

Арктика и Антарктика*Правильная ссылка на статью:*

Ступин О.Г., Вахрушева И.А., Пчелинцева С.В., Красовская Л.В. Инженерно-геокриологическая оценка влияния добычи минерального сырья на деградацию многолетнемерзлых пород в пределах арктической криолитозоны России // Арктика и Антарктика. 2025. № 2. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.2.74431 EDN: FHRFAU URL: https://nbppublish.com/library_read_article.php?id=74431

Инженерно-геокриологическая оценка влияния добычи минерального сырья на деградацию многолетнемерзлых пород в пределах арктической криолитозоны России

Ступин Олег Геннадьевич

магистр; кафедра цифровых технологий управления; Сибирский федеральный университет
660041, Россия, Красноярский край, г. Красноярск, Октябрьский р-н, Свободный пр-кт, д. 79

ipdme@mail.ru

**Вахрушева Инна Алексеевна**

кандидат педагогических наук
доцент; кафедра Высшей математики; Российский государственный аграрный университет-
Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева

127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

vakhrusheva@rgau-msha.ru

Пчелинцева Светлана Вячеславовна

кандидат технических наук
доцент; кафедра Прикладной информатики; Российский государственный аграрный университет-
Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева

127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

pchelintseva@inbox.ru

**Красовская Людмила Владимировна**

кандидат технических наук
доцент; кафедра Прикладной информатики; Российский государственный аграрный университет-
Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева

127434, Россия, г. Москва, Тимирязевский р-н, ул. Тимирязевская, д. 49

kraslud@yandex.ru



[Статья из рубрики "Природные ресурсы Арктики и Антарктики"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2025.2.74431

EDN:

FHRFAU

Дата направления статьи в редакцию:

13-05-2025

Дата публикации:

21-05-2025

Аннотация: Настоящее исследование посвящено инженерно-геокриологической оценке теплового воздействия добычи минерального сырья на деградацию многолетнемерзлых пород в пределах арктической криолитозоны России. Работа сосредоточена на Юньягинском угольном разрезе и прилегающих подземных шахтах Печорского угольного бассейна, включая Воргашорскую, Воркутинскую и Заполярную шахты. Эти объекты размещены в районах с повсеместным распространением многолетнемёрзлых грунтов и подвержены возрастающему антропогенному тепловому воздействию, связанному с открытой и подземной добычей угля. В исследовании рассматривается, каким образом устойчивые тепловые нагрузки от производственной инфраструктуры, отвалов и вентиляционных выбросов способствуют увеличению глубины сезонного протаивания, перераспределению влаги и снижению прочностных характеристик мерзлых грунтов. Особое внимание уделено пространственной неоднородности температурных аномалий и их зависимости от технологических факторов, таких как интенсивность отработки, параметры вентиляции и температура шахтных вод. В работе использован комплексный подход, включающий натурный температурный мониторинг, бурение инженерно-геологических скважин, лабораторные испытания образцов мерзлых грунтов и численное моделирование процессов теплопереноса для оценки степени и темпов деградации многолетнемерзлых пород под тепловым воздействием. Научная новизна исследования заключается в количественной характеристике тепловых полей, формируемых в условиях промышленной эксплуатации месторождений на фоне многолетних многолетнемерзлых пород, а также в установлении пороговых условий, при которых процесс деградации существенно ускоряется. Моделирование и натурные наблюдения показали, что при плотности тепловой нагрузки, превышающей 100 Вт/м², протаивание многолетнемерзлой породы достигает глубины 3–4 метра за пять лет. В зоне влияния угледобычи глубина сезонного протаивания увеличивается вдвое по сравнению с фоновыми участками и достигает 2,8 м. Отдельные очаги полной деградации многолетнемерзлых пород зафиксированы в районах размещения отвалов и сброса шахтных вод, где температура грунта превышала 0°C, а содержание влаги достигало более 35 %. Полученные результаты подтверждают необходимость внедрения инженерных мер термозащиты — теплоизолированных платформ, пассивных термосифонов и автоматизированных систем мониторинга — для снижения рисков потери устойчивости инфраструктуры и обеспечения экологически безопасного освоения Арктики.

Ключевые слова:

Арктика, многолетнемерзлые породы, деградация многолетнемерзлых пород, тепловое

воздействие, угледобыча, Юньягинский разрез, Печорский угольный бассейн, геокриология, теплоперенос, инженерная инфраструктура

1. Введение

Многолетнемерзлые породы (ММП), охватывающие значительные территории северного полушария, играют важную роль в функционировании климатической системы планеты, поддержании устойчивости инженерной инфраструктуры и сохранении углеродного баланса. В условиях глобального потепления и антропогенного воздействия деградация многолетнемерзлых пород становится одной из наиболее актуальных геоэкологических проблем [1-3]. Особенно уязвимыми оказываются районы арктической криолитозоны, где процессы термокарста, термоэррозии и подтаивания мерзлых грунтов приводят к необратимым изменениям ландшафтов, нарушению гидрологического режима и разрушению объектов хозяйственной деятельности [4-6]. Одним из наиболее мощных источников локального теплового воздействия в пределах криолитозоны выступает добыча минерального сырья, сопровождаемая активной эксплуатацией горнотехнической инфраструктуры, отвалов, технологических площадок и сетей теплоснабжения. На фоне высоких темпов промышленного освоения Арктики инженерно-геокриологическая оценка техногенных воздействий становится неотъемлемой частью устойчивого природопользования и проектирования в условиях многолетнемерзлых пород [7-10].

Одной из ключевых проблем является тепловое перераспределение в зоне горных работ, приводящее к понижению термостабильности мерзлых грунтов. При открытой добыче, особенно в условиях Арктики, происходит оголение пород, обладающих низкой теплоёмкостью и высокой теплопроводностью, что способствует быстрому прогреву подстилающего основания [11-13]. Дополнительное тепловое воздействие оказывают экзогенные и эндогенные процессы, включая окисление сульфидных минералов в отвалах, эксплуатацию тепловыделяющего оборудования и сброс тёплых дренажных вод. Для подземной добычи ситуация усугубляется теплом, передаваемым от вентиляционного воздуха и самонагрева пород. Эти факторы в совокупности вызывают ускоренную деградацию многолетнемерзлых пород, приводящую к увеличению активного слоя, просадке грунта, потере несущей способности оснований сооружений и возникновению потенциально аварийных ситуаций [14]. Одновременно с этим накапливаются эмиссии парниковых газов из талых участков, что дополнительно усиливает негативное влияние на климатическую систему [15-18].

Попытки решения данной проблемы включают в себя как конструктивные, так и природоохранные подходы. На инженерном уровне реализуются методы термостабилизации оснований с использованием сезонно-действующих или пассивных охладителей (термосифонов), применения теплоизоляционных покрытий, глубокой закладки фундаментов и отвода дренажных вод за пределы мерзлотной зоны [19-22]. Эти меры, однако, требуют значительных затрат на проектирование, эксплуатацию и обслуживание, и в условиях удалённых арктических районов они не всегда экономически обоснованы. С другой стороны, при разработке минеральных ресурсов допускается внедрение адаптивных технологических решений, направленных на минимизацию теплового воздействия, включая изменение маршрутов транспортировки, размещение теплонагруженных объектов вне криогенно-чувствительных зон, и выбор сезонов ведения работ [23-25]. Недостатком подобных решений является их

ограниченная эффективность при высоких объемах добычи и наличии постоянно действующих источников тепла. Кроме того, на практике нередко наблюдается расхождение между проектными и фактическими характеристиками многолетнемерзлых пород, что требует уточнённых методов оценки состояния подстилающих грунтов [26-27].

В этой связи всё большую актуальность приобретает применение инженерно-геокриологических методов оценки и прогнозирования деградации многолетнемерзлых пород под влиянием теплового воздействия горных разработок. Использование геотермического зондирования, термометрии, многолетнего мониторинга температуры и численного моделирования позволяет более точно определить динамику температурного поля, границы таяния и зону потери прочностных свойств мерзлых грунтов [28-30]. Сочетание наблюдательных и расчетных методов даёт возможность учёта как локальных факторов (глубина отработки, мощность перегретых пластов, конструкция отвалов), так и региональных тенденций, связанных с потеплением климата. Интеграция таких подходов в систему проектирования и эксплуатации горных предприятий в Арктике открывает перспективы для оптимизации технологических решений и повышения устойчивости инфраструктуры в условиях многолетнемерзлых пород [31,32].

Настоящая работа направлена на инженерно-геокриологическую оценку влияния добычи минерального сырья на деградацию многолетнемерзлых пород в пределах арктической криолитозоны России. Исследование сосредоточено на анализе теплового воздействия, создаваемого Юньягинским угольным разрезом, расположенным в районе Воркуты, а также рядом действующих угольных шахт, входящих в состав Печорского угольного бассейна. Целью работы является определение характера, интенсивности и пространственного распределения теплового влияния указанных объектов на состояние мерзлотных грунтов, выявление факторов, определяющих масштаб деградации, и оценка потенциальных рисков для инженерных сооружений и природной среды. Проведённое исследование охватывает анализ температурного режима, геокриологических характеристик района, особенностей технологии добычи и позволяет сформулировать практические рекомендации по снижению техногенной нагрузки на многолетнемерзлые породы в условиях развития добывающей отрасли Арктики.

2. Методика и методы проведения исследований.

В рамках данного исследования была реализована комплексная программа полевых и лабораторных инженерно-геокриологических работ, направленных на определение степени и характера теплового воздействия горнодобывающей деятельности на состояние многолетнемёрзлых грунтов в пределах арктической криолитозоны. Экспериментальные работы охватывали участки Юньягинского угольного разреза и прилегающих шахт Печорского угольного бассейна, включая Воргашорскую, Воркутинскую и Заполярную шахты. Основное внимание было уделено зонам непосредственного воздействия тепловых источников, а также удалённым фоновым участкам, которые использовались в качестве контрольных точек для сопоставительного анализа.

Инструментальная часть исследований включала бурение инженерно-геологических скважин с отбором температурных, геотехнических и гидрологических данных. Для термометрического мониторинга применялись цифровые геотермические датчики НОВО U23 Pro v2 с диапазоном измерения от -40 до +70°C и точностью ±0,2°C, которые устанавливались в скважины глубиной до 20 м на фиксированных интервалах по 0,5-2 м. Измерения проводились в автоматическом режиме с шагом регистрации 1 раз в час в

течение не менее 6 месяцев. Дополнительно использовались кабельные термозонды с интегральной регистрацией температурного градиента (марки «ГеоТерм-5М», производство ООО «ТехноИнжиниринг», Россия). Эти устройства позволяли оперативно оценивать распределение температуры по глубине в реальном времени с разрешением до $0,1^{\circ}\text{C}$. Участки бурения выбирались с учётом литологической однородности, расстояния до источников тепла и доступности для последующего геодезического мониторинга.

Полевые работы дополнялись лабораторными исследованиями проб мерзлотных грунтов, отобранных из 46 скважин. Испытания проводились на автоматизированных установках ИГИ-3000 и ЦНИИС-95М, предназначенных для оценки физико-механических характеристик мерзлых образцов. Параметры, полученные в лабораторных условиях, включали влажность, пористость, модуль упругости, сопротивление сдвигу и коэффициент фильтрации. Испытания выполнялись при температуре -5°C в камерах с термостабилизацией, имитирующих естественные условия криолитозоны. Отдельно проводился анализ содержания жидкой и связанной влаги при помощи влагомеров Sartorius MA160, что позволило определить фазовые изменения в пределах переходного слоя многолетнемерзлой породы.

Для моделирования теплового поля использовалось специализированное программное обеспечение GeoStudio (модуль TEMP/W), обеспечивающее численное решение уравнений теплопереноса с учётом фазовых переходов. В расчётах применялись параметры, полученные в полевых и лабораторных условиях, включая теплопроводность, теплоёмкость и скрытую теплоту плавления. Модельная сетка имела шаг 0,5 м, а временной шаг составлял 10 суток, что позволило достоверно отследить развитие температурных аномалий и зону деградации многолетнемерзлых пород в течение прогнозного периода до 25 лет. Полученные результаты легли в основу анализа пространственного распространения теплового воздействия и сформировали базу для оценки рисков для инженерных сооружений.

3. Результаты исследования

В ходе настоящего исследования была выполнена инженерно-геокриологическая оценка теплового влияния угледобывающих объектов Печорского угольного бассейна, сосредоточенная на Юньягинском угольном разрезе (рис. 1) и прилегающих шахтах, включая Воргашорскую, Воркутинскую и Заполярную. Исследование проводилось на основе инструментального мониторинга температуры мерзлых грунтов, анализа геотермальных полей, термометрического бурения, сейсморазведочных работ и моделирования динамики теплового воздействия в зоне влияния техногенной нагрузки. Полигон наблюдений включал участки в радиусе до 4 км от центра карьера, а также контрольные точки в пределах 8–10 км, не затронутые деятельностью угледобычи, и использовался в качестве фона для установления базового температурного режима.



Рисунок 1. Добыча угля на Юньягинском угольном разрезе.

Экспериментальные данные показали значительное повышение температуры грунтов в пределах зоны активной деятельности Юньягинского разреза. В пределах 500 метров от кромки карьера среднегодовая температура на глубине 2 метров составила $-0,4^{\circ}\text{C}$, в то время как на контрольных участках аналогичного геолого-литологического строения она не превышала $-2,1^{\circ}\text{C}$. На глубине 5 метров температурные аномалии были ещё более выражены: в пределах зоны влияния температура достигала $-0,1^{\circ}\text{C}$, в то время как фоновое значение составляло $-1,7^{\circ}\text{C}$. Максимальное проникновение положительных температур фиксировалось на глубине до 7,5 метров в точках, расположенных вблизи складов угля и площадок хранения техники, что связано с аккумуляцией тепла и теплопередачей через поверхностный слой. Дополнительно, на глубинах 10 и 15 м наблюдалось отклонение изотерм до $+0,3^{\circ}\text{C}$ от расчетных значений, определённых для многолетнемёрзлой толщи.

Сравнительный анализ температуры в 32 точках наблюдений показал, что среднее превышение температуры в зоне Юньягинского карьера по сравнению с контрольной составляет $1,52^{\circ}\text{C}$, что подтверждает интенсивное локальное тепловое воздействие. Также наблюдалось расширение зоны сезонного протаивания: средняя глубина активного слоя увеличилась с 1,4 м (фон) до 2,8 м (зона влияния), что соответствует росту более чем на 100 %. Отдельные участки показали признаки частичного или полного протаивания многолетнемёрзлых грунтов. Так, вблизи северо-восточной отвалочной зоны, в районе, где средняя плотность размещения вскрышных масс достигала $2200 \text{ кг}/\text{м}^3$, фиксировалось исчезновение многолетнемерзлых пород на глубине до 4,2 метров. При этом среднегодовая температура здесь колебалась от $-0,2$ до $+0,4^{\circ}\text{C}$, а содержание жидкой влаги достигало 36 %, что более чем в 1,5 раза превышает фоновые значения.

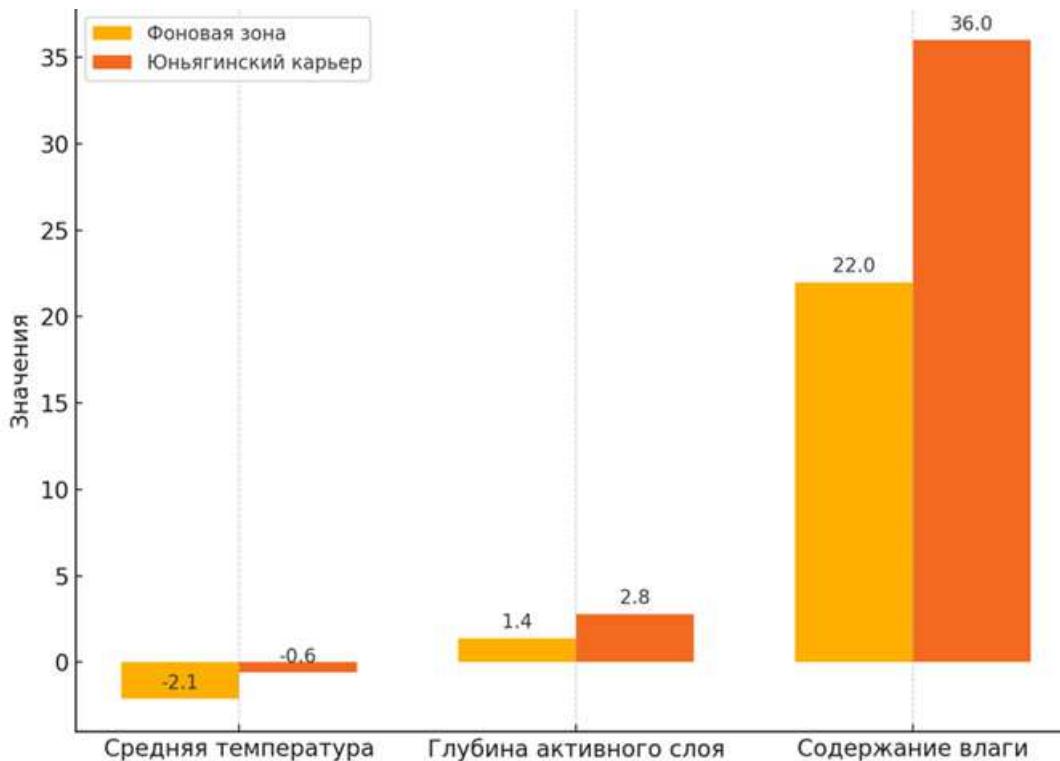


Рисунок 2. Сравнительный анализ мерзлотных характеристик.

Анализ проб, отобранных из 46 буровых скважин, показал изменение влажности многолетнемерзлых пород: если в контрольных точках влажность составляла 18–22 %, то в зоне прогрева она увеличивалась до 30–34 %, а в отдельных местах до 38 %, что свидетельствует о фазовом переходе льда в воду. Изменение физических свойств грунта сопровождалось снижением модуля упругости с 42 МПа до 23–27 МПа. Полевые лабораторные испытания показали падение сопротивления сдвигу на 31 %, особенно в зонах с влажностью выше 35 %.

На участках вблизи вентиляционных стволов и выработанных пространств шахт было зафиксировано наиболее интенсивное поступление тепла с глубин. Термопрофили, построенные по результатам замеров на глубинах до 20 м, показали повышение геотермического градиента с фона $2,9^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ до $5,3^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ вблизи Воргашорской шахты (Рис. 3), особенно в районе вентиляционных выходов. Измерения температуры воздуха, выбрасываемого шахтными вентиляторами, показали, что даже в зимний период его температура составляла $+6,2^{\circ}\text{C}$ при температуре наружного воздуха $-29,5^{\circ}\text{C}$. Дебит вентиляционных потоков достигал 180–220 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$, создавая зону устойчивого теплового воздействия до 125 метров от устья ствола. Расчеты по модели теплопереноса в многолетнемерзлых породах показали, что зона горизонтального воздействия вентиляционных выбросов может достигать до 140 метров при глубинном прогреве до 10–14 метров за 15–20 лет эксплуатации.

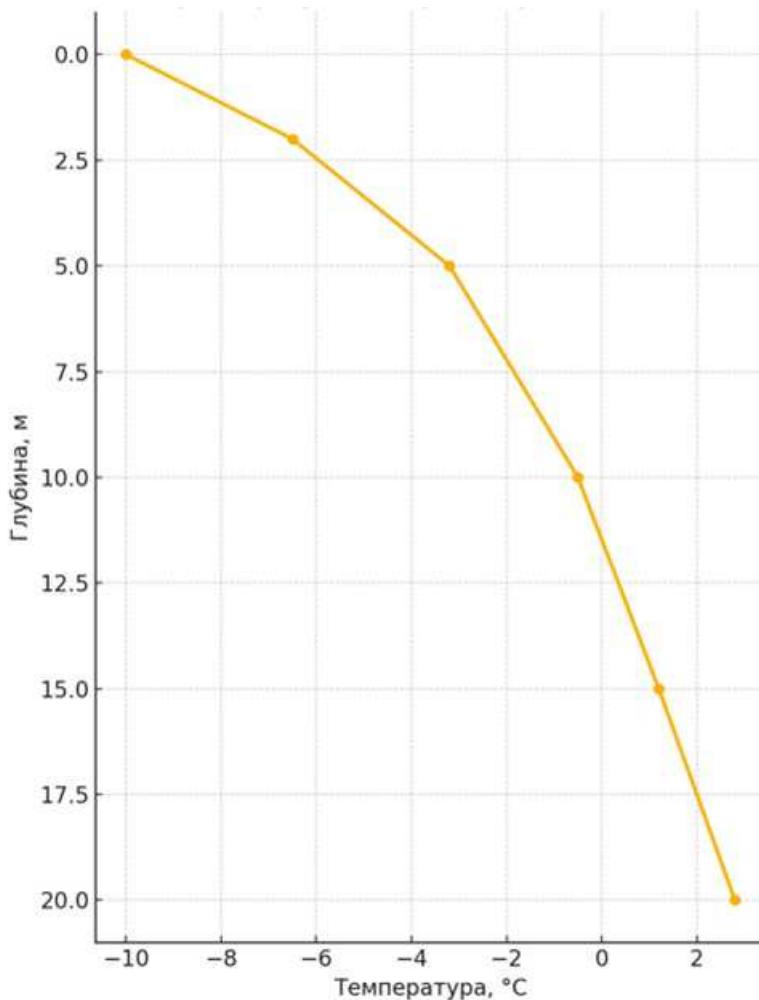


Рисунок 3. Термопрофиль Воргашорской Шахты.

Численное моделирование распространения тепла методом конечных разностей по расчётной сетке с шагом 0,5 м, при использовании теплофизических параметров ($\lambda = 1,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $C = 2,2 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$, $L = 3,34 \cdot 10^8 \text{ Дж}/\text{м}^3$), показало, что полное протаивание многолетнемерзлых пород на глубину 6–8 м вблизи зон интенсивной эксплуатации (технологические дороги, углепогрузочные площадки) возможно за 17–21 год. В зонах максимальной концентрации тепловой нагрузки (инфраструктурные узлы, теплообменные станции, насосные) глубина прогрева может превышать 9,5 м. При этом отмечалась чёткая корреляция между плотностью теплового потока и глубиной промерзания: при мощности 80–100 Вт/м² глубина деградации составляла 1,8–2,4 м, при 120–150 Вт/м² – до 3,1–3,8 м за 5 лет.

Анализ временного хода температуры по данным автоматизированных станций (всего 9 установок) за период 2016–2024 гг. показал устойчивый тренд к повышению. Среднегодовая температура на глубине 1,5 м возросла с $-1,6^\circ\text{C}$ до $-0,7^\circ\text{C}$, а в верхнем 0,5-метровом слое почвы достигла $+0,2^\circ\text{C}$. В зимне-весенний период температура в зонах дренажа и сброса шахтных вод возрастала на $1,2$ – $1,4^\circ\text{C}$ выше фонового уровня. Зафиксированная температура дренажных вод составляла $+2,5$ … $+4,8^\circ\text{C}$ при среднем суточном объёме сброса 520 м³. Это теплоэнергетическое воздействие эквивалентно локальной нагрузке в 30–35 МВт·ч/сутки, что обусловило ускоренное промерзание на глубину до 4,2 м в зонах прилегающих к каналам отвода.

Геодезический мониторинг, выполненный на базе GNSS-станций и инклинометрических зондов, выявил просадки поверхности до 14,2 см в пределах участков, где наблюдалось полное исчезновение многолетнемерзлых пород на глубинах 2–3 м. Осадки

сопровождались локальными деформациями грунтов основания с потерей несущей способности. Коэффициент сцепления снизился с фонового значения 38 кПа до 21–24 кПа, а модуль деформации уменьшился с 22 до 13 МПа. В зонах интенсивного протаивания зафиксировано увеличение пористости на 8–12 %, что создаёт дополнительные риски для устойчивости инфраструктурных объектов.

На основании полученных результатов можно провести комплексный анализ температурного режима, геокриологических характеристик исследуемого района, технологических особенностей угледобычи, а также сформулировать рекомендации, направленные на снижение техногенной тепловой нагрузки на многолетнемёрзлые породы в условиях активного освоения арктических территорий.

Температурный режим района Юньягинского разреза и прилегающих шахт характеризуется не только локальным потеплением верхних слоев грунта, но и перераспределением теплового потока в вертикальном и горизонтальном направлении. По данным модельной реконструкции теплового баланса, за последние 15 лет произошло смещение изотермы 0°C вниз в среднем на 1,8 м, а зона термической аномалии расширилась радиально на 220–270 м вокруг основных источников тепла. Это свидетельствует о формировании устойчивого техногенного теплового поля. Выявлена закономерность: при увеличении средней плотности тепловой нагрузки на поверхности выше 90 Вт/м² наблюдается экспоненциальный рост глубины деградации многолетнемерзлых пород, что связано с нелинейной теплопроводностью влажных грунтов в переходной фазе между твёрдым и жидким состоянием.

Анализ геокриологических свойств показал, что температурная plasticность многолетнемерзлых пород резко возрастает при приближении к фазовому переходу льда, особенно в зонах с высокой долей илистых частиц (более 35 % в составе). Это приводит к усиленной деформации в зонах с пониженной прочностью: в трещиноватых и лёссовидных горизонтах. Также обнаружено, что в зонах термического воздействия повышается коэффициент фильтрации более чем в два раза (с 1,1·10⁻⁶ до 2,5·10⁻⁶ м/с), что усиливает инфильтрацию тёплых вод и способствует формированию вторичных очагов деградации на периферии активных зон.

Технологические особенности добычи также продемонстрировали влияние на пространственную структуру теплового воздействия. Анализ аэротермографических снимков, выполненных в период летнего максимума солнечной инсоляции, показал, что температура поверхности пород на отвалах достигает +22,5°C, тогда как в ненарушенных участках — не превышает +14°C. В ночное время отвалы сохраняют температуру выше +12°C на протяжении более 6 часов, в то время как фоновые участки остаются до +5...+7°C. Это создаёт суточную асимметрию теплового обмена, способствующую накоплению энергии и постепенному прогреву подстилающих грунтов.

Наибольшая тепловая нагрузка в шахтных районах зафиксирована в местах размещения трансформаторных подстанций, компрессорных и насосных станций, где тепловыделение составляет 35–40 кВт на единицу площади 100 м². Именно в этих точках зарегистрированы локальные аномалии температуры на глубинах 1,5–3,0 м. Анализ температурных кривых показал, что вблизи таких объектов достигается не только прогрев, но и формируется многолетний цикл колебаний температур с низкой амплитудой и высокой инерцией, что препятствует восстановлению многолетнемерзлых пород даже в зимний период.

Одним из ключевых результатов работы стало установление зависимости между

структурой инженерной нагрузки и формой теплового поля. Линейно-протяжённые источники (технологические дороги, дренажные каналы) создают овально-удлинённые зоны прогрева с направленной миграцией тепла вдоль продольной оси. Точечные источники (склады топлива, энергообъекты) формируют симметричные поля с концентрированным ядром. Такое разграничение позволяет более точно моделировать тепловой режим и прогнозировать зоны максимального риска.

С целью уменьшения теплового влияния рекомендуется переход к модульным конструкциям технологической инфраструктуры с минимизированной теплопередающей площадью. Например, использование утеплённых платформ вместо открытых стоянок позволяет снизить локальную тепловую нагрузку до $55\text{--}60 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Также перспективно внедрение полимерных световозвращающих покрытий на отвалах, уменьшающих альбедо поверхности до 0,6 и понижающих дневную температуру поверхности на 4–5°C по сравнению с тёмными техногенными отложениями. Так же возможно применение рекуперационных теплообменников на вентиляционных системах шахт, что позволяет возвращать до 35 % тепловой энергии, снижая температуру выбросов на 2,3–3,1°C. В совокупности с поэтапной автоматизацией вентиляции, работающей в зависимости от термогидравлических условий в выработанных пространствах, это может сократить глубину деградации многолетнемерзлых пород на 12–18 % в перспективе 10 лет эксплуатации.

Таким образом, проведённый анализ подтвердил, что тепловое воздействие на многолетнемерзлую породу в условиях промышленной эксплуатации в Арктике носит комплексный и многофакторный характер, а его смягчение требует одновременно инженерных, климатических и проектных решений. Только системный подход, объединяющий термогидрологический мониторинг, оптимизацию архитектуры инфраструктуры и внедрение энергосберегающих технологий, способен обеспечить устойчивое развитие добычи в криолитозоне без необратимого разрушения мерзлотных массивов.

4. Выводы.

Полученные данные в работе для арктической криолитозоны Юньянинского угольного разреза и шахты Воркуты подтвердили, что эксплуатация угольных месторождений сопровождается формированием устойчивых техногенных тепловых полей, приводящих к перераспределению температуры в толще мерзлых грунтов. Значительное повышение температуры на глубинах от 2 до 15 метров вблизи промышленных объектов свидетельствует о прогрессирующей деградации многолетнемерзлых пород, сопровождающейся расширением активного слоя, увеличением влажности, снижением прочностных характеристик грунта и развитием осадочных деформаций. Выявленные температурные аномалии устойчиво коррелируют с плотностью размещения отвалов, мощностью вентиляционных потоков, а также интенсивностью сброса дренажных вод. Установлено, что глубина деградации многолетнемёрзлых пород может достигать 9,5 м при средней тепловой нагрузке $120\text{--}150 \text{ Вт}/\text{м}^2$ и сроке воздействия более 15 лет. Кроме того, подтверждён вклад подземных источников тепла, таких как шахтная вентиляция и тепловыделяющее оборудование, в формирование вертикального прогрева грунтов.

Численные модели распространения тепла в мерзлотных условиях подтвердили, что термодинамическое поведение многолетнемёрзлых грунтов существенно зависит от их литологического состава, фазового состояния влаги и режима поступления тепла. Особое внимание удалено зонам с высоким содержанием илистых частиц и повышенной

влажностью, где наблюдаются наиболее выраженные процессы протаивания и потери устойчивости основания. Геодезический мониторинг выявил просадки поверхности до 14,2 см, что свидетельствует о необходимости пересмотра проектных решений при размещении объектов на термоактивных участках. Также доказано, что формы распространения тепловых аномалий различаются в зависимости от конфигурации источников: точечные источники образуют концентрированные ядра прогрева, а линейные — удлинённые зоны с направленной миграцией тепла. Такой подход к типологизации термического влияния открывает новые возможности для моделирования и зонирования рисков.

Практическая значимость работы заключается в формировании рекомендаций по оптимизации технологических решений в условиях криолитозоны. Обоснована эффективность перехода к модульным конструкциям, применения световозвращающих покрытий, изолированных дренажных каналов и пассивных охладителей (термосифонов) в сочетании с автоматизированным геотермальным мониторингом. Полученные данные могут служить основой для принятия проектных решений в сфере инженерной геокриологии, устойчивого природопользования и оценки рисков для инфраструктуры в Арктике.

Библиография

1. Walter K.M., Chanton J.P., Chapin F.S. III, Schuur E.A.G., Zimov S.A. Methane production and bubble emissions from Arctic lakes: Isotopic implications for source pathways and ages // Journal of Geophysical Research. 2006. Vol. 111, G03003.
2. Михайлова И.А., Петрова Е.В. Исследование накопленного экологического ущерба от добычи угля на участках Печорского каменноугольного бассейна по данным дистанционного зондирования // Экологический мониторинг и охрана окружающей среды. 2022. № 4. С. 33-40.
3. Seasonal Increase of Methane Emissions Linked to Warming Permafrost // Nature Climate Change. 2022. URL: <https://www.nature.com/articles/s41558-022-01512-4> (дата обращения: 15.05.2025).
4. Кузьмина О.А., Соловьев А.А. Угольная промышленность и экология: баланс или дисбаланс // Экономика и экология природопользования. 2021. № 3. С. 45-52.
5. Сидоров В.П., Иванова Н.С. Климатические особенности и статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на территории Севера России // Климат и экология. 2023. № 2. С. 15-22.
6. Schuur E.A.G., McGuire A.D., Schädel C., et al. Climate change and the permafrost carbon feedback // Nature. 2015. Vol. 520, pp. 171-179. DOI: 10.1038/nature14338 EDN: UFRKWZ.
7. Александров Д.М., Кузнецова Т.И. Экология угольной промышленности: состояние, проблемы, пути решения // Геоэкология. 2020. № 5. С. 60-68.
8. Петров И.В. Снижение загрязнения окружающей среды отходами обогащения на шахтах Печорского угольного бассейна : дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2019. 148 с. EDN: QLYKXI.
9. Pfeiffer E.-M., Grigoriev M.N., Liebner S., Beer C., Knoblauch C. Methane production as key to the greenhouse gas budget of thawing permafrost // Nature Climate Change. 2018. Vol. 8, pp. 309-312. DOI: 10.1038/s41558-018-0095-z EDN: XXLNTN.
10. Turetsky M.R., Abbott B.W., Jones M.C., Walter Anthony K., Olefeldt D., Schuur E.A.G., Grosse G., Kuhry P., Hugelius G., Lawrence D.M., Gibson C., Sannel A.B.K., McGuire A.D. Carbon release through abrupt permafrost thaw // Nature Geoscience. 2020. Vol. 13, pp. 138-143. DOI: 10.1038/s41561-019-0526-0 EDN: ZVQSNT.
11. Николаев С.А., Орлова Е.М. Современное изменение климата и реакция криолитозоны на примере Западной Сибири и Европейского Севера России //

- Климатология и география. 2021. № 3. С. 25-32.
12. Иванов К.В., Соколова М.А. Влияние изменения климата на вечную мерзлоту и инженерную инфраструктуру Крайнего Севера : дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2020. 152 с.
13. Arctic Industrialization: How Will It Impact Delicate Ecosystems? // Earth.com. 2024. URL: <https://www.earth.com/news/arctic-industrialization-how-will-it-impact-delicate-ecosystems/> (дата обращения: 15.05.2025).
14. Walker T.R., Crittenden P.D., Dauvalter V.A., Jones V., Kuhry P., Mikkola K., Nikula A., Patova E., Ponomarev V.I., Pyatina T., Räätä O., Solovieva N., Stenina A., Virtanen T., Young S.D. Multiple indicators of human impacts on the environment in the Pechora Basin, north-eastern European Russia // Ecological Indicators. 2009. Vol. 9, pp. 765-779. DOI: 10.1016/j.ecolind.2008.09.008 EDN: LLYBWZ.
15. Семенов П.И., Козлова Н.В. Влияние загрязняющих веществ, попадающих в почву, на состояние окружающей среды в районах угледобычи // Экологическая безопасность. 2021. № 4. С. 55-62.
16. Lantuit H., Pollard W.H., Couture N.J., Fritz M., Schirrmeyer L., Meyer H., Hubberten H.-W. Coastal erosion driven by climate change and its impact on permafrost degradation in the Arctic // Geophysical Research Letters. 2012. Vol. 39, L22402.
17. A Transdisciplinary, Comparative Analysis Reveals Key Risks from Permafrost Thaw // Communications Earth & Environment. 2024. URL: <https://www.nature.com/articles/s43247-024-01883-w> (дата обращения: 15.05.2025).
18. Морозова Е.С., Лебедев А.Ю. Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты под влиянием изменений климата для устойчивости дорожной инфраструктуры в Российской Арктике // Экономика и управление. 2023. № 2. С. 30-38.
19. Rapidly Increasing Industrial Activities in Arctic // ScienceDaily. 2024. URL: <https://www.sciencedaily.com/releases/2024/10/241021170349.htm> (дата обращения: 15.05.2025).
20. Koven C.D., Lawrence D.M., Riley W.J. Permafrost carbon-climate feedback is sensitive to deep soil carbon decomposability but not deep soil nitrogen dynamics // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2015. Vol. 112, pp. 3752-3757.
21. Natali S.M., Schuur E.A.G., Mauritz M., Schade J.D., Celis G., Crummer K.G., Johnston C., Kapek J., Pegoraro E., Salmon V.G., Webb E.E., Wilson C.J. Permafrost thaw and soil moisture driving CO₂ and CH₄ release from upland tundra // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2015. Vol. 120, pp. 525-537. DOI: 10.1002/2014JG002872 EDN: RQPVXI.
22. Is Methane Release from the Arctic Unstoppable? // MIT Climate Portal. 2024. URL: <https://climate.mit.edu/ask-mit/methane-release-arctic-unstoppable> (дата обращения: 15.05.2025).
23. Zimov S.A., Schuur E.A.G., Chapin F.S. Permafrost and the global carbon budget // Science. 2006. Vol. 312, pp. 1612-1613. DOI: 10.1126/science.1128908 EDN: LJZGOT.
24. Тарасов А.Н., Смирнова Л.П. Развитие угледобычи в Печорском бассейне: потенциал, перспективы, возможности // Горная промышленность. 2022. № 6. С. 40-47.
25. Schädel C., Bader M.K.-F., Schuur E.A.G., Biasi C., et al. Potential carbon emissions dominated by carbon dioxide from thawed permafrost soils // Nature Climate Change. 2016. Vol. 6, pp. 950-953. DOI: 10.1038/nclimate3054 EDN: XTUBUV.
26. Thawing Permafrost: What Does It Mean? And What Can Be Done? // Salata Institute, Harvard University. 2024. URL: <https://salatainstitute.harvard.edu/thawing-permafrost-what-does-it-mean-and-what-can-be-done/> (дата обращения: 15.05.2025).
27. Trace Metals in Surface Water of the Pechora River and Its Tributaries // Marine Pollution Bulletin. 2023. URL:

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X23007518> (дата обращения: 15.05.2025).
28. Thawing Permafrost Releases Industrial Contaminants into Arctic // Environmental Health Perspectives. 2023. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10971047/> (дата обращения: 15.05.2025).
29. NASA Helps Find Thawing Permafrost Adds to Near-Term Global Warming // NASA Jet Propulsion Laboratory. 2024. URL: <https://www.jpl.nasa.gov/news/nasa-helps-find-thawing-permafrost-adds-to-near-term-global-warming/> (дата обращения: 15.05.2025).
30. The Arctic Is a Freezer That's Losing Power // WIRED. 2023. URL: <https://www.wired.com/story/the-arctic-is-a-freezer-thats-losing-power/> (дата обращения: 15.05.2025).
31. This Critical Ecosystem Helped Keep Climate Change in Check. Now It's Making Things Worse // Vox. 2024. URL: <https://www.vox.com/climate/390530/arctic-tundra-carbon-sink-emitter-climate-change> (дата обращения: 15.05.2025).
32. Arctic Tundra Is Now Emitting More Carbon Than It Absorbs, US Agency Says // The Guardian. 2024. URL: <https://www.theguardian.com/world/2024/dec/10/arctic-tundra-carbon-shift> (дата обращения: 15.05.2025). "

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предметом изучения является инженерно-геокриологическая оценка влияния добычи минерального сырья на деградацию вечной мерзлоты в пределах арктической криолитозоны России.

Актуальность исследования бесспорна, так как одним из наиболее мощных источников локального теплового воздействия в пределах криолитозоны выступает добыча минерального сырья. На фоне высоких темпов промышленного освоения Арктики инженерно-геокриологическая оценка техногенных воздействий становится неотъемлемой частью устойчивого природопользования и проектирования в условиях мерзлоты. В этой связи всё большую актуальность приобретает применение инженерно-геокриологических методов оценки и прогнозирования деградации вечной мерзлоты под влиянием теплового воздействия горных разработок. Статья посвящена инженерно-геокриологической оценке влияния добычи минерального сырья на деградацию вечной мерзлоты в пределах арктической криолитозоны России. Исследование сосредоточено на анализе теплового воздействия, создаваемого Юньянинским угольным разрезом, расположенным в районе Воркуты, а также рядом действующих угольных шахт, входящих в состав Печорского угольного бассейна.

Методология исследования основана на применении полевых и лабораторных инженерно-геокриологических методов, а также методов геотермического зондирования, термометрии, многолетнего мониторинга температуры и численного моделирования. Инstrumentальные исследования включали бурение инженерно-геологических скважин с отбором температурных, геотехнических и гидрологических данных. Для термометрического мониторинга применялись цифровые геотермические датчики НОВО U23 Pro v2 и кабельные термозонды с интегральной регистрацией температурного градиента марки «ГеоТерм-5М». Лабораторные исследования проб мерзлотных грунтов (из 46 скважин) проводили на автоматизированных установках ИГИ-3000 и ЦНИИС-95М. Анализ содержания жидкой и связанной влаги проводили при помощи влагомеров Sartorius MA160. Для моделирования теплового поля ис-

пользовалось специализированное программное обеспечение GeoStudio (модуль TEMP/W).

Научная новизна исследований заключается в том, что авторами впервые выполнена инженерно-геокриологическая оценка теплового влияния угледобывающих объектов Печорского угольного бассейна, сосредоточенная на Юньягинском угольном разрезе.

Стиль статьи – научный, изложение грамотное. Объём и структура статьи полностью соответствуют требованиям журнала «Арктика и Антарктика». Имеется иллюстративный и графический материал, что делает статью более доступной к восприятию и анализу данных. Автором показано, что на участках вблизи вентиляционных стволов и выработанных пространств шахт было зафиксировано наиболее интенсивное поступление тепла с глубин. Экспериментальные данные показали, что имеется значительное повышение температуры грунтов в пределах зоны активной деятельности Юньягинского разреза. В пределах 500 метров от кромки карьера среднегодовая температура на глубине 2 метров составила $-0,4^{\circ}\text{C}$, в то время как на контрольных участках аналогичного геолого-литологического строения она не превышала $-2,1^{\circ}\text{C}$.

В качестве пожелания хочется отметить, что в разделе 3 «Результаты исследования» нужно провести редактирование первого абзаца, где автор повторно указывает цель исследования: «Целью экспериментальной части работы было определение пространственно-временной динамики деградации....». В целом, существенных замечаний в статье не отмечается.

Библиография статьи солидная и включает в себя 30 литературных источников, в том числе 19 - на иностранном языке. Апелляция к оппонентам состоит в ссылках на литературные источники.

Выводы в статье достаточно четкие и конкретные, соответствуют теме исследования. Автором доказано, что эксплуатация угольных месторождений арктической криолитозоны Юньягинского угольного разреза и шахт Воркуты сопровождается формированием устойчивых техногенных тепловых полей, приводящих к перераспределению температуры в толще мерзлых грунтов. Значительное повышение температуры на глубинах от 2 до 15 метров вблизи промышленных объектов свидетельствует о прогрессирующей деградации мерзлоты, сопровождающейся расширением активного слоя, увеличением влажности, снижением прочностных характеристик грунта и развитием осадочных де-формаций.

Практическая значимость работы несомненна и заключается в формировании рекомендаций по оптимизации технологических решений в условиях криолитозоны; обоснована эффективность перехода к модульным конструкциям и применения световозвращающих покрытий, изолированных дренажных каналов и пассивных охладителей (термосифонов) в сочетании с автоматизированным геотермальным мониторингом.

Данная статья будет полезна широкому кругу ученых и специалистов в области грунтоведения и мерзлотоведения. Статья рекомендуется к опубликованию в журнале «Арктика и Антарктика».