and permafrost¹ [1]. According to the Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) and information from the Arctic Council, the bearing capacity of soils in permafrost areas will decrease by 25–50 % between 2015 and 2025, and by 50–70 % in the Yamal deposits [2]. These changes pose a threat to the stability of buildings and infrastructure. According to statistics, more than 50 % of existing infrastructure in permafrost is located in areas with a high risk of soil thawing. It is also worth noting that currently up to 30 % of buildings in some cities have structural deformations and damage due to foundation degradation [3].

The construction of civil engineering structures in the Arctic faces not only technical difficulties, but also high territorial risks. Territorial risks are understood to be threats associated with the properties of a specific area that may have a negative impact on construction timelines and costs. In the Arctic, these risks include:

- engineering-geological (unstable soils, geocryological processes, depth of permafrost thawing, groundwater);
- cryogenic (permafrost degradation, waterlogging, temperature heterogeneity);
- climatic (extreme temperatures, snow drifts, short construction season, icing);
- logistical (lack of year-round access, winter roads and ice crossings, high delivery costs, remoteness from supplies);
- infrastructural (lack of networks, connection problems, need for access roads);
- environmental (specially protected natural areas (SPNA) and migration routes, sensitive ecosystems, water protection and sanitary zones).

In today's reality, there is a growing need to study the impact of permafrost degradation on infrastructure and to develop an approach to risk assessment. Foreign experience shows that researchers use geoinformation models to graphically represent hazardous ar-

eas. An example is The Arctic Risk Map project from the Norwegian company DNV GL², based on ArcGIS for Server. This project integrates information on temperature, storm activity, ice conditions, the availability of rescue services, etc. Domestic scientific works analyze the stability of structures and facilities in conditions of a changing climate (warming, etc.) [4, 5] and propose methods for the engineering protection of foundations [6–8]. However, there is no unified system for classifying territorial risks for the construction of civil facilities in the Arctic. This scientific study aims to fill this gap by proposing a structured approach to the identification and assessment of risks specific to Arctic territories. The novelty of this work lies in the adaptation of existing risk management methods to the conditions of the Far North, taking into account modern technologies and trends in environmental factors.

The aim of the study is to develop and describe a system for classifying territorial risks and a method for assessing the overall suitability of a site for civil construction in the Arctic zone of the Russian Federation.

Russian academic literature provides empirical evidence of the systemic impact of cryogenic processes on the infrastructure of Arctic cities (foundation deformation, thermokarst, subsidence, drainage failure) and the need for regional adjustments to engineering solutions and permafrost monitoring [9]. The final works on the adaptation of Arctic infrastructure focus on foundation cooling measures, network development and improvement of technologies in urban planning and operation [10]. Publications on the design and construction of foundations in permafrost conditions describe technological solutions (pile fields, thermal insulation, structural schemes for seismic and frost resistance) and the boundary conditions for their applicability [11]. In parallel with this, approaches to assessing geodynamic and natural-technogenic risks in projects focused on the Far North are being developed, ranging from probabilistic to fuzzy classifiers and expert weights [12].

Engineering reviews and thematic articles offer a wide range of adaptation measures: preventing heat flow into the ground, enhancing heat removal (passive/active thermal stabilization systems), strengthening foundations and embankments, and adjusting design schemes and production modes [13, 14].

Let us consider Russian practice: the Bovanenkovo – Ukhta gas transport corridor (Yamalo-Nenets Autonomous Okrug) as the northern “head” of the Yamal – Europe system. To deliver gas from the Yamal Peninsula to the EGTU, two Bovanenkovo – Ukhta lines were built, including complex coastal, marine, and marshy areas. Solutions were implemented to protect insulation in frozen and rocky soils (cushions, shock-absorbing layers), anti-erosion measures (geogrids, shore reinforcement), soil retention on slopes, and ballast on wa-

¹ How to build for centuries on melting permafrost was discussed at the II Forum “Arctic – Regions”, Eastern Centre for State Planning. 2024. URL: <https://vostokgosplan.ru/en/kak-stroit-na-veka-na-tajushhej-merzlotе-obsudili-na-ii-forume-arktika-regiony/>

² Esri CIS. ArcReview. URL: <https://arcreview.esri-cis.ru/2017/05/10/arctic-development-mapping/>

tercourse crossings. The goal is to minimize heat flow to the pipe and foundation deformation due to thermokarst and seasonal thawing³.

Ukhta – Torzhok and the Yamal – Europe export route. The Russian section of Yamal – Europe begins in Torzhok; gas from the Yamal-Nenets Autonomous Okrug is transported via the Bovanenkovo – Ukhta – Torzhok corridor. Permafrost-critical solutions are concentrated on the northern branch (Bovanenkovo – Ukhta), while Ukhta – Torzhok is mainly outside the cryosphere and provides throughput and pressure⁴.

Power of Siberia. The route crosses areas with ice-saturated permafrost and extreme temperatures down to –60 °C. Steels and welding technologies for low-temperature operation are used, along with a strain-based design approach in potentially deformable areas, enhanced geocryological monitoring, seasonal work planning, and local drainage and snow retention measures [15].

The ESPO oil pipeline system (Transneft). Seasonal thermal stabilizers (two-phase tubes/TPCT) are used in permafrost areas to maintain negative base temperatures, thermal insulation, drainage and engineering protection of slopes/embankments; the effectiveness of the devices is monitored regularly⁵.

MATERIALS AND METHODS

The scientific work takes a comprehensive approach and is based on structured risk analysis methodology. To develop a risk classification system, information was collected on factors affecting construction projects in the Arctic. The list of risks is based on categories recommended by experts focused on Arctic projects: natural and climatic, engineering and geological, infrastructure and logistics, and environmental.

Let us consider each of the above categories of risks for the construction of civil facilities in the Arctic.

Natural and climatic risks. These include extreme air temperatures, strong winds, heavy snowfall and blizzards, drifting ice and ice formation. They contribute to longer construction times, increased wear and tear on equipment and structures, and the need for unique technologies. These factors also create difficulties for engineers, construction crews, etc. in their work.

Engineering and geological risks. This group includes risks associated with the condition of the foundation soil, such as the presence of permafrost, the depth

of seasonal thawing, ice saturation of the soil, the risk of thermokarst, subsidence and ice jams. These risks are considered key, as the stability and balance of the foundation is crucial to the integrity of the entire structure.

Infrastructure and logistics risks. Transport systems are mostly located far from developed Arctic territories, and there are also problems with engineering communications. The lack of year-round roads and ports, as well as limited accessibility, create risks of increased costs for the delivery of materials and delays in the delivery of equipment and supplies. There is a need to build autonomous energy sources, limited capacity of local networks, and a lack of qualified teams on site (to deal with emergencies, breakdowns, etc.).

Environmental risks. These include protected areas and animal migration routes, sensitive ecosystems, as well as water protection and sanitary zones. These factors impose restrictions on site location and work schedules. Some areas are unsuitable for construction, while others require larger buffers. Additional requirements arise for noise, water and soil protection.

Each of the above blocks is broken down into more detailed indicators (risk factors). Qualitative and quantitative risk gradations are defined for each factor. For example, based on distance to infrastructure: less than 50 km — low risk (close proximity to existing infrastructure), 50–200 km — medium risk, more than 200 km — high risk (difficult-to-access terrain).

Assessment method and weighting coefficients. To quantitatively assess territorial risk, a scoring method is used, followed by summation with weighting coefficients. Each risk factor X_i is assigned an index value r_i on a scale from 0 to 1, where 0 indicates no threat and 1 indicates the most unfavorable situation. Points can be set and correlated based on measured data or expert assessment. The weighting coefficients of the blocks can be taken as equal if all groups are considered equally important, or differentiated based on expert ranking. In the scientific study, equal weights of blocks ($a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = 0.25$) are taken in the basic version. After assigning scores to all factors and calculating the average values for each block, the integral index of suitability of the territory I_{val} is calculated — a generalized criterion reflecting the degree of acceptability of the site for construction. The index is formed as a weighted sum (or average) of scores for the main risk blocks, taking into account their weights:

$$I_{val} = \sum_{j=1}^m a_j R_j,$$

where $m = 4$ is the number of blocks; R_j is the combined risk for the j -th block (0 — absent, 1 — most critical). In the simplest case (when equal a_j are used), I_{val} is the arithmetic mean of the four combined assessments. In this work, the suitability index is understood as the share of the risk component: 0 means completely suitable (risk-free area), 1 means completely unsuitable, without emergency measures. Thus, the higher the suit-

³ Bovanenkovskoye NGCM and the Bovanenkovo – Ukhta trunk gas pipeline system, Gazprom. URL: <https://proektirovanie.gazprom.ru/press/ehntsiklopediya-proektirovshchika/krupnejshie-proekty/bovanenkovskoe-ngkm-i-sistema/>

⁴ Ukhta – Torzhok (Yamal) 2 Gas Pipeline, Global energy monitor WIKI. URL: https://www.gem.wiki/Ukhta-Torzhok_%28Yamal%29_2_Gas_Pipeline

⁵ Transneft Vostok LLC inspected thermostabilizing systems at facilities in the permafrost zone, Yasia. URL: <https://ysia.ru/ooo-transneft-vostok-obsledovalo-sistemy-termostabilizatsii-na-obektah-v-zone-vechnoj-merzloty/>

ability index, the more serious the total territorial risk and the less attractive the site for construction.

A categorization scale has been developed to interpret the integral index. Based on the approach described in scientific studies [16] proposed for oil and gas facilities in the Arctic, we will establish seven risk gradations according to the value of $r = I_{val}$:

- safe territory: $r < 0.2$. Practically no threat to construction, standard conditions;
- slightly dangerous: $0.2 < r < 0.3$. Minor risks, easily controlled by standard solutions;
- moderately dangerous: $0.3 < r < 0.45$. Average level of risk, special measures required in the project;
- dangerous: $0.45 < r < 0.6$. High risk, significant impact on the project, serious engineering solutions required;
- significantly dangerous: $0.6 < r < 0.8$. Very high risk, without adaptation measures, project implementation becomes extremely complicated;
- extremely dangerous: $0.8 < r < 0.9$. Extremely high risk, construction on such a site is almost always economically unfeasible or technically difficult;
- catastrophically dangerous: $r > 0.9$. The risk is unacceptably high, the territory is practically unsuitable for development under current conditions.

These categories bring the assessment to an understandable level so that the decisions made are justified, correct and convenient. It is worth noting that the threshold values are selected based on an analysis of scientific literature and can be varied according to the specific requirements of the project. The proposed scale takes into account Russian experience in risk assessment for Arctic territories [17].

Data and tools. For the practical implementation of this approach, a GIS platform will be used to collect and analyze spatial data and risks. As part of the study, a set of conditional data was compiled for a demonstration example: climatic parameters (air temperature, etc.); geocryological characteristics — summarized results of permafrost monitoring conducted by the Arctic Research Centre [18]; infrastructure data — satellite images, open maps of roads and settlements. Integrating the data set into a GIS allows key risk factors to be clearly identified on a map and information on different areas to be compared. For example, using Arctic Risk Map or a similar application, it is possible to visually assess whether the area in question is located in a zone of frequent storms, in an animal migration zone or near specially protected areas. In this work, for simplicity, all assessments were carried out analytically, but in the future, it is proposed to develop a digital tool — a GIS-oriented decision support system, where models for calculating the suitability index will be integrated and prescribed. This tool will be able to automatically assign scores for factors based on uploaded layers (permafrost map, climate maps, transport scheme) and then provide an integrated assessment and recommendation for the risk category.

RESEARCH RESULTS

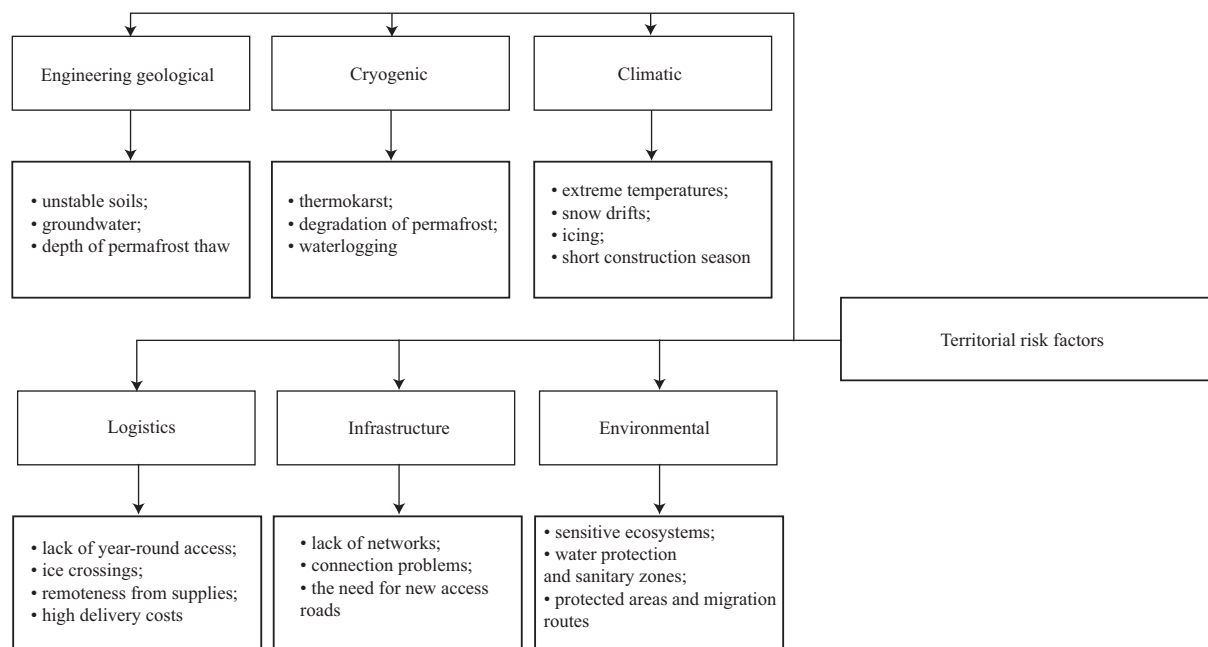
General characteristics of the system. As a result of the research, a comprehensive system for classifying and assessing territorial risks has been developed, designed for preliminary analysis of territories for construction in the Arctic. The system includes: a descriptive risk structure; a method for scoring factors and calculating an integral suitability index; scaling of the index by risk category with interpretation; recommendations — typical proposals for measures for each risk category.

Descriptive risk structure. A tree diagram of the risks of the construction project in the Arctic has been drawn up (see Fig.). At the top is the territorial risk of the project, followed by a branching into six first-level categories: engineering and geological; cryogenic; climatic; logistical; infrastructural; and environmental. Each category, in turn, is broken down into 4–5 specific indicators. Such a detailed description makes it possible to concentrate on collecting data for each item.

Calculation example for a hypothetical site in the Yamalo-Nenets Autonomous District

To demonstrate how the system works, let's consider a hypothetical example. Suppose that a residential neighbourhood is planned to be built in the Yamalo-Nenets Autonomous District, 30 km northeast of Novy Urengoy. The terrain is a plateau with elevations of approximately 60 m above sea level, covered with forest-tundra. Initial data (hypothetical, but close to the average values for this location): average annual temperature -8°C , estimated minimum -50°C ; winter duration ~ 8 months; wind rose — frequent strong winds in winter; snowfall up to 2 m per winter. Soils — permafrost with a temperature at the foundation depth of $\sim -3^{\circ}\text{C}$, seasonal thaw layer thickness 1.5–2 m; the relief is relatively flat, but a river flows nearby (potential flooding during high water is excluded, as the site is on high ground). The seismicity of the area is low (no more than 6 points). Infrastructure: the nearest asphalt road is 25 km away; there are no electrical networks, but the construction of a power line is planned for the future; the railway is ~ 40 km away; cargo delivery is possible in winter directly from Urengoy. To sum up: the site has a high engineering and geocryological risk (warm permafrost with ice), a moderately high climatic risk (extreme cold and winds), an average infrastructure risk (relative proximity to the city, but no engineering communications at the location), and a moderate socio-economic risk (uninhabited area). We will conduct a quantitative assessment using the following methodology:

- engineering and geocryological block: $R_{eng-geo} \approx 0.65$;
- climatic block $R_{clim} \approx 0.7$;
- infrastructure block $R_{inf} \approx 0.55$;
- socio-economic block $R_{soc-econ} \approx 0.5$.



Territorial risk map for construction projects in the Arctic

Next, we sum up the resulting weights: $I_{val} = 0.25(0.65 + 0.7 + 0.55 + 0.5) \approx 0.6$. This value falls within the range of 0.6–0.8 — the “significantly dangerous” risk category. Such a site may still be suitable for the task at hand, but requires serious measures: in this case, it is necessary to provide for expensive foundations on piles with thermosiphons for cooling the soil (to prevent it from thawing), etc. This example illustrates the practical value of the methodology: even at the planning stage, investors and designers can create a “portrait” of the territory.

CONCLUSION AND DISCUSSION

Construction in the Arctic involves a unique combination of natural and man-made risks that require special attention during the planning, design and operation stages of facilities. The development of a system for classifying and assessing territorial risks allows for a structured approach to this task. Classifying risks by category (climatic, environmental, socio-economic, etc.) makes it possible to cover all aspects of the threats associated with the construction site. Quantitative risk assessment and modelling, in turn, provide tools for forecasting and comparing options, which is the basis for making informed management decisions.

Applying the described system in practice means that before construction begins, the most dangerous factors for a specific site can be identified (whether it is probable thawing of permafrost, a zone of possible flooding, or the absence of backup supply routes) and their critical impact can be assessed. This allows

the necessary protective measures to be incorporated into the project: reinforced structures, additional resources, emergency plans. During the implementation of the project, continuous monitoring and review of risk assessments ensure that the measures taken remain relevant throughout the entire life cycle of the facility.

It is important to emphasize that in the context of accelerated climate change and increased economic development in the Arctic, the risk management system is not static. It evolves based on research data and technological innovations. For example, the identification of new hazardous geological processes associated with permafrost degradation leads to a revision of risk classifications and assessment methods; the emergence of more accurate climate models improves the prediction of extreme loads, etc. Thus, the risk classification and assessment system must be flexible and adaptive, regularly updated through the joint efforts of scientists, engineers and managers.

The introduction of a systematic approach to assessing territorial risks in construction in the Arctic will significantly improve the safety and efficiency of projects. Risk classification provides a comprehensive view of the problems, assessment provides a quantitative understanding of the probabilities and consequences, and subsequent risk management reduces these probabilities and consequences to an acceptable level. All this serves as a guarantee of sustainable development in the Arctic regions, the preservation of human life and health, and the protection of the unique nature of the North while exploiting its riches.

REFERENCES

1. Khalbashkeev A. Permafrost thawing: risks and solutions for the oil and gas sector. *Oil and Gas Industry*. 2022; 2. URL: <https://dprom.online/mtindustry/ta-yaneeye-vyechnoyi-myerzloti-reeskee-ee-ryeshyeneeya/> (rus.).
2. Yanushkevich K. UN experts estimate global warming rate: +1.5 °C by 2030. *RBC*. 2022. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/green/611250239a794709fafa6108> (rus.).
3. Hjort J., Streletskiy D., Dore G., Wu Q., Bjella K., Luoto M. Impacts of permafrost degradation on infrastructure. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2022; 3(1):24-38. DOI: 10.1038/s43017-021-00247-8
4. Melnikov V.P., Osipov V.I., Broushkov A.V., Badina S.V., Drozdov D.S., Dubrovin V.A. et al. Adaptation of arctic and subarctic infrastructure to changes in the temperature of frozen soils. *Earth's Cryosphere*. 2021; 25(6):3-15. DOI: 10.15372/KZ20210601. EDN HEVLIU. (rus.).
5. Okhlopko T.V., Gurianov G.R., Plotnikov A.A. Construction and design of buildings and structures in permafrost. *Engineering journal of Don*. 2018; 4(51):184. EDN ZMNXP. (rus.).
6. Plotnikov A.A., Guryanov G.R. Modern methods of cooling permafrost ground beds of multi-storey residential buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(5):535-544. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.535-544. EDN XLDIRY. (rus.).
7. Okorokov N.S., Korkishko A.N., Korzhikova A.P. An experimental study of a forced ventilation pile. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(5):665-677. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.5.665-677. EDN TVUCZV. (rus.).
8. Klimov A.S., Emelyanov R.T., Chumakova E.V., Klimova O.L. Cooling of near-pile permafrost soils in the Arctic region. *Journal of Construction and Architecture*. 2021; 23(4):138-146. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-138-146. EDN FJSKTM. (rus.).
9. Grebenets V.I., Kizyakov A.I., Maslakov A.A., Sokratov S.A., Streletskaya I.D., Tolmanov V.A. et al. Impact of hazardous cryogenic processes on urban infrastructure in the Arctic. *Moscow University Bulletin*. Series 5, Geography. 2022; 2:25-36. EDN MXVVKH. (rus.).
10. Doré G., Niu F., Brooks H. Adaptation Methods for Transportation Infrastructure Built on Degrading Permafrost. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2016; 27(4):352-364. DOI: 10.1002/ppp.1919
11. Rzaev Ch.T. Selection of foundation types for permafrost soils. *Science today: global challenges and development mechanisms : materials of the international scientific and practical conference*. 2017; 25-27. EDN YOGSIT. (rus.).
12. Yu W., Zhang T., Lu Y., Han F., Zhou Y., Hu D. Engineering risk analysis in cold regions: State of the art and perspectives. *Cold Regions Science and Technology*. 2020; 171:102963. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102963
13. Wu Q., Ma W., Lai Y., Cheng G. Permafrost Degradation Threatening the Qinghai–Xizang Railway. *Engineering*. 2025; 49:177-189. DOI: 10.1016/j.eng.2024.01.023
14. Du S., Ye Z. Analysis and Applications of the Two Phases Closed Thermosyphon Technology in the Highways in Permafrost Regions : a Review. *Applied Sciences*. 2024; 14(10):4185. DOI: 10.3390/app14104185
15. Varlamov S., Skryabin P., Zhirkov A., Wen Z. Monitoring the Permafrost Conditions along Pipeline Routes in Central Yakutia, Russia. *Land*. 2022; 11(12):2331. DOI: 10.3390/land11122331
16. Streletskiy D.A., Suter L., Shiklomanov N., Porfiriiev B.N., Eliseev D.O. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost. *Environmental Research Letters*. 2019; 14(2):025003. DOI: 10.1088/1748-9326/aaf5e6
17. Stepanov R.O., Akhmetshin T.R. Geodynamic risk assessments for oil and gas industry of the Arctic zone. *Russian Arctic*. 2021; 1(12):50-61. DOI: 10.24412/2658-4255-2021-1-50-61. EDN FVZZGL. (rus.).
18. Shein A.N., Kraev G.N., Kamnev Ya.K. Geophysical research for organization and service of the regional permafrost monitoring network in the Yamalo-Nenets autonomous district. *Interexpo GEO-Siberia*. 2022; 2(1):321-327. DOI: 10.33764/2618-981X2022-2-1-321-327. EDN VXXFRR. (rus.).

Received August 27, 2025.

Adopted in revised form on September 15, 2025.

Approved for publication on September 24, 2025.

B I O N O T E S : **Valentin V. Volgin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Organization and Real Estate Management, Vice-Rector; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; VolginVV@gic.mgsu.ru;

Roman O. Samsonov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Director of the Laboratory of “Organizational and Technological Systems for the Use of Artificial Intelligence in Construction”; **Moscow State**

University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SamsonovRO@mgsu.ru;

Maxim O. Kuzmich — postgraduate student, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);** 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; maksads@yandex.ru.

Contribution of the authors: all of the authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.