

Арктика и Антарктика*Правильная ссылка на статью:*

Гребенкин С.И., Бугаков В.И., Николайчук Э.В., Столяров В.И., Дугин И.В., Полонский Ю.И., Слобожанина О.И., Санников А.О. Создание инженерно-геокриологической модели Западного Ямала, как основы для геокриологического мониторинга и прогноза // Арктика и Антарктика. 2025. № 4. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.4.76514 EDN: EKQFEY URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=76514

Создание инженерно-геокриологической модели Западного Ямала, как основы для геокриологического мониторинга и прогноза

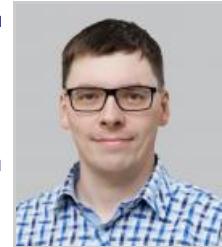
Гребенкин Сергей Игоревич

ORCID: 0000-0003-3478-2314

кандидат геолого-минералогических наук

Руководитель направления по разработке продукта; Центр по обустройству и эксплуатации месторождений; ООО "Газпромнефть-Заполярье"

625048, Россия, Тюменская обл., г. Тюмень, ул. 50 лет Октября, д. 86



✉ grebenkin.sergei@gmail.com

Бугаков Владислав Игоревич

ORCID: 0000-0002-1165-3758

кандидат геолого-минералогических наук

Руководитель направления по инженерным изысканиям; Центр по обустройству и эксплуатации месторождений; ООО "Газпромнефть-Заполярье"

625048, Россия, Тюменская обл., г. Тюмень, ул. 50 лет Октября, д. 86



✉ butakovi@yandex.ru

Николайчук Эдуард Васильевич

Руководитель центра; Центр по обустройству и эксплуатации месторождений; ООО "Газпромнефть-Заполярье"

625048, Россия, Тюменская обл., г. Тюмень, ул. 50 лет Октября, д. 86



✉ Nikolachuk@mail.ru

Столяров Вадим Игоревич

Технический директор; ООО "Газпромнефть-Заполярье"

625048, Россия, Тюменская обл., г. Тюмень, ул. 50 лет Октября, д. 86



✉ 89026267692@mail.ru

Дугин Иван Владимирович

Руководитель направления; Центр по обустройству и эксплуатации месторождений; ООО "Газпромнефть-Заполярье"

625048, Россия, Тюменская обл., г. Тюмень, ул. 50 лет Октября, д. 86



✉ i@idugin.ru

Полонский Юрий Иванович

Руководитель направления по методологии и стандартизации; Центр по обустройству и эксплуатации месторождений; ООО "Газпромнефть-Заполярье"

625048, Россия, Тюменская обл., г. Тюмень, ул. 50 лет Октября, д. 86

✉ polonskiy-yi@yandex.ru



Слобожанина Оксана Игоревна

ORCID: 0009-0002-2931-8103

Техник; Центр по обустройству и эксплуатации месторождений; ООО "Газпромнефть-Заполярье"

625048, Россия, Тюменская обл., г. Тюмень, ул. 50 лет Октября, д. 86

✉ slobozhanina.oxana@yandex.ru



Санников Антон Олегович

Руководитель направления по экспертизе термостабилизации грунтов в многолетнемерзлых грунтах; Центр экспертизы проектирования новых мощностей; ООО "Газпромнефть-Заполярье"

625048, Россия, Тюменская обл., г. Тюмень, ул. 50 лет Октября, д. 86

✉ weymar87@gmail.com



[Статья из рубрики "Многолетнемерзлые породы и подземные льды Арктики, Антарктики и горных регионов"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2025.4.76514

EDN:

EKQFEY

Дата направления статьи в редакцию:

29-10-2025

Дата публикации:

26-11-2025

Аннотация: На уникальных и высоко изменчивых территориях Арктики за последние десятилетия наблюдается повышение среднегодовых температур воздуха, что влияет на увеличение глубины сезонного протаивания многолетнемерзлых пород, активизацию термокарстовых процессов и ведет к изменению несущей способности грунтов. В связи с этим задачи по разработке технических решений для термостабилизации оснований, геокриологического и геотехнического мониторинга и инженерно-геокриологического прогноза территорий выходят на передний план. Одним из основных методов наблюдений за температурным режимом грунтов является обустройство постоянных термометрических скважин, которые позволяют оценивать как ежегодные, так и

многолетние колебания температур. По такому принципу в России создается Государственная система фонового мониторинга. Однако состояние температурного режима верхних горизонтов криолитозоны можно также оценивать по многочисленным замерам температур в скважинах при проведении инженерных изысканий. Наличие сотен измеренных скважин позволяет статистическими методами отсечь ошибочные значения и получить распределение значений по всей исследуемой территории. В статье описаны методические подходы к созданию цифровой модели верхних горизонтов криолитозоны Западного Ямала, основанные на методе матричного районирования с использованием методов статистической обработки данных, регressiveко-корреляционного анализа для выявления зависимостей между параметрами рельефа, ландшафтов и геологической среды. Основой модели послужили данные инженерных изысканий, а также данные дистанционных методов зондирования Земли. Предложенный подход позволяет проводить комплексный анализ и мониторинг состояния мерзлых толщ на данной территории, а также идентифицировать технологические и экономические сложности на этапе проектирования и эксплуатации сооружений. На основе полученных данных были установлены закономерности для интерполяции и экстраполяции инженерно-геокриологических условий на территориях с недостаточной степенью изученности. В результате сформирована модельная база данных с характеристиками, необходимыми для проведения теплотехнического прогноза численными методами, на основе которой создана динамическая геоинформационная модель мерзлотных условий. Практическая значимость разработанных подходов заключается в их универсальности применения при планировании деятельности в криолитозоне. Они могут эффективно использоваться при проведении инженерных изысканий для разработки проектной документации, выполнении теплотехнического прогноза температур грунтов на этапе проектирования, а также в рамках геотехнического мониторинга на стадии эксплуатации объектов.

Ключевые слова:

инженерно-геокриологическая модель, геоинформационная система, геокриологическое районирование, прогноз температурного режима, инженерные изыскания, геокриологический мониторинг, геокриологический прогноз, полуостров Ямал, типизация разрезов, матричная классификация

Введение

В последние десятилетия наблюдается устойчивый тренд к повышению среднегодовых температур воздуха, оказывающий значительное влияние на элементы криосферы [1]. Климатические данные, такие как приземная температура воздуха, высота и плотность снежного покрова, скорость и направление ветра, являются исходными данными для численных методов прогнозирования температурного состояния многолетнемерзлых пород (ММП). Ранее представленные прогнозы изменения температуры ММП с 2000 г. на 50 лет составляли 1 °С и были основаны на температуре воздуха за период 1965–2005 гг. с линейным трендом 0,045 °С/год [2]. Однако, согласно новым данным, коэффициент линейного тренда среднегодовой температуры приземного воздуха для Центрального Ямала за период 1976–2024 гг. составляет более 0,08 °С/год [3]. При этом реакцией ММП на изменение температуры воздуха является смещение южной границы криолитозоны к северу и повышение среднегодовой температуры пород, что создает неблагоприятные условия для устойчивости инфраструктуры месторождений [4–7].

В последние годы для отслеживания естественных изменений температур горных пород создается Государственная система фонового мониторинга состояния многолетней мерзлоты. Мониторинг проводится преимущественно на стационарах и площадках периодического обследования в скважинах глубиной 20–30 м, а его результаты экстраполируют и интерполируют на всю территорию [8,9].

Данный метод обладает как преимуществами, так и недостатками. Неоспоримым преимуществом является возможность отслеживания изменения температурной волны по глубине, что дает представления об изменениях климата в недалеком прошлом и возможности для прогноза таких колебаний в ближайшем будущем. Однако данные измерения характеризуют точку полигона или стационара и могут иметь отклонения, связанные с локальными особенностями.

Более детальные особенности температурного режима верхней части разреза, наиболее важной при проектировании и строительстве, можно получить из массива данных инженерно-геологических изысканий, которые могут также являться исходными данными для численного прогноза температурного режима грунтов по всей площади региона. Данные прогнозы необходимы для обеспечения безопасной эксплуатации месторождений в условиях Арктики.

Для проведения численного моделирования и прогнозирования необходим сбор параметров природной среды [7], учет сложных взаимосвязей начальных и граничных условий, включающий дифференциальные уравнения теплопроводности, влагопроводности, солепереноса [10]. Для повышения достоверности районирования территорий актуально получение информации о территории при помощи инструментов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В результате их дешифрирования можно провести анализ изменений ландшафтов [11], фиксацию экзогенных процессов [13], изменение фитомассы растительности, влияющей на условия теплообмена грунта [14].

Для организации единой структуры сбора, хранения, обработки этих данных в «Газпромнефть-Заполярье» разработана геоинформационная система (ГИС), способная интегрировать данные инженерно-геологических изысканий (ИГИ), дистанционного зондирования, а также включающая специальный набор инструментов для учета региональных климатических особенностей и моделирования теплового режима грунтов с учетом их свойств.

Целью данной работы является создание и верификация геоинформационной инженерно-геокриологической модели (ИГМ), отражающей инженерно-геокриологическую обстановку верхнего горизонта криолитозоны, способной прогнозировать температурное состояние ММП.

Пилотным регионом выбрана территория Западного Ямала (рис. 1).

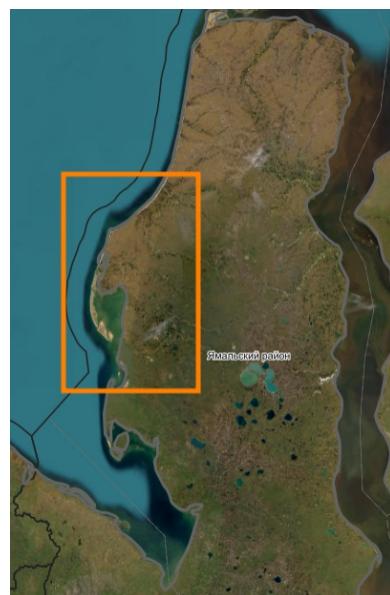


Рис. 1. Район создания инженерно-геокриологической модели

Разработка обширных запасов углеводородов Ямала потребовала проведения масштабных инженерно-геокриологических исследований на протяжении последних 50 лет. Результаты этих работ, включая тематические съемки и анализ свойств ММП, легли в основу проектирования фундаментов, методик прогнозирования изменений природной среды и рекомендаций по защите инженерных сооружений от криогенных процессов [15-17]. Обширный опубликованный материал позволяет верифицировать разрабатываемые модели на основе проведения ретроспективных прогнозов.

Методика создания инженерно-геокриологической модели

В основе ИГМ лежат подходы кусочно-непрерывного представления геологической среды. Каждый контур однороден и обладает средними значениями параметров среды и мерой рассеяния [18]. Варьируя размером элементов и набором свойств, можно оценить степень однородности геологического объекта на разных уровнях [19]. Для проведения границ между частями геологической среды используется информация ДЗЗ, наземных исследований, буровых и геофизических работ [20, 21]. Эти данные интерпретируют в соответствии с представлением о геологических системах, иерархия которых отображает структуру приповерхностной части литосферы, ее состояние и свойства [19].

Для целей обустройства и эксплуатации объектов нефтегазового комплекса ИГМ содержит только верхнюю часть геологического разреза. Ограничение сложности модели выражается выделением участков с конечным набором признаков и свойств геологической среды. В этом случае картографическое моделирование геокриологических условий реализуется методом районирования [22].

Алгоритм создания ИГМ включает следующие этапы:

1. Создание инженерно-геокриологической базы данных (БД). Сбор, систематизация и анализ текстовых, табличных и графических данных ИГИ района, включающей температуру, строение, состав и свойства верхней части разреза ММП.

2 . Приведение к единой дате данных термометрии численным методом. С помощью специализированного программного обеспечения проведен расчет БД по неявной схеме методом конечных разностей к стартовой дате модели — 01.12.2025.

3 . Проведение районирования территории с использованием матричной схемы. Анализ ландшафтных условий региона, разработка алгоритма последовательной генерализации инженерно-геологических элементов, построение и анализ геологических разрезов.

4 . Формирование БД модели. Алгоритм присваивания элементам модели свойств достаточных для проведения теплофизического прогноза численными методами.

5. Верификация ИГМ на архивных данных. Сопоставление архивных и модельных данных, полученных на одной территории в разный период времени.

Инструментом для управления пространственными данными, обеспечения их сбора, хранения, анализа и визуализации является ГИС. Вся информация, относящаяся к конкретному таксону, консолидируется в централизованной БД. Ее ключевая функция — накопление и структурирование данных, что позволяет предоставлять детальные сведения об инженерно-геокриологической характеристике любого участка в пределах изучаемой территории.

Методика создания инженерно-геокриологической базы данных

Для создания ИГМ авторами разработан алгоритм обработки текстовых и графических материалов, архитектура и шаблон БД фактического материала таким образом, чтобы обеспечить достаточность данных для проведения геокриологического районирования территории и проведения расчета численными методами [23]. БД фактического материала содержит следующую информацию:

- расположение инженерно-геологических скважин;
- геологический разрез с указанием инженерно-геологических элементов (ИГЭ), выполненный в табличном виде с динамическим разрешением по глубине;
- численные характеристики ИГЭ;
- дата и значения измеренной температуры пород по глубине.

Методики полевых и лабораторных исследований грунтов соответствовали действующей нормативной документации [24]. Характеристики ИГЭ были получены при статистической обработке [25].

БД фактического материала полевых и лабораторных исследований включает более 3000 инженерно-геокриологических скважин за период 2020–2025 гг.

На следующем этапе рассчитаны недостающие значения физических характеристик на основе средних значений по ИГЭ и исключены некорректные значения — опечатки и значения показателей за диапазонами возможных. Значения теплофизических характеристик рассчитаны по формулам [26]. 5 % термометрических эпюр были исключены как сомнительные.

Каждая строка БД имеет уникальный индекс, что позволяет дополнять БД, оценивать текущие распределения температур и строить геологические разрезы. Для верификации и калибровки модели предусмотрено использование архивных термометрических

измерений, а также возможность добавления новых данных по результатам инженерных изысканий.

Приведение к единой дате данных термометрии численным методом

Поскольку фактический материал содержит термометрию за период времени, включая разные сезоны, разработано специализированное программное обеспечение для расчета уравнения теплопроводности по неявной схеме методом конечных разностей [\[23\]](#).

Проведен расчет температурного режима 1 559 скважин на основе ретроспективных климатических данных для приведения температур к стартовой дате модели — 01.12.2025.

Верификация расчетов проведена в «Борей 3D» и Frost.Termo на 5%-й выборке. Оценены формы эпюров и значения смещения температур на разных глубинах относительно исходных измерений.

Методика районирования

За последние 60 лет создана обширная методическая база проведения геокриологического районирования, основанная на выявлении корреляционных зависимостей между характеристиками мерзлотных условий с одной стороны, и ландшафтной обстановкой и геолого-генетическими комплексами отложений с другой [\[27-29\]](#).

Значительным эволюционным шагом в развитии методик районирования стало использование цифровых баз данных, позволяющих учитывать большее количество элементов классификации. Ф. М. Ривкиным предложено использовать для геоинформационных систем матричную систему анализа факторов, которая представляет альтернативу традиционным иерархическим схемам районирования. Ее фундаментальный принцип состоит в том, что она оперирует сочетанием и взаимосвязью факторов, а не их соподчинением [\[22\]](#).

Состав матричной легенды является адаптивным и охватывает максимально широкий спектр параметров, который может трансформироваться в зависимости от задач картирования, масштаба и особенностей территории. Это делает схему не только инструментом для создания картографической легенды, но и мощным методом организации и обобщения гетерогенных данных [\[22\]](#).

В соответствии с физико-географическим районированием территория исследований расположена в пределах полуострова Ямал Западно-Сибирской равнины, севернее Полярного круга, в Ямальской провинции тундровой зоны. Климатические условия арктической зоны севера Западной Сибири характеризуются продолжительной холодной зимой и коротким прохладным летом, что обеспечивает сплошное распространение многолетнемерзлых пород и подземных льдов [\[30\]](#).

В районе исследований распространены залежеобразующие подземные льды и криопэги [\[31-35\]](#).

По данной методике для исследуемой территории составлена матрица условий, где первая группа включает геоморфологические, литолого-генетические характеристики (рельеф, генезис, состав и мощность четвертичных отложений, формации коренных пород). Другая группа объединяет поверхностные условия (микрорельеф поверхности, тип растительности, увлажненность почвенно-растительного слоя).

На исследуемой территории было выделено четыре геоморфологических уровня на основе цифровой модели рельефа Copernicus DEM 30 (рис. 2а) [\[36\]](#):

1. Лайда и низовья рек (0–2 м абсолют. отм.);
2. Озерно-аллювиальные поймы и террасы (0–10 м абсолют. отм.);
3. Слоны водоразделов (10–20 м абсолют. отм.);
4. Поверхности водоразделов (более 20 м абсолют. отм.).

При движении с запада на восток исследуемого района — к центру полуострова — абсолютные отметки геоморфологических уровней повышаются на 2–5 м.

В качестве ландшафтной основы была использована цифровая модель распространения почвенно-растительного слоя ESA CCI "Improved soil description through a landcover map dedicated for the Arctic", которая была генерализирована на основе обобщения схожих типов растительности и обводнения почвенного слоя (рис. 2б) [\[37\]](#).

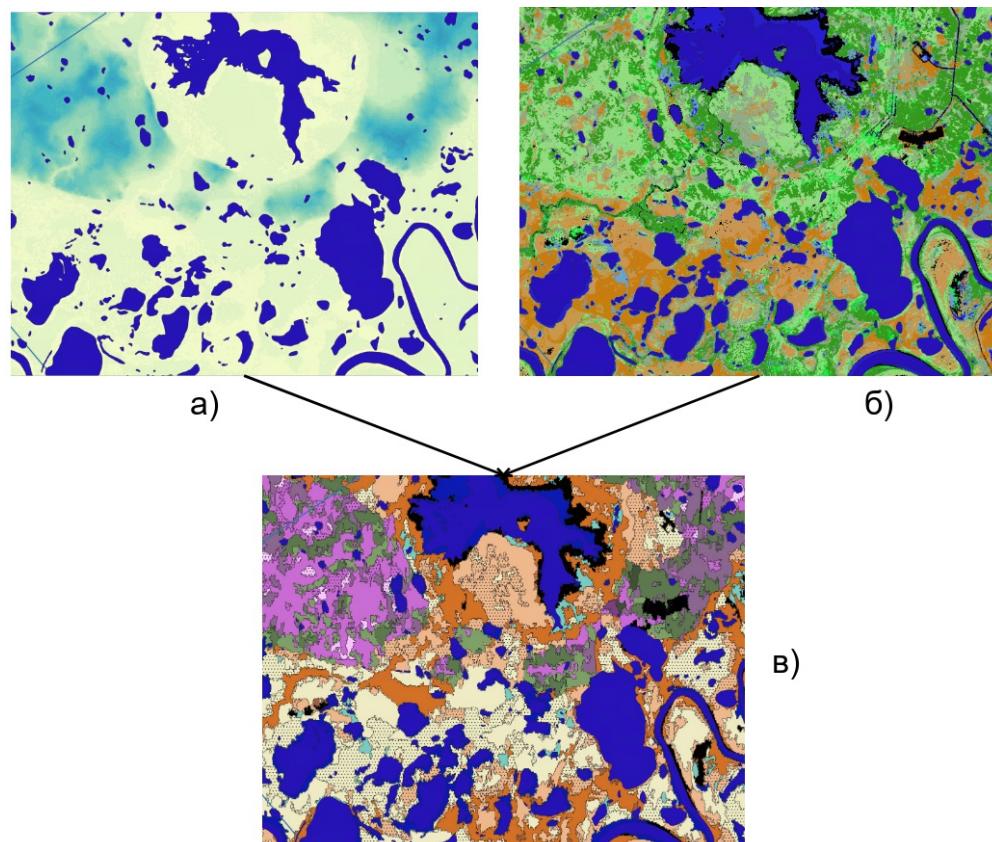


Рис. 2. Фрагмент цифровой модели рельефа [\[36\]](#) (а), фрагмент карты почвенно-растительного слоя (б), синтезированная ландшафтно-ключевая модель (в)

В результате синтезирования геоморфологической карты и карты типов почвенно-растительного слоя получена карта ландшафтов территории, представляющая собой все

пересечения матрицы геоморфологических и поверхностных условий (рис. 2в).

Типизация инженерно-геокриологических разрезов

Для оценки геолого-генетических особенностей грунтов была составлена база данных фактического материала на основе отчетов инженерных изысканий, содержащая информацию о разрезах скважин, сложенных инженерно-геологическими элементами, разбитыми на интервалы от 0,5 м в верхней части до 2 м на глубинах более 15 м от поверхности. Также БД содержит характеристики каждого ИГЭ и данные термометрии в данных скважинах.

Для объединения данных инженерных изысканий разных проектов на этапе создания приведенной базы данных проводилась статистическая генерализация разрезов до четырех уровней с присвоением каждому уровню индекса на основе состава, засоленности и льдистости грунтов (табл. 1).

Таблица 1. Индексирование типов грунтов

| 1 число | | 2 число | | 3 число | |
|---------|----------|---------|------------------|---------|----------------|
| 1 | Глина | 0 | Незасоленный | 0 | Нельдистый |
| 2 | Суглинок | 1 | Слабозасоленный | 1 | Слабольдистый |
| 3 | Супесь | 2 | Среднезасоленный | 2 | Льдистый |
| 4 | Песок | 3 | Сильнозасоленный | 3 | Сильнольдистый |
| 5 | Торф | | | 4 | Ледогрунт |
| | | | | 6 | Лед |
| | | | | 7 | Талый |
| | | | | 8 | Насыпной |

В результате проведенной статистической обработки в скважинах, расположенных в озерно-аллювиальных поймах и террасах для преобладающих грунтов на интервалах глубин 0–2,5, 3–5, 6–10, 11–17 м, получена матрица встречаемости элементов (рис. 3а).

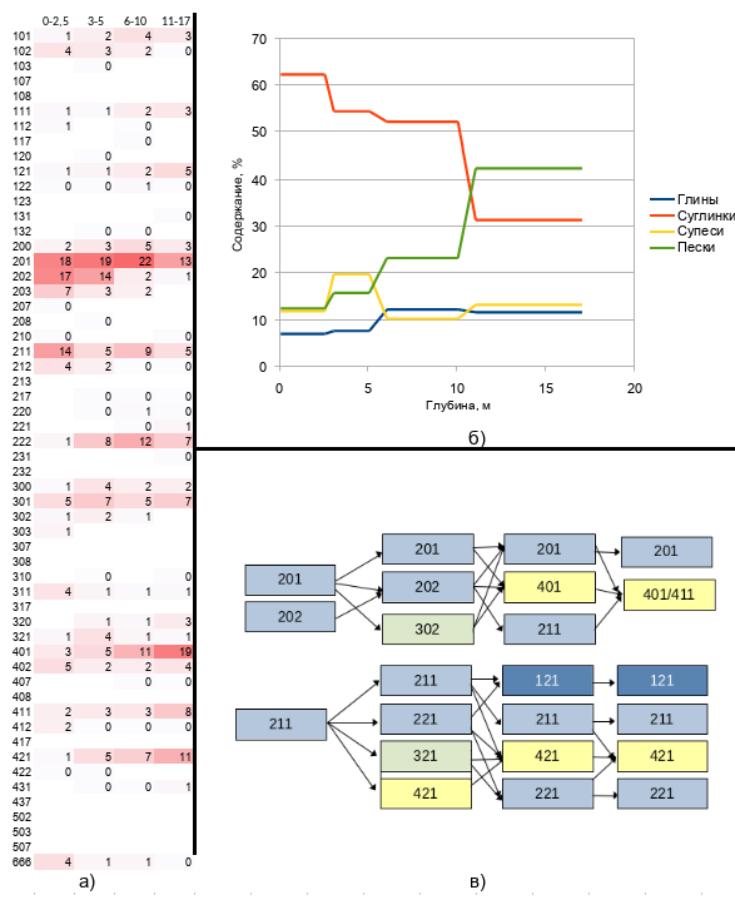


Рис. 3. Процентное соотношение встречаемости ИГЭ в разрезах пойм на глубинах от 0 до 17 м (а), изменение соотношений типов грунтов по глубине (б) и основные последовательности ИГЭ в разрезах (в)

В результате обработки данных выявлено, что в верхнем горизонте пойм (глубина до 2,5 м) преобладают суглинки (суммарно 62 %) (рис. 3б), в основном незасоленные и слабозасоленные с низкой и средней льдистостью (рис. 3а). Содержание глин и супесей достигает 12 %, а песков — 13 % (рис. 3а, б). Изредка встречается пластовый лед/ледогрунт (4 %) (рис. 3а).

На глубинах 3–5 м содержание глин достигает 7,9 %, суглинков 55 %, супесей 20 %, песков 16 % (рис. 3б). На следующем интервале 6–10 м, содержание глин составляет 12 %, суглинков 52 %, супесей 10 %, песков 23 % (рис. 3б). Нижний интервал на глубинах более 10 м представлен, в основном, песками (43 %), в меньшей степени суглинками (32 %) (рис. 3б). Содержание супесей и глин составляло 13 % и 12 % соответственно (рис. 3б).

В общем, анализируя изменение состава грунтов по глубине, можно отметить, что с увеличением глубины увеличивается песчанистость разреза. Если на первых 10 м преобладают суглинки, то после 10 м в разрезах преобладают пески.

Анализ изменчивости засоленности по глубине показал, что в верхнем горизонте, содержащем деятельный слой, породы не засолены, либо слабо засолены. С увеличением глубины возрастает встречаемость среднезасоленных пород, и с глубины более 5 м среднезасоленные и незасоленные породы встречаются примерно в равных количествах (35–40%) что, вероятно, связано с различным генезисом пород.

Изменение льдистости по глубине также проявляет четкую закономерность. В верхней

части разреза преобладали слабо- и среднельдистые породы, с глубиной встречаемость среднельдистых пород уменьшалась, а слабольдистых — увеличивалась.

Выявление типовых последовательностей ИГЭ по интервалам глубин проводилось статистическими методами сверху вниз по разрезу. В результате было построено дерево решений типичных разрезов (рис. 3в), согласно проведенным исследованиям включившее 21 тип разреза (рис. 3в).

В получившихся типовых разрезах верхний горизонт (0–2,5 м) представлен суглинками (рис. 3в), во втором горизонте (3–5 м) представлены суглинки, супеси и пески, а в третьем и четвертом (глубже 5 м) глины, суглинки и пески. Стоит отметить, что в озерных котловинах, находящихся в поймах, наблюдается торф до глубины 1,5 м. Также выявлено, что если разрез будет начинаться с незасоленных пород, то вероятнее всего весь разрез будет незасоленный, в то время как если разрез начинается с слабозасоленных пород, то с глубиной в разрезе уровень засоления пород повышается. При этом установлено, что в пойменных отложениях преобладают слабо- и среднельдистые породы независимо от состава.

Подобная методика проведения типизации разрезов на поймах была применена для водоразделов и их склонов и создана матрица встречаемости ИГЭ на выбранных интервалах глубин (рис. 4а)

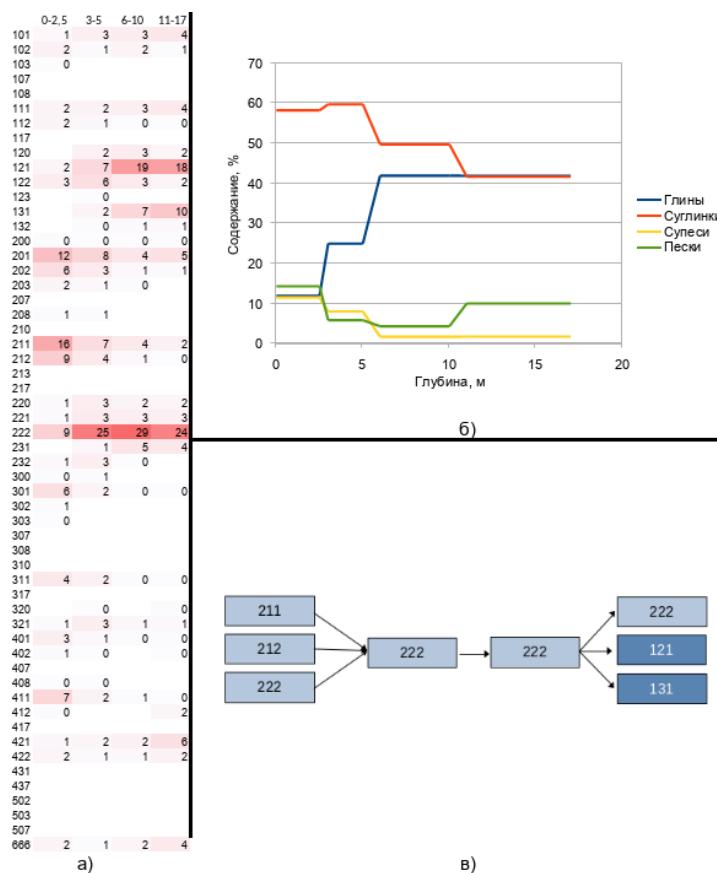


Рис. 4. Процентное соотношение встречаемости ИГЭ в разрезах водоразделов на глубинах от 0 до 17 м (а), изменение соотношений типов грунтов по глубине (б) и основные последовательности ИГЭ в разрезах (в)

Анализ встречаемости различных грунтов в верхнем горизонте водоразделов, аналогично с другими геоморфологическими уровнями, показал преобладание суглинков

(более 50 %). Содержание песков достигает 15 %, а глин и супесей по 12 % (рис. 4а,б).

Изредка встречается пластовый лед/ледогрунт (2 %) (рис. 4а)

С глубин более 3 м практически весь разрез глинистый (суммарная встречаемость глин и суглинков более 80 %), а песчаные грунты встречались менее чем в 10 % случаев (рис. 4б).

Анализ изменчивости засоленности по глубине показал, что в верхнем горизонте, содержащем деятельный слой, породы не засолены, либо слабо засолены. С увеличением глубины возрастает встречаемость среднезасоленных пород, и с глубины более 5 м среднезасоленные породы преобладают (рис. 4а). Также, с глубиной увеличивается встречаемость сильнозасоленных пород.

Изменения льдистости по глубине выявили преобладание слабольдистых пород по всей глубине разреза (более 50 %). Также в верхней части разреза встречалось значительное количество среднельдистых пород (более 30 %), которое с глубиной снизилось до 15 %.

Построенное дерево решений типичных разрезов (рис. 4в), согласно проведенным исследованиям, включило 11 типов разрезов (рис. 4в).

В получившихся типовых разрезах верхний горизонт (0–2,5 м) представлен суглинками (рис. 6в), а в более глубоких горизонтах встречаются глины и суглинки.

Анализ склонов водоразделов выявил большее разнообразие разрезов, так как склоны являются плавным переходом от водораздельных поверхностей к поймам (рис. 5в).

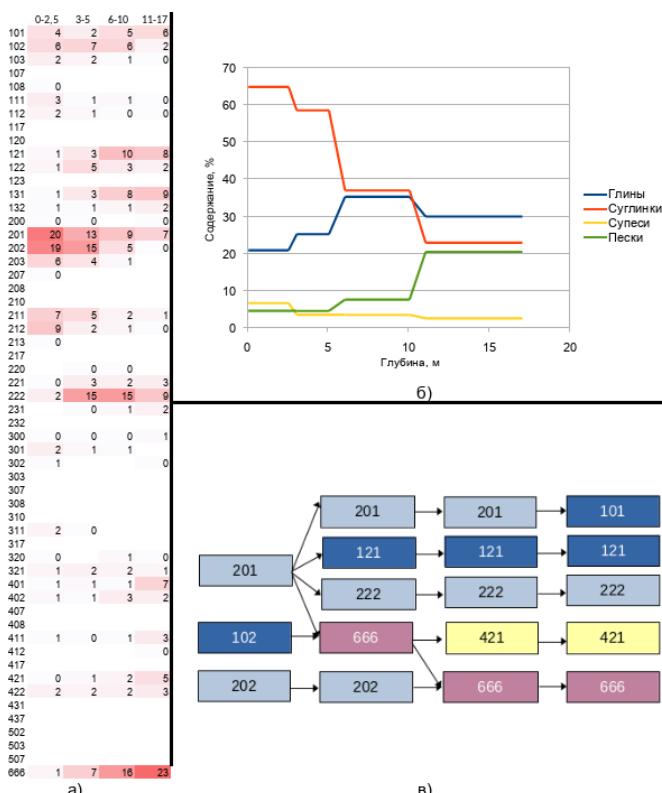


Рис. 5. Процентное соотношение встречаемости ИГЭ в разрезах склонов водоразделов на глубинах от 0 до 17 м (а), изменение соотношений типов грунтов по глубине (б) и основные последовательности ИГЭ в разрезах (в)

В верхнем горизонте грунтов на склонах водоразделов (глубина до 2,5 м) преобладают суглинки (65 %) различной льдистости и засоленности (рис. 5а). Содержание песков и супесей достигает 4,8 % и 6,9 %, соответственно, а глин — 21 % (рис. 5а,б). Изредка встречается пластовый лед/ледогрунт (3 %) (рис. 5а).

На глубинах 3–5 м встречаемость глин увеличилась до 25 %, а суглинков снизилась до 59 %, встречаемость песков составила 4,8 %, а супесей незначительные 3,8 % (рис. 5б). На следующем интервале 6–10 м, глинистость разреза увеличилась — глины и суглинки встречались в 35 % и 37 % случаев соответственно. Пески и супеси встречались незначительно (рис. 5б). Нижний интервал на глубинах более 10 м представлен в основном глинами (30 %), в 23% случаях суглинкам и либо песками (2,8 %), либо супесью (2,8 %) (рис. 5б). Также в 11–12% разрезов встречены пластовые льды (рис. 5а).

Анализ изменчивости засоленности по глубине показал, что в верхнем горизонте, содержащем деятельный слой, породы не засолены, либо слабо засолены. С увеличением глубины возрастает встречаемость среднезасоленных пород, и с глубины более 5 м среднезасоленные породы преобладают (рис. 5а).

Анализ льдистости по глубине выявил преобладание слабольдистых пород по всей глубине разреза (более 50 %). Также в верхней части разреза встречалось значительное количество среднельдистых пород (более 30 %), которое с глубиной снизилось до 10 %.

Согласно проведенным исследованиям, было построено дерево решений типичных разрезов (рис. 5в), включившее 12 типов разрезов (рис. 5в).

В получившихся типовых разрезах верхний горизонт (0–2,5 м) представлен суглинками (рис. 5в), во втором горизонте (3–5 м) представлен глинами, суглинками, супесью, а в третьем и четвертом (глубже 5 м) в основном глинами и суглинками.

Полученные типы разрезов позволяют выполнять крупномасштабное, высокодетальное геокриологическое районирование территории в пределах зон проведенных изысканий.

Для районирования изучаемого региона целиком на среднемасштабном уровне, включающего участки, не обеспеченные фактическим материалом, была проведена генерализация полученных типов разрезов.

Генерализация полученных крупномасштабных типов разрезов выполнялась на основе сравнения физических свойств ИГЭ в пределах каждого литологического типа с учетом возможного колебания мощности каждого слоя.

В результате было выделено 13 типичных разрезов (табл. 2).

Таблица 2. Криолитологические типы разрезов для среднемасштабной модели

| № | Тип |
|---|---|
| | Лайды |
| 1 | Пески, супеси, суглинки до 2–4 м льдистые, ниже — слабольдистые |
| | Поймы |

| 2 | Суглинки с прослойми супесей, незасоленные, слабо- и среднельдистые |
|----|--|
| 3 | Суглинки с прослойми супесей незасоленные, слабо- и среднельдистые, подстилаемые с 5-10 м песками незасоленными и слабозасоленными, слабольдистыми |
| 4 | Суглинки слабо- и среднезасоленные, слабольдистые, подстилаемые с 5-10 м глинами среднезасоленными, слабольдистыми |
| 5 | Суглинки с прослойми супесей, слабозасоленные, слабольдистые |
| 6 | Суглинки с прослойми супесей слабо- и среднезасоленные, слабольдистые, подстилаемые с 2-5 м песками среднезасоленными, слабольдистыми Водоразделы |
| 7 | Суглинки от слабо- до среднезасоленных, льдистые |
| 8 | Суглинки от слабо- до среднезасоленных, льдистые, подстилаемые с 10 м глинами средне- и сильнозасоленными |
| 9 | Суглинки незасоленные, слабольдистые, подстилаемые с 10 м глинами незасоленными, слабольдистыми |
| 10 | Суглинки незасоленные, слабольдистые, подстилаемые с 2-5 м глинами среднезасоленными, слабольдистыми |
| 11 | Суглинки и глины, незасоленные, слабо- и среднельдистые, подстилаемые с 2-5 м ледогрунтом и пластовым льдом |
| 12 | Суглинки, супеси незасоленные, слабольдистые и льдистые, подстилаемые с 10 м песками, супесями среднезасоленными |
| 13 | Пески, супеси, суглинки среднезасоленные, слабольдистые |

Полученные типы разрезов были добавлены в матрицу условий, после чего был проведен статистический анализ температур грунтов в зависимости от геологогенетических и ландшафтных условий.

С учетом полученных температурных диапазонов была сформирована матрица условий для среднемасштабного моделирования, фрагмент матрицы приведен на рисунке 6.

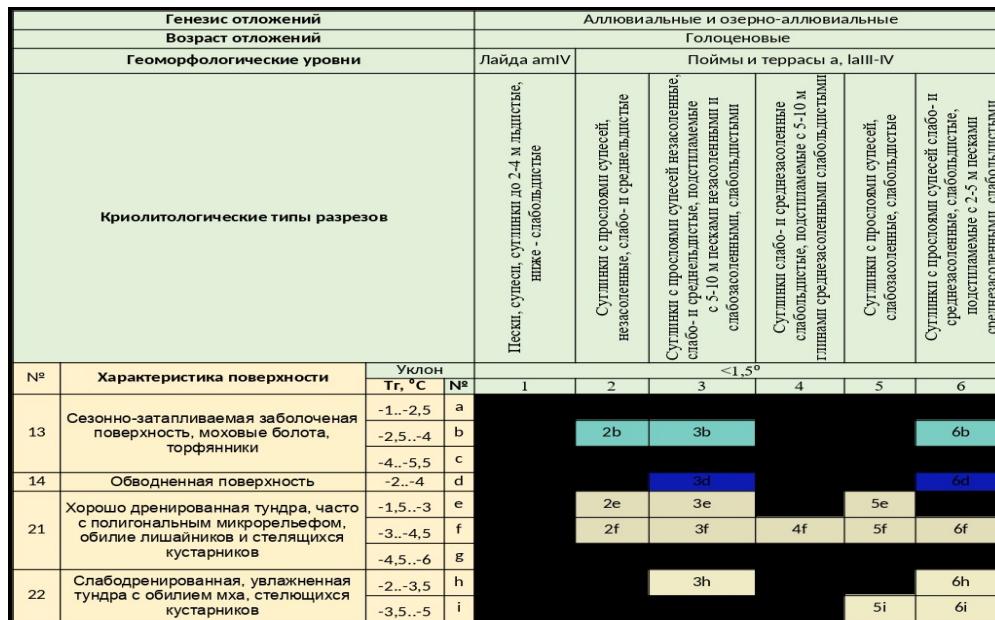


Рис. 6. Фрагмент матрицы геокриологического районирования Западного Ямала

Цветом выделены элементы матрицы, заверенные более чем пятью скважинами. Согласно разработанной матрице каждому полигону, полученному при ландшафтно-ключевом районировании, были присвоены тип разреза и температурный диапазон пород.

Таким образом, вся территория исследований разбита на полигоны, имеющие характеристику поверхностных условий, а также характеристику разреза с набором теплофизических свойств, полученных статистической обработкой ИГЭ в процессе типизации. Общее количество полигонов составило 41 000.

На следующем этапе работ будет проведен прогноз температурного режима для каждого уникального полигона с учетом региональных климатических особенностей. Также на следующем этапе будут учтены экзогенные процессы и явления в рамках отдельного проекта.

Проверка краткосрочных прогнозов будет выполняться путем добавления новых данных изысканий, а также на основе измерений температур в фоновых скважинах в рамках геотехнического мониторинга.

Заключение

В ходе проведенного исследования были разработаны и апробированы комплексные методические подходы к созданию геоинформационной модели многолетнемерзлых пород для прогнозирования их температурного состояния численными методами.

Методологическая основа исследования включает алгоритм сбора, систематизации и анализа инженерно-геокриологических данных, который предусматривает обработку текстовых, табличных и графических материалов. Разработана методика статистической обработки и укрупнения инженерно-геологических элементов, а также подход к построению геологических разрезов.

База фактического материала исследования сформирована на основе материалов полевых и лабораторных исследований территории Западного Ямала за период 2020–2025 гг., включает температуру, строение, состав и свойства более 3 000 термометрических скважин.

В ходе работы была выполнена подготовка базы данных для теплотехнических расчетов, проведен прогноз численными методами более 1 500 инженерно-геологических скважин. Расчеты прошли верификацию на сертифицированных программных комплексах, что подтвердило их достоверность.

Проведено геокриологическое районирование территории с использованием матричной схемы, позволившей выявить зависимости между параметрами рельефа, ландшафтов и геологической среды.

На основе полученных данных были установлены закономерности для интерполяции и экстраполяции инженерно-геокриологических условий на территориях с недостаточной степенью изученности. В результате сформирована модельная база данных с характеристиками, необходимыми для проведения теплотехнического прогноза численными методами, на основе которой создана динамическая геоинформационная модель мерзлотных условий.

Практическая значимость разработанных подходов заключается в их универсальности

применения при планировании деятельности в криолитозоне. Они могут эффективно использоваться при проведении инженерных изысканий для разработки проектной документации, выполнении теплотехнического прогноза температур грунтов на этапе проектирования, а также в рамках геотехнического мониторинга на стадии эксплуатации объектов.

Полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований в области моделирования мерзлотных условий и прогнозирования их изменений, что особенно актуально в современных условиях развития северных территорий.

Библиография

1. Анисимов О. А., Шерстюков А. Б. Оценка роли природно-климатических факторов в изменениях криолитозоны России // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. С. 90-99. EDN WHAVAT.
2. Павлов А. В., Перльштейн Г. З., Типенко Г. С. Актуальные аспекты моделирования и прогноза термического состояния криолитозоны в условиях меняющегося климата // Криосфера Земли. 2010. Т. 14, № 1. С. 3-12. EDN KZYCUD.
3. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. Москва, 2025. 135 с.
4. Мельников В. П. и др. Развитие геокриологического мониторинга природных и технических объектов в криолитозоне Российской Федерации на основе систем геотехнического мониторинга топливно-энергетического комплекса // Криосфера Земли. 2022. Т. 26. № 4. С. 3-18. DOI: 10.15372/KZ20220401. EDN TMLZFZ.
5. Шполянская Н. А., Осадчая Г. Г., Малкова Г. В. Современные изменения климата и реакция криолитозоны (на примере Западной Сибири и Европейского севера России) // Географическая среда и живые системы. 2022. № 1. С. 6-29. DOI: 10.18384/2712-7621-2022-1-6-30. EDN WPCGXO.
6. Streletschi D. A. et al. The costs of Arctic infrastructure damages due to permafrost degradation // Environmental Research Letters. 2023. Т. 18. № 1. С. 015006. DOI: 10.1088/1748-9326/acab18. EDN ZHYXSQ.
7. Брушков А. В. и др. Глобальное потепление и состояние вечной мерзлоты в России // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2024. № 6. С. 4-11. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-6-4-11. EDN WPQJZW.
8. Васильчук Ю.К. Горнопромышленные эколого-геологические системы Бованенковского и Южно-Тамбейского газоконденсатных месторождений и техногенное воздействие на них // Арктика и Антарктика. 2025. № 3. С. 58-102. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.3.74913 EDN: JWQZPX URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=74913
9. Московченко Д. В. Особенности многолетней динамики растительности Бованенковского месторождения (полуостров Ямал) // Вестник ТюмГУ. Экология. 2013. № 12. С. 57-66. EDN SEPGZV.
10. Никитин К.А., Комаров И.А., Мироненко М.В., Кияшко Н.В. Влияние засоленности на прогнозные оценки температуры мерзлых пород на примере полуострова Ямал // Арктика и Антарктика. 2024. № 3. С. 30-45. DOI: 10.7256/2453-8922.2024.3.71279 EDN: NSSPVV URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=71279
11. Корниенко С. Г. Характеристика антропогенных трансформаций ландшафтов в районе Бованенковского месторождения по данным спутников Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 106-129. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-106-129. EDN ERYOKG.
12. Кизяков А. И., Зимин М. В., Лейбман М. О., Правикова Н. В. Мониторинг скорости

- термоденудации и термоабразии на западном побережье острова Колгуев с использованием материалов космической съемки высокого разрешения // Криосфера Земли. 2013. Т. 17. № 4. С. 36-47. EDN RKNEAZ.
13. Пупырев М. А. Дешифрирование и индикация современных экзогенных процессов в геокриологическом мониторинге криолитозоны (на примере западной части п-ова Ямал) // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2013. № 4. С. 67-75. EDN QZKOJZ.
14. Пупырев М. А., Иванов О. Е. ГИС-анализ инженерно-геокриологических условий освоения Западного Ямала на основе приемов ландшафтной индикации // Вестник Тюменского государственного университета. 2008. № 3. С. 215-222.
15. Баулин В. В., Аксенов В. И., Дубиков Г. И. и др. Инженерно-геологический мониторинг промыслов Ямала. В двух томах. Т. II. Геокриологические условия освоения Бованенковского месторождения. Тюмень: Институт проблем освоения Севера СО РАН, 1996. 240 с.
16. Баулин В. В., Дубиков Г. И., Аксенов В. И. и др. Геокриологические условия Харасавэйского и Круzenштерновского газоконденсатных месторождений (полуостров Ямал). М.: ГЕОС, 2003. 180 с.
17. Чувилин Е. М. и др. Строение и свойства пород криолитозоны южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения. М.: ГЕОС, 2007. 137 с. EDN: QKHB JL
18. Забродин В. Ю. Исследования по методологии геологических наук в Институте тектоники и геофизики в 70-е годы XX века // Вестник ДВО РАН. 2008. № 1. 75 лет. ДВО РАН.
19. Дроздов Д. С. Оценка достоверности ландшафтной индикации инженерно-геокриологических условий при переходе от крупного масштаба к среднему при региональных работах в Западной Сибири // Криосфера Земли. 1997. Т. 1. № 4. С. 35-41.
20. Гудилин И. С. Применение аерометодов при инженерно-геологических и гидрологических исследованиях: учеб. пособие для вузов по спец. "Гидрогеология и инж. геология" / под ред. И. С. Комарова. Москва: Недра, 1978. 319 с.: ил., карт.; 22 см.
21. Ревзон А. Л., Садов А. В. Аэрокосмические методы в гидрогеологии и инженерной геологии. Москва: Недра, 1979. 223 с.
22. Ривкин Ф. М., Иванова Н. В. Геоинформационное моделирование инженерно-геокриологических условий для сооружения систем магистральных трубопроводов // Промышленное и гражданское строительство. 2006. № 9. С. 35-43. EDN HVAZWT.
23. РСН 67-87 Госстрой РСФСР "Инженерные изыскания для строительства, составление прогноза изменений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами".
24. СП 47.13330.2016 "Инженерные изыскания для строительства. Основные положения".
25. ГОСТ 20522-2012 "Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний".
26. СП 25.13330.2020 "Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах".
27. Кудрявцев В. А., Гарагуля Л. С., Кондратьева К. А. и др. Методика мерзлотной съемки: учеб. пособие для геол. спец. вузов / под ред. В. А. Кудрявцева. Москва: Изд-во МГУ, 1979. 358 с., 1 л. карт.: ил., карт.; 25 см.
28. Баулин В. В. Многолетнемерзлые породы нефтегазоносных районов СССР: учеб. пособие / В. В. Баулин. Москва: Недра, 1985. 176 с.
29. Каневский М. З., Васильев А. А., Стрелецкая И. Д. Закономерности формирования криогенного строения четвертичных отложений Западного Ямала (на примере района Марре-Сале) // Криосфера Земли. 2005. Т. IX. № 3. С. 16-27. EDN XZGLUL.
30. Карта природных комплексов севера Западной Сибири (для целей геокриологического прогноза и планирования природоохранных мероприятий при массовом строительстве) / Под ред. Е. С. Мельникова, Н. Г. Москаленко. М., ВСЕГИНГЕО,

1991.

31. Крицук Л. Н. Подземные льды Западной Сибири. М.: Науч. мир, 2010. 352 с. EDN QKJNAV.
32. Слагода Е. А., Мельников В. П., Опокина О. Л. Повторноинъекционные штоки льда в отложениях Западного Ямала // Доклады РАН. 2010. Т. 432. № 2. С. 264-266.
33. Васильчук Ю. К. Пластовые ледяные залежи в пределах Бованенковского ГКМ, Центральный Ямал // Инженерная геология. М.: ПНИИС, 2010. № 3. С. 50-67.
34. Бутаков В. И., Слагода Е. А., Опокина О. Л., Томберг И. В., Жученко Н. А. Особенности формирования гидрохимического и микроэлементного состава разных типов подземных льдов мыса Марре-Сале // Криосфера Земли. 2020. Т. XXIV. № 5. С. 29-44. doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-5(29-44). EDN HABOXX.
35. Бутаков В.И., Слагода Е.А., Белова Н.Г., Жученко Н.А. Геохимические методы идентификации генезиса подземных льдов Центрального Ямала // Арктика и Антарктика. 2025. № 3. С. 181-198. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.3.74967 EDN: UNTGGG URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=74967
36. Copernicus WorldDEM-30 © DLR e.V. 2010–2014 and © Airbus Defence and Space GmbH 2014–2018 provided under COPERNICUS by the European Union and ESA; all rights reserved.
37. Bartsch A., Khairullin R., Efimova A., Widhalm B., Muri X., von Baekmann C., Bergstedt H., Ermokhina K., Hugelius G., Heim B., Leibman M., Gruber C. Circumarctic Landcover Units (2.0) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14235736>. "

Результаты процедуры рецензирования статьи

Рецензия выполнена специалистами [Национального Института Научного Рецензирования](#) по заказу ООО "НБ-Медиа".

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

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

Предметом статьи является создание инженерно-геокриологической модели Западного Ямала для геокриологического мониторинга и прогноза изменений мерзлотных условий в криолитозоне.

Актуальность исследования обусловлена тенденцией глобального потепления климата на планете, отмечено, что в последние десятилетия наблюдается устойчивый тренд к повышению среднегодовых температур воздуха, оказывающий значительное влияние на элементы криосферы. Коэффициент линейного тренда среднегодовой температуры приземного воздуха для Центрального Ямала за период 1976-2024 гг. составляет более 0,08 °C/год. Отмечается смещение южной границы криолитозоны к северу и повышение среднегодовой температуры пород, что создает там неблагоприятные условия для устойчивости инфраструктуры.

Целью данной работы является создание и верификация геоинформационной инженерно-геокриологической модели, отражающей инженерно-геокриологическую обстановку верхнего горизонта криолитозоны, способной прогнозировать температурное состояние многолетнемерзлых пород. Объектом изучения выбрана территория Западного Ямала.

Методология исследования основана на сборе, систематизации и анализе инженерно-геокриологических материалов полевых и лабораторных исследований территории Западного Ямала за период 2020–2025 гг., на применении методов статистической обработки и укрупнения инженерно-геологических элементов, построении геологических разрезов. В ходе работы подготовлена база данных для теплотехнических расчетов, проведен прогноз численными методами более 1 500

инженерно-геологических скважин. Расчеты прошли верификацию на сертифицированных программных комплексах, что подтвердило их достоверность. В качестве замечания хочется отметить, что автор очень обширно представляет различные методики в статье: методику создания инженерно-геокриологической модели, методику создания инженерно-геокриологической базы данных, приведение к единой дате данных термометрии численным методом, методику районирования. Хотя, представленный в данных разделах материал, в большей степени отражает результаты исследования автора.

В статье автором упущена научная новизна проводимых исследований. Данное замечание необходимо устранить и описать элементы новизны, применяемые в исследовании.

Стиль статьи – научный, ее объём соответствуют требованиям журнала, однако структура статьи нарушена, разделы статьи не соответствуют требованиям журнала «Арктика и Антарктика». Не выделен в статье раздел «Результаты исследования», хотя данные представлены. Имеются таблицы, графики, схемы, фото объекта исследования, что усиливает научную значимость статьи.

Библиография статьи слишком обширная и включает в себя 37 литературных источников, 3 из которых – на иностранных языках. В библиографический список не следует включать ссылки на санитарные правила и ГОСТы. В тексте имеются опечатки.

Выводы в статье обоснованы. Проведено геокриологическое районирование территории с использованием матричной схемы, позволившей выявить зависимости между параметрами рельефа, ландшафтов и геологической среды, установлены закономерности для интерполяции и экстраполяции инженерно-геокриологических условий на территориях с недостаточной степенью изученности.

Замечания по статье:

1. В названии статьи в слове «геокриологической» пропущена буква «с».
2. Рисунок 6. «Фрагмент матрицы геокриологического районирования За-падного Ямала», представленный в виде скриншота таблицы, лучше представить в виде полноценно набранной таблицы.
3. В заключении статьи второй абзац целесообразнее перенести в раздел методики, поскольку он не относится к выводам по работе.

Статья после доработки может иметь важное научно-практическое значение для специалистов в области мерзлотоведения и грунтоведения. Практическая значимость разработанных подходов заключается в их универсальности применения при планировании деятельности в криолитозоне.

Реценziруемая статья рекомендуется к опубликованию в журнале «Арктика и Антарктика» после устранения замечаний.