Раздел 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Оригинальная (исследовательская) статья
УДК 911.2: 911.6
https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-26-33
https://elibrary.ru/pcdvbz

Геоэкологическое зонирование Норильского промышленного района для управления рисками освоения его территории

Михаил Игоревич Алтухов, Алексей Анатольевич Медведков ✉
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия
Институт географии РАН, г. Москва, Россия
✉ a-medvedkov@bk.ru

Аннотация. Постановка научной проблемы и её актуальность. Норильск – крупнейший город Заполярья, располагающийся в условиях сплошного распространения многолетней мерзлоты. Несмотря на эту особенность, территория города неоднородна по своим геолого-географическим условиям, формирующим потенциал для развития неблагоприятных инженерно-геологических процессов, что важно учитывать при освоении новых площадок в границах городского округа. В связи с этим, рассматриваются факторы природной среды, определяющие уязвимость территории Норильского промышленного района к её освоению в условиях потепления климата. Материал и методы. На основе анализа опубликованных и фондовых материалов, а также данных дистанционного зондирования обобщена информация о факторах, определяющих денудационный и средозащитный потенциал территории: морфометрические и литолого-петрографические характеристики, мерзлотные условия, а также особенности почвенно-растительного покрова. Результаты проведенного анализа систематизированы в картографическом виде (составлена карта уязвимости территории к освоению). При разработке карты уязвимости территории все исходные данные были оцифрованы и преобразованы в растровый формат. На основе значений пикселей (разрешением 30×30 м) была проведена классификация территории по четырём категориям уязвимости с присвоением соответствующих баллов. Интегральный индекс уязвимости определялся как сумма баллов по всем учитываемым факторам. Показано, что сочетание разнородных факторов обуславливает мозаичную структуру уязвимости территории к внешним воздействиям. Это обстоятельство требует дифференцированного подхода к хозяйственному освоению территории, первым этапом которого должно стать её специализированное зонирование для оценки геоэкологических ограничений. В пределах городского округа «Норильск» выделены четыре типа территорий, ранжированные по степени уязвимости к освоению (от минимальной до максимальной). Наименее уязвимые участки, отнесённые к I категории, приурочены к трапповым массивам. Территории, отнесённые к III и IV категориям, классифицируются как уязвимые и очень уязвимые. Они локализуются прежде всего на озёрных и речных террасах. Учитывая планы по застройке участков в их пределах, необходимо разработать систему индикаторов для мониторинга состояния криогенных геосистем в условиях антропогенной трансформации.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, риски деградации многолетнемёрзлых пород, уязвимость территории, адаптация к изменениям климата, техногенез, арктические города, г. Норильск

Для цитирования: Алтухов М.И., Медведков А.А. Геоэкологическое зонирование Норильского промышленного района для управления рисками освоения его территории // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2026. Т. 12. № 2. С. 26-33. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-26-33. EDN PCDVBZ.

Section 2. POLLUTION

Original Paper

Geoecological zoning of the Norilsk industrial region to manage territorial development risks

Michael I. Altukhov, Alexey A. Medvedkov ✉
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
✉ a-medvedkov@bk.ru

Abstract. Relevance and problem formulation. Norilsk is the largest city in the Arctic, located in a permafrost zone. Despite this unique feature, the city's territory is heterogeneous in its geological and geographical conditions, creating the potential for unfavorable engineering and geological processes, which is important to consider when developing new sites

© Алтухов М.И., Медведков А.А., 2026

within the city district. Therefore, this paper examines environmental factors that determine the vulnerability of the Norilsk industrial district to development in a warming climate. Materials and Methods. Based on the analysis of published and archived materials, as well as remote sensing data, information on the factors determining the denudation and environmental protection potential of the territory has been summarized: morphometric and lithological-petrographic characteristics, permafrost conditions, as well as features of the soil and vegetation cover. The Results of the analysis have been systematized in cartographic form (a map of the territory's vulnerability to development has been compiled). In developing the vulnerability map, all initial data was digitized and converted to raster format. Based on pixel values (30x30 m resolution), the territory was classified into four vulnerability categories and assigned corresponding scores. The integrated vulnerability index was determined as the sum of scores for all factors considered. It was shown that the combination of diverse factors results in a mosaic structure of the territory's vulnerability to external influences. This circumstance requires a differentiated approach to the economic development of the territory, the first stage of which should be its specialized zoning to assess geoecological constraints. Within the Norilsk urban district, four types of territories have been identified, ranked by their vulnerability to development (from minimal to maximal). The least vulnerable areas, classified as Category I, are located within trap massifs. Areas classified as Categories III and IV are classified as vulnerable and very vulnerable. They are primarily located on lake and river terraces. Given development plans within these areas, it is necessary to develop a system of indicators for monitoring the state of cryogenic geosystems under conditions of anthropogenic transformation.

Keywords: permafrost, risk of permafrost degradation, vulnerability of the territory, adaptation to climate change, technogenesis, Arctic cities, Norilsk

For citation: Altukhov M.I., Medvedkov A.A. Geoecological zoning of the Norilsk industrial region to manage territorial development risks. *Anthropogenic Transformation of Nature*. 2026. Vol. 12. Iss. 2. P. 26-33. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-26-33. EDN PCDVBZ. (in Russian)

Введение

Актуальность исследования. Норильский промышленный район (в административных границах городского округа «Норильск») является крупнейшим центром горнодобывающей и металлургической промышленности в Российской Арктике, расположенный в условиях криолитозоны. На протяжение десятилетий Норильск не терял миграционной привлекательности. Это обстоятельство способствовало развитию массовой застройки городских пространств (Замятина, Пилясов, 2018). Норильск в широком понимании – это группа населённых пунктов (г. Норильск, включая Талнах, Кайеркан, Оганер, а также пос. Снежногорск). Его дальнейшее развитие, особенно той части территории, которая рассматривается в качестве перспективной для застройки, ограничивается геоэкологическими факторами: наличие мёрзлых пород с высокой льдистостью, значительный из-за морфометрических особенностей потенциал для активизации криогенных процессов, заметное ослабление средозащитной функции растительного покрова в условиях накопленного аэротехногенного загрязнения, усиление городского острова тепла и др. В связи с этим представляется актуальным проведение зонирования территории г.о. Норильск по геоэкологическим факторам (Замятина и др., 2023; Медведков, 2021), ограничивающим её освоение. Полученные результаты позволят подойти к обсуждению перспектив освоения столь разнообразной в природном отношении территории с позиции оценки геоэкологических угроз (рисков) и потенциала их развития.

Цель исследования – зонирование территории Норильского промышленного района по опасности развития неблагоприятных экзодинамических процессов при её перспективном освоении в условиях сплошной криолитозоны.

Концептуальные основы исследования

Для выполнения геоэкологического зонирования Норильского промышленного района анализировались факторы, определяющие как литокриогенную устойчивость территории (морфометрические, литолого-петрографические и геокриологические характеристики), так и восстановительную способность ее геосистем (особенности почвенно-растительного покрова). В условиях криолитозоны, помимо морфометрических и литолого-петрографических факторов (состава грунтов на поверхности), важно принимать во внимание и особенности мерзлотных условий (табл. 1 / tabl. 1). Представляется, что из геокриологических факторов на литокриогенную устойчивость территории влияют: льдистость и температура мерзлых пород (Зотова, Мариняк, 2024), а также мощность мерзлых пород (определяет инерционность состояния геосистем при внешних воздействиях). Характеристики растительного покрова определяют не только эффективность теплоизолирующей функции, влияя на особенности теплообмена в условиях криолитозоны, но и позволяют судить о восстановительном потенциале геосистем (Медведков, 2021; Ponomareva et al., 2025).

Важнейшие особенности природно-географических условий в пределах Норильского промышленного района в обобщённом виде, а также общие подходы к их оценке, представлены в табл. 1. Каждому фактору присваивался оценочный балл, характеризующий потенциал развития процессов экзодинамики (потенциальную уязвимость территории к освоению) в условиях криолитозоны, ярусного строения рельефа и пониженной биологической продуктивности фитоценозов. Соответственно, чем более значима роль рассматриваемого фактора в реализации денудационного потенциала территории, тем выше балл. Например, распространение скальных грунтов (базальты, габбро-долериты) оценивалось самым низким баллом (1 балл), а развитие дисперсных отложений аргиллитов и глин, к которым приурочены высокольдистые породы, – самым высоким баллом (4 балла). Аналогично оценивались и другие факторы: чем выше чувствительность конкретного компонента природной среды к внешним воздействия (рыхлые отложения наибольшей мощности; крутые склоны, ориентированные на юг; мерзлые породы с более высокой температурой и др.) или более

замедленная способность к восстановлению растительного сообщества, обладающего более высоким средозащитным потенциалом, тем выше балл. Ниже более подробно рассматривается роль каждого из факторов, представленных в табл. 1 / tabl. 1, в реализации денудационного потенциала территории.

Таблица 1

Природно-географические особенности Норильского промышленного района и общие подходы к их оценке в контексте анализа потенциальной уязвимости территории к освоению

Table 1

Natural and geographical features of the Norilsk industrial region and general approaches to their assessment in the context of the analysis of the potential vulnerability of the territory to development

Типы грунтов // Types of soil	*Мерзлотные условия // Permafrost conditions*	*Рельеф // Relief*	*Почвенный покров // Soil cover*	*Растительные сообщества // Plant communities*	*Потенциал развития процессов экзодинамики // The potential for the development of exodynamics processes*
Базальты, габбродолериты	Сплошное распространение, мощность > 400 м, температура < -4°С, промерзание устойчивое	Пологие выпуклые склоны северной экспозиции	Каменистые россыпи	Мохово-лишайниковые тундры	1 низкий
Туфы, известняки, гравий / дресва с заполнителем	Сплошное распространение, мощность 200-400 м, температура от -3 до -5°С, промерзание длительное устойчивое	Крутые склоны и поверхности выравнивания	Перегнойно-карбонатные, перегнойно-глеевые	Кустарничковые тундры (ерниковые, голубично-брусничные, багульниковые)	2 средний
Песчаники, алевролиты, пески, мергели	Преимущественно сплошное распространение, мощностью 100-200 м, температура от -1 до -3°С, промерзание полу переходное	Крутые склоны южной экспозиции	Подбуры тундровые, глеевые торфянисто-перегнойные	Кустарниковые тундры (ивняки, ольховники), полигональные тундры	3 высокий
Аргиллиты, глины	Несплошное прерывистое распространение мощностью < 150 м, температура от +1 до -2°С	Вогнутые склоны и ложбинные понижения южной экспозиции	Торфянисто-глеевые	Осоково-пушицевые тундры и кочкарные болота, лиственничные редколесья, гигрофитные луговые сообщества, техногенные ландшафты с пионерными сообществами	4 очень высокий

Рельеф (морфометрические характеристики). Большую роль играет экспозиция склонов: северные склоны получают меньше солнечной радиации, что способствует консервации мерзлотных условий, а южные – больше, что при прочих равных условиях увеличивает глубину протаивания. Немаловажным фактором является и крутизна поверхностей – с её увеличением растёт риск интенсивности солифлюкции и оползания. Морфология склонов также влияет на интенсивность криогенных процессов. Опускание кровли мерзлоты наблюдается в понижениях рельефа (хасыреи, ложбины стока, лога), где формируется наиболее мощный снежный покров, препятствующий зимнему охлаждению (Шполянская и др., 2022).

Соответственно, баллы назначались исходя из имеющейся информации о крутизне, экспозиции, кривизне поверхности, а также дополнительно учитывалась абсолютная высота местности. Наименьшая уязвимость – у субгоризонтальных поверхностей с меньшей энергией рельефа (крутизна < 2°), экспозиционно холодных склонов и территорий с наибольшими абсолютными отметками, где мерзлота холоднее и мощнее. Средний балл характерен для склонов, крутизной 2-5°, более высоким баллом оценивались склоны, крутизной 5-10° и вогнутые формы, аккумулирующие влагу и снег. Самым максимальным баллом оценивались склоны с крутизной > 10°, имеющие южную или западную экспозицию, а также плоские территории с гипсометрически низкими отметками (долины, поймы), на которых распространены термокарстовые озёра.

Состав грунтов: скальные грунты. Скальные разности, такие как базальты и габбро-долериты, практически инертны к термическому воздействию, поскольку лёд в них не является структурным элементом, и при оттаивании их свойства остаются неизменными. Менее устойчивы туфы, известняки и гравийно-дресвяные отложения с заполнителем: обладая относительно высокой теплопроводностью, они теряют прочность при таянии льда, заполняющего поры и трещины. Ещё более чувствительными оказываются песчаники и мергели, которые при насыщении льдом глубоко промерзают, но при оттаивании в них формируются и расширяются трещины (Гаврильев, 1998; Ракита, 1983).

Состав грунтов: рыхлые отложения. Тип рыхлых отложений в значительной степени определяет их льдистость. Так, льдистость многолетнемёрзлых пород различается в зависимости от свойств грунтов – типов четвертичных образований: малольдистые, преимущественно пески и скальные породы (содержание льда – менее 20%), среднельдистые суглинки и супеси (содержание льда 20-40%) и сильнольдистые, представленные озёрно-болотными и аллювиальными типами

генетических отложений в форме торфяных масс и суглинистых накоплений (содержание льда – более 40%) (Ракита, 1983). Максимальные проявления деградационных процессов будут приурочены к участкам, сложенным льдистыми суглинками (Ривкин, Булдович, 2025). Таким образом, наиболее уязвимыми являются аргиллиты и глины, характеризующиеся высокой льдистостью за счёт большого объёма связанной воды, что при оттаивании ведёт к полной потере их несущей способности (Гаврильев, 1998).

Балльная оценка уязвимости грунтов основывалась на учёте сочетания следующих характеристик: теплопроводности, льдистости и трещиноватости. Наиболее устойчивыми признаны базальты и габбро-долериты, т.к. высокая плотность и массивная текстура обеспечивают низкую пористость и льдистость. В таких условиях лёд не является структурным элементом этих грунтов, поэтому оттаивание не меняет их свойства – им присвоен минимальный балл. Известняки и гравийно-дресвяные отложения с ледовым заполнителем получили средний балл, т.к. при относительно высокой теплопроводности они теряют прочность, это происходит при таянии льда в порах и трещинах. Песчаники, алевролиты и мергели оценены как более уязвимые – при насыщении льдом они глубоко промерзают, но при оттаивании в них формируются и расширяются трещины. Максимальный балл присвоен аргиллитам и глинам: тонкодисперсный состав и большой объём связанной воды обусловливают высокую льдистость, и при оттаивании они полностью теряют свою несущую способность.

Геокриологические условия. Исходное состояние мёрзлой толщи определяет её инерционность. Там, где температуры пород крайне низки (ниже -4°C ... -5°C), а мощность весьма значительна, многолетняя мерзлота более устойчива к внешним воздействиям. При температурах, близких к 0°C (от -1°C до -3°C), и малой мощности мёрзлых пород, толща находится в состоянии неустойчивого равновесия: наличие таликов и незамёрзшей воды делает её крайне чувствительной к любому тепловому импульсу (French, 2018).

Баллы определялись исходя из совокупного анализа геокриологических характеристик: температуры, льдистости и мощности многолетней мерзлоты, типа промерзания и глубины сезонного протаивания. Наиболее низким баллом были оценены участки с температурой пород ниже -4…-5 °C и мощностью 300-500 м – их инерционность максимальна. Повышение балла следовало при приближении температуры к 0°C (от -1 до -3°C) и уменьшении мощности мёрзлых пород до 50-100 м, особенно в зонах тектонических нарушений с таликами, где толща находится в неустойчивом равновесии. Толщи с массивной криогенной текстурой оценивались более низким баллом, как менее уязвимые, тогда как отложения с высокой льдистостью и повторно-жильными льдами – максимальным баллом. Глубина сезонного протаивания также учитывалась: минимальные значения (0,3-0,8 м) свидетельствовали о пониженной уязвимости, а максимальные (4,5-5,5 м) – о повышенной.

Почвенный покров также вносит вклад в регулирование теплового режима дневной поверхности. Каменистые россыпи из-за высокой теплопроводности и низкой влагоёмкости не выполняют термоизолирующую функцию. Перегнойно-карбонатные и арктотундровые почвы обеспечивают слабую изоляцию, но их высокая щебнистость и близость льдистой мерзлоты создают предпосылки для пучения и термокарста при антропогенных нарушениях. Наибольшее защитное значение имеют подбуры и торфянисто-перегнойные глеевые почвы: органические горизонты этих типов почв эффективно изолируют мерзлоту, однако при их разрушении защитный эффект исчезает, и оглеенные горизонты, насыщенные влагой, начинают активно проводить тепло, провоцируя деградацию мерзлоты. В аквальных обстановках мерзлота практически отсутствует (He et al., 2022).

Оценка основана на учёте мощности органогенного горизонта. Косвенно эта информация позволяет судить о теплопроводности, влагоёмкости и фильтрационной способности этого типа почвогрунтов. Самый низкий балл присвоен каменистым суглинистым почвам и каменным россыпям, они индицируют «сухую» мерзлоту и стабильный режим благодаря дренированности. Торфянисто-глеевые почвы с мощным торфяным горизонтом за счёт высокой пористости и низкой теплопроводности торфа, консервирующего мерзлоту, оценены невысоким баллом, но в данном случае следует сказать о важной теплоизолирующей роли торфяного горизонта. При его нарушении уязвимость территории возрастает. Промежуточный балл – у перегнойно-карбонатных почв и подбуров. Максимально уязвимыми признаны техногенно-нарушенные участки, где почвенный покров сильно нарушен или уничтожен. Это особенно актуально для территорий, попадающих в ареал торфяно-глеевых почв.

Растительность выступает мощным терморегулятором мёрзлых пород: затеняет почвы и обеспечивает изолирующий слой, который уменьшает летний поток тепла. Мхи и органическое вещество в почве увеличивают водоудерживающую способность, влияя на гидрологические свойства. Мощные моховые покровы и органические горизонты почвы способствуют уменьшению толщины деятельного слоя (Walker et al., 2003). Кустарничковые тундры в летнее время создают затенение, но зимой задерживают снег, что несколько повышает температуру мёрзлых пород. Высокие кустарники эффективно аккумулируют снег, создавая мощный теплоизолирующий слой, который препятствует глубокому промерзанию почвогрунтов, что повышает уязвимость мёрзлых пород. Наибольшую опасность представляют переувлажненные участки и лиственничные редколесья с глубоким протаиванием грунтов, и техногенные ландшафты, где из-за отсутствия теплоизолирующего покрова грунт максимально прогревается.

Присваиваемые баллы отражали анализ следующих характеристик: теплоизоляционных свойств фитомассы, альбедо поверхности, глубину корневой системы и влияние растительности на снегонакопление. Минимальная уязвимость – у мохово-лишайниковых тундр: сплошной моховой ярус до 10 см с низкой теплопроводностью и высоким альбедо дают наименьшее

сезонное протаивание. Кустарничковые тундры оценены более высоким баллом из-за наличия отепляющего эффекта снегозадержания. Лиственничные редколесья получили промежуточный балл: летнее затенение и зимнее снегонакопление создают сложный тепловой режим, а глубокие корни способствуют локальному растеплению. Осоково-пушицевые тундры и кочкарные болота – наиболее уязвимы, они оценены наиболее высоким баллом из-за экстремальной льдистости, активного льдообразования и интенсивного термокарста при нарушении напочвенного покрова. Техногенные пионерные сообщества с низким проективным покрытием оценены максимальным баллом, поскольку отсутствие теплоизоляции увеличивает сезонное протаивание в 1,5-3 раза.

Хозяйственная деятельность коренным образом трансформирует тепловой режим почвогрунтов. На фоновых территориях и под уплотнёнными покрытиями возможна даже аггредация мерзлоты. Линейные сооружения создают контраст: под насыпью мерзлота может сохраняться, но у откосов из-за снегонакопления начинается её деградация. На селитебных территориях комплексное воздействие (тепловыделение зданий, утечки из коммуникаций) ведет к формированию техногенных таликов и просадкам (Shiklomanov et al., 2017). Наибольшую опасность представляют горно-промышленные комплексы и хвостохранилища, где мерзлота уничтожается на значительную глубину, а отвалы становятся очагами развития активных криогенных процессов.

Материалы и методы исследования

Для сбора первичного материала с целью последующего зонирования рассматриваемой территории по важнейшим параметрам природной среды использованы следующие картографические материалы: карты дочетвертичных и четвертичных образований РФ масштаба 1: 1 000 000 (Государственная геологическая карта РФ, 2016); ландшафтно-геоэкологическая карта Норильского промышленного района масштаба 1: 500 000[1] (Горшков, 1988); геокриологическая карта СССР масштаба 1: 2 500 000[2]; а также почвенная карта РФ масштаба 1: 2 500 000 (1988).

С целью индикации разного состояния почвенно-растительного покрова рассчитывались NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDWI (Normalized Difference Water Index) и LST (Land Surface Temperature). Эти показатели характеризуют экологически значимые свойства ландшафта и учитывают специфику криолитозоны (Высоцкая, Медведков, 2023). Для их расчета на рассматриваемую территорию использованы космические снимки Landsat 8-9 за 2025 г. и высокоточная цифровая модель рельефа ArcticDEM с 30-метровым разрешением, на основе которой рассчитаны морфометрические характеристики: крутизна склонов, форма поверхности и экспозиция. Количественные данные, полученные с использованием упомянутых материалов, использовались в данной оценке с целью дифференциации влияния природно-географических факторов на пространственном уровне (в т.ч. для уточнения границ растительных сообществ с разной биологической продуктивностью и выделения участков с наибольшим потенциалом для развития денудации).

Информация об антропогенной нагрузке на рассматриваемой территории, представленной в виде таких объектов инфраструктуры, как селитебная застройка, горнодобывающие и обрабатывающие предприятия, их хвостохранилища, а также транспортные пути сообщения, получена с использованием генерального плана г. Норильска, а также данных OSM.

Карта уязвимости территории Норильского промышленного района к освоению (рис. 1 / fig. 1) разработана на основе использования указанных выше картографических материалов, снимков Landsat 8-9 и ЦМР ArcticDEM с учётом экспертной оценки роли факторов (табл. 1 / tabl. 1), определяющих потенциал развития неблагоприятных инженерно-геокриологических процессов. Из технических инструментов использовались переклассификация растров и получение взвешенной суммы в программе ArcGIS PRO.

Таким образом, в ходе построении итоговой карты (рис. 1/ fig. 1), все имеющиеся материалы были оцифрованы и конвертированы в растровое изображение. После этого, была проведена классификация по значению пикселя растра (30х30 м), что позволило выделить области, относящиеся к четырём категориям уязвимости с присвоением соответствующего балла. Интегральный индекс уязвимости рассчитывался как сумма баллов за оцениваемые особенности каждого из рассматриваемых факторов. Таким образом, с использованием экспертного подхода, были выделены следующие категории (градации), позволяющие говорить о дифференциации территории по сложности (опасности) её освоения (табл. 1 / tabl. 1):

- I категория *(устойчивые / низкая уязвимость)*: 15-20 баллов;
- II категория *(относительно устойчивые / средняя уязвимость)*: 20-24 баллов;
- III категория *(уязвимые / высокая уязвимость)*: 24-28 баллов;
- IV категория *(особо уязвимые / очень высокая уязвимость)*: 28-35 баллов.

Основные результаты исследования

Карта уязвимости территории Норильского промышленного района (масштаб 1: 300 000) к освоению, разработанная на основе рассмотренных выше подходов, представлена на рис. 1 / fig.1.

На основе проведённого анализа и разработанного зонирования, выявлены следующие закономерности:

I категория – это наиболее благоприятные для техногенного освоения территории с позиции их литокриогенной устойчивости. Такие участки приурочены к выровненным поверхностям трапповых плато (северо-восток и юго-запад Норильского промышленного района), где распространены скальные породы с каменистой тундрой и/или разреженной мохово-лишайниковой растительностью. Здесь фиксируются наиболее

[1] Эколого-географическая карта Российской Федерации. М 1:4 000 000. М.: ФСГК, 1996. 4 л.

[2] Геокриологическая карта СССР. М 1:25 000000. М.: Гидроспецгеология, 1991. 16 л.

низкие температуры мёрзлых пород (ниже -5°C) с невысокой льдистостью и минимальной глубиной сезонного протаивания.

II категория – относительно благоприятные для освоения. Такие территории включают склоновые поверхности плато с кустарничковой растительностью. Мерзлота здесь сохраняет устойчивость, но чувствительна к возможным нарушениям. Заметим, что именно к этим участкам приурочена техногенная нагрузка в форме горной добычи, что негативно влияет на состояние многолетнемерзлых пород и активизирует деградационные процессы.

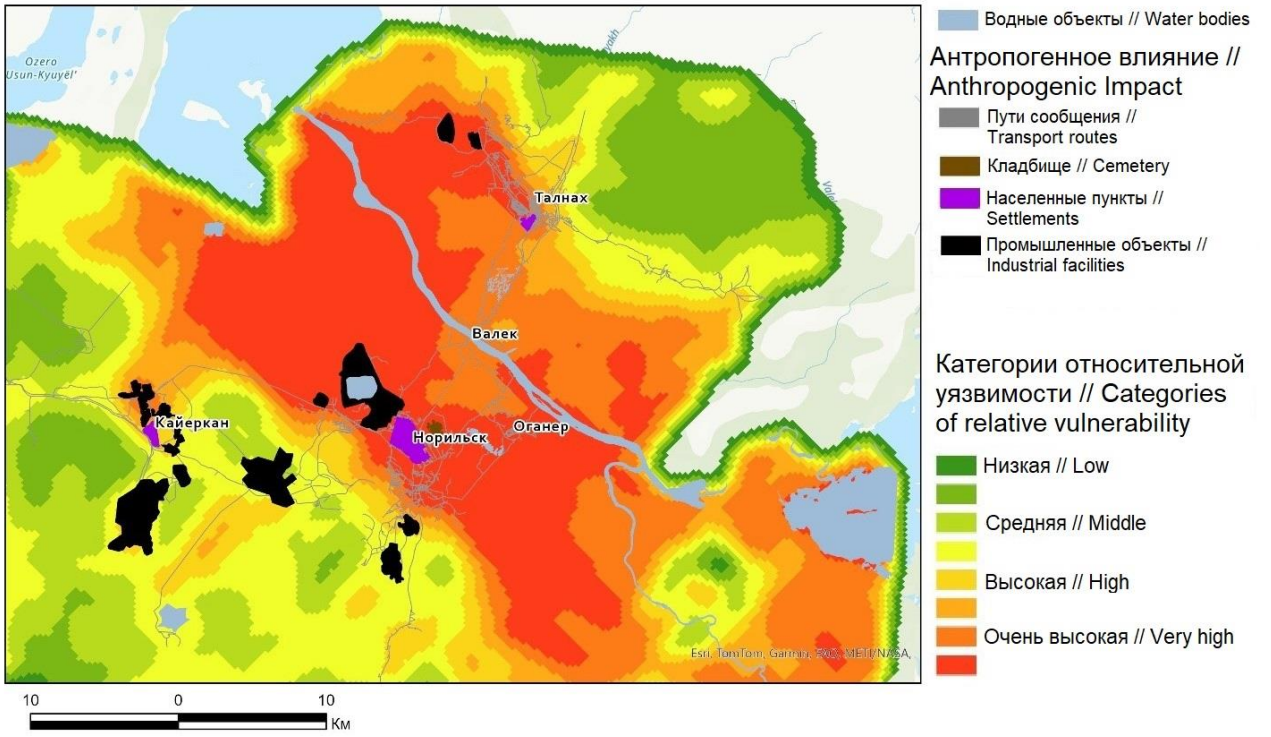


Рис. 1. Уязвимость территории Норильского промышленного района к освоению
Fig. 1. Vulnerability of the Norilsk Industrial Region to Development

III категория с уязвимыми природными комплексами представлена плоскими участками речных и озёрных террас, а также ложбинами стока талых ледниковых вод, по которым заложены малые реки. Участки перекрыты маломощными торфяниками, подстилаются льдистыми осадочными породами (алевритами и известняками).

IV категория – наиболее проблемная. Она включает пойменные участки с погребёнными льдами. Типичен активный термокарст.

Территории, отнесённые к двум категориям (III и IV), планируется активно застраивать, поэтому их освоение требует особого внимания и разработки индикаторов (в т.ч. с использованием ДДЗ), позволяющих судить о состоянии геосистем в нарушенных условиях.

Выводы

1. Важнейшими параметрами, требующими учёта при зонировании территории по геоэкологическим ограничениям освоения, применительно к природным условиям Норильского промышленного района, являются: льдистость и температура мёрзлых пород, а также характер их распространения; мощность органогенного горизонта почв и литолого-петрографический состав грунтов; состав и структура растительного покрова (наличие и мощность мохово-торфяного покрова, наличие кустарников и т.д.), запасы живой фитомассы, а также морфометрические характеристики поверхности (крутизна, кривизна и экспозиция).

2. Наиболее устойчивые участки (с минимальными геоэкологическими ограничениями для рассмотренных природных условий) приурочены к трапповым поверхностям (массивам) под каменистой тундрой и разреженной мохово-лишайниковой растительностью, а наименее устойчивые (уязвимые и очень уязвимые) локализуются на озёрных и речных террасах под маломощными торфяными накоплениями, а также и на пойменных участках с погребённым жильным льдом.

3. Основные рекомендации по управлению инженерно-геокриологическими рисками на территории Норильского промышленного района, которые применимы и для других районов арктической криолитозоны: интеграция геоэкологического зонирования в систему принятия решений; расширение сети геокриологического мониторинга в пределах ландшафтных урочищ, характеризующихся высокой репрезентативностью для освоенной и осваиваемой территории; планирование работ по вывозу и ликвидации снегоотвалов на урбанизированных территориях; обязательное страхование геокриологических рисков для населения и хозяйственных объектов; введение системы субсидий и налоговых льгот для предприятий, направляющих инвестиции в обеспечение экологической (в т.ч. и геокриологической) безопасности.

Финансирование

Основная часть исследования выполнялась при финансовой поддержке гранта Минобрнауки РФ «Глобальные климатические вызовы на территории России: ретроспективный анализ, прогноз и механизмы адаптации» (соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024).

Funding

The study was supported by a grant from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation «Global Climate Challenges in Russia: Retrospective Analysis, Forecast, and Adaptation Mechanisms» (agreement No. 075-15-2024-554 dated April 24, 2024).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии оснований, способных повлиять на объективное отражение результатов проведённого исследования.

Conflicts of interest

The authors declare that there are no grounds that could influence the objective reflection of the results of the study.

Сведения об авторском вкладе

М.И. Алтухов – сбор и обработка данных дистанционного зондирования, расчёт индекса уязвимости, картографическая визуализация результатов исследования, подготовка первого (чернового) варианта рукописи статьи.

А.А. Медведков – формулирование идеи и научной гипотезы, разработка концепции исследования, постановка исследовательских задач, поиск картографических материалов, использованных в ходе исследовательского анализа, научное редактирование текста статьи и подготовка его финального варианта.

Contribution of the authors

M.I. Altukhov – collection and processing of remote sensing data, vulnerability index calculation, cartographic visualization of research results, preparation of the first draft of the article.

A.A. Medvedkov – formulation of the idea and scientific hypothesis, research concept development, setting research objectives, search for cartographic materials used in the research analysis, scientific editing of the article, and preparation of its final version.

Список источников

1. Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны / под ред. В.Т. Балобаева. Новосибирск: СО РАН, 1998. 280 с.
2. Горшков С.П. Концептуальные основы геоэкологии. Смоленск: СГУ, 1998. 447 с.
3. Высоцкая А.А., Медведков А.А. Информационные ресурсы для оценки экологического потенциала геосистем (на примере территории Енисейского Севера) // *ИнтерКарто. ИнтерГИС*, 2023. Т. 29. № 1. С. 20-33. https://doi.org/10.35595/2414-9179-2023-1-29-20-33
4. Замятина Н.Ю., Клюева В.П., Гончаров Р.В., Бурцева А.В., Котов Е.А., Медведков А.А., Молодцова В.А., Никитин Б.В., Пилясов А.Н., Поляченко А.Е., Стрелецкий Д.А., Шамало И.А. Жизнестойкость арктических городов: теория, комплексный анализ и примеры трансформации: коллективная монография / под ред. Н.Ю. Замятиной. М.: Изд. решения, 2023. 206 с.
5. Замятина Н.Ю., Пилясов А.Н. Российская Арктика: к новому пониманию процессов освоения. М.: ЛЕНАНД, 2018. 400 с.
6. Зотова Л.И., Мариняк С.В. Геоэкологические аспекты мерзлотно-ландшафтной дифференциации территории Российской Арктики // *Проблемы региональной экологии*. 2024. № 1. С. 44-49. https://doi.org/10.24412/1728-323X-2024-1-44-49
7. Медведков А.А. Геоэкологические факторы жизнестойкости арктических городов в криолитозоне: теоретические подходы к изучению // *Известия РАН. Серия географическая. 2021*. Т. 85. № 5. С. 726-739. https://doi.org/10.31857/S2587556621050071
8. Ракита С.А. Природа и хозяйственное освоение Севера. М.: МГУ, 1983. 190 с.
9. Ривкин Ф.М., Булдович С.Н. Закономерности формирования криогенного рельефа как результат парагенезиса оттаивания и промерзания грунтов // *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России*. 2025. № 12. С. 372-380.
10. Шполянская Н.А., Осадчая Г.Г., Малкова Г.В. Современное изменение климата и реакция криолитозоны (на примере Западной Сибири и Европейского Севера России) // *Географическая среда и живые системы.* 2022. № 1. С. 6-30. https://doi.org/10.18384/2712-7621-2022-1-6-30
11. French H.M. The Periglacial Environment. Fourth Edition. Chichester, UK; Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, 2018. 515 p.
12. He R., Jin H., Jia N., Wang H., Jin X., Li X. Thermal conductivity contrast effect of organic soils and its environmental implications // *Cold Regions Science and Technology*. 2022. Vol. 196: 103485. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103485
13. Medvedkov A.A., Vysotskaya A.A., Olchev A.V. Detection of Geocryological Conditions in Boreal Landscapes of the Southern Cryolithozone Using Thermal Infrared Remote Sensing Data: A Case Study of the Northern Part of the Yenisei Ridge // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. Iss. 2. 291. https://doi.org/10.3390/rs15020291

14. Walker D.A., Jia G.J., Epstein H.E., Raynolds M.K., Chapin F.S, Copass C., Hinzman L.D., Knudson J.A., Maier H.A., Michaelson G.J., Nelson F., Ping C.L., Romanovsky V.E., Shiklomanov N. Vegetation Soil Thaw Depth Relationships along a Low-Arctic Bioclimate Gradient, Alaska: Synthesis of Information from the ATLAS Studies // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2003. Vol. 14. P. 103-123. https://doi.org/10.1002/ppp.452

15. Ponomareva T.V., Litvintsev K.Y., Finnikov K.A., Yakimov N.D., Ponomarev G.E., Ponomarev E.I. The Variability in the Thermophysical Properties of Soils for Sustainability of the Industrial Affected Zone of the Siberian Arctic // *Sustainability*. 2025. Vol. 17. Iss. 19. 8892. https://doi.org/10.3390/su17198892

16. Shiklomanov N., Streletskiy D., Grebenets V., Suter L. Conquering the permafrost: urban infrastructure development in Norilsk, Russia // *Polar Geography.* 2017. Vol. 40. P. 273-290. https://doi.org/10.1080/1088937X.2017.1329237

References

1. Gavriliev R.I. Thermophysical Properties of Rocks and Soil Covers of the Cryolithozone. In: Balobaev V.T. (ed.). Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1998. 280 p. (in Russian)

2. Gorshkov S.P. Conceptual Foundations of Geoecology. Smolensk: Saratov State University publ. 1998. 447 p. (in Russian)

3. Vysotskaya A.A., Medvedkov A.A. Information Resources for Assessing the Environmental Potential of Geosystems (on the example of the territory of the Yenisei North). *InterCarto. InterGIS*. 2023. Vol. 29. Iss. 1. P. 20-33. https://doi.org/10.35595/2414-9179-2023-1-29-20-33 (in Russian)

4. Zamyatina N.Yu., Klyueva V.P., Goncharov R.V., Burtseva A.V., Kotov E.A., Medvedkov A.A., Molodtsova V.A., Nikitin B.V., Pilyasov A.N., Polyachenko A.E., Streletsky D.A., Shamalo I.A. Resilience of Arctic Cities: Theory, Comprehensive Analysis, and Transformation Examples: collective Monograph. In: by Zamyatina, N.Yu. (ed.). Moscow: Resheniya Publishing House, 2023. 206 p. (in Russian)

5. Zamyatina N.Yu., Pilyasov A.N. Russian Arctic: Toward a New Understanding of Development Processes. Moscow: LENAND publ., 2018. 400 p. (in Russian)

6. Zotova L.I., Marinyak S.V. Geoecological Aspects of Permafrost-Landscape Differentiation of the Russian Arctic. *Problems of Regional Ecology*. 2024. Iss.1. P. 44-49. https://doi.org/10.24412/1728-323X-2024-1-44-49 (in Russian)

7. Medvedkov A.A. Geoecological Factors of Resilience of Arctic Cities in the Cryolithozone: Theoretical Approaches to the Study. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series.* 2021. Vol. 85. Iss. 5. P. 726-739. https://doi.org/10.31857/S2587556621050071 (in Russian)

8. Rakita S.A. Nature and Economic Development of the North. Moscow: Moscow State University publ., 1983. 190 p. (in Russian)

9. Rivkin F.M., Buldovich S.N. Patterns of Cryogenic Relief Formation as a Result of Soil Thawing and Freezing Paragenesis. *Relief and Quaternary Formations of the Arctic, Subarctic, and Northwest Russia.* 2025. Iss. 12. P. 372-380. (in Russian)

10. Shpolyanskaya A.A., Osadchaya G.G., Malkova G.V. Modern Climate Change and the Response of the Cryolithozone (using Western Siberia and the European North of Russia as an Example). *Geographical Environment and Living Systems*. 2022. Iss. 1. P. 6-30. https://doi.org/10.18384/2712-7621-2022-1-6-30 (in Russian)

11. French H.M. The Periglacial Environment. Fourth Edition. Chichester, UK; Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, 2018. 515 p.

12. He R., Jin H., Jia N., Wang H., Jin X., Li X. Thermal conductivity contrast effect of organic soils and its environmental implications. *Cold Regions Science and Technology*. 2022. Vol. 196: 103485. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103485

13. Medvedkov A.A., Vysotskaya A.A., Olchev A.V. Detection of Geocryological Conditions in Boreal Landscapes of the Southern Cryolithozone Using Thermal Infrared Remote Sensing Data: A Case Study of the Northern Part of the Yenisei Ridge. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. Iss. 2. 291. https://doi.org/10.3390/rs15020291

14. Walker D.A., Jia G.J., Epstein H.E., Raynolds M.K., Chapin F.S, Copass C., Hinzman L.D., Knudson J.A., Maier H.A., Michaelson G.J., Nelson F., Ping C.L., Romanovsky V.E., Shiklomanov N. Vegetation Soil Thaw Depth Relationships along a Low-Arctic Bioclimate Gradient, Alaska: Synthesis of Information from the ATLAS Studies. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2003. Vol. 14. P. 103-123. https://doi.org/10.1002/ppp.452

15. Ponomareva T.V., Litvintsev K.Y., Finnikov K.A., Yakimov N.D., Ponomarev G.E., Ponomarev E.I. The Variability in the Thermophysical Properties of Soils for Sustainability of the Industrial Affected Zone of the Siberian Arctic. *Sustainability*. 2025. Vol. 17. Iss. 19. 8892. https://doi.org/10.3390/su17198892

16. Shiklomanov N., Streletskiy D., Grebenets V., Suter L. Conquering the permafrost: urban infrastructure development in Norilsk, Russia. *Polar Geography.* 2017. Vol. 40. P. 273-290. https://doi.org/10.1080/1088937X.2017.1329237

Поступила в редакцию / Received: 17.03.2026
Поступила после рецензирования / Revised: 29.06.2026
Принята к публикации / Accepted: 15.08.2026