



Научная статья

УДК 552.513

EDN: EVLQCA

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-4-457-469



Прочность осадочных пород в слое годовых теплооборотов прерывисто-островной мерзлоты Южной Якутии на территории г. Нерюнгри

Л.Г. Нерадовский^{a✉}

^aИнститут мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия

Резюме. Цель проведенного исследования заключалась в обобщении данных инженерно-геологических изысканий, проведенных в 70–90-х годах прошлого века в Южной Якутии на территории г. Нерюнгри. Согласно данным изысканий основание инженерных сооружений сложено немерзлой-мерзлой толщей углевлещающих осадочных пород, главным литотипом которой и объектом наших исследований являются песчаники. Предметом исследований стали лабораторные значения предела прочности на одноосное сжатие образцов песчаников в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии. Изменчивость прочности образцов песчаников в слое годовых теплооборотов изучена методами теории вероятности и математической статистики. По лабораторным данным с надежностью 90 % оценена прочность массива песчаников на глубине 2–11 м; глубже, до 22,5 м, прочность трещиноватой части песчаников изучена эпизодически. Несбалансированное возле средних показателей вероятностное распределение прочности рассмотрено как природный дефект песчаников, связанный с их разуплотнением тектоническими и экзогенно-криогенными процессами. Дефект корректно аппроксимируется законом Вейбулла. Прочность массива песчаников в воздушно-сухом и водонасыщенном состояниях изменяется от очень низкой до очень высокой. Доля скальных песчаников с прочностью выше 120 МПа составляет 78,9 %. Доля полускальных песчаников с прочностью ниже 15 МПа равна 12,1 %. Фоновые значения прочности воздушно-сухих и водонасыщенных скальных песчаников изменяются в диапазонах 54,49–171,42 и 32,14–135,78 МПа соответственно. У полускальных песчаников в таких же состояниях фоновые значения прочности ниже и изменяются в диапазонах 1,65–27,2 МПа и 0,67–10,12 МПа. При переходе в водонасыщенное состояние изменчивость прочности сужается в 4 раза. Такая закономерность объясняется потерей структурно-петрографического, криогенно-теплового и температурно-влажностного многообразия песчаников при их замачивании водой. Проведенные исследования позволили сделать вывод о том, что прогнозируемая по лабораторным данным на период проведения изысканий прочность массива песчаников с надежностью около 80 % достаточна для безопасной эксплуатации инженерных сооружений в г. Нерюнгри.

Ключевые слова: г. Нерюнгри, инженерные сооружения, слой годовых теплооборотов, массивы песчаников, прочность, воздушно-сухое и водонасыщенное состояние, фоновые значения прочности, вероятностные распределения прочности

Финансирование: Работа выполнена при поддержке государственного бюджетного финансирования в лаборатории инженерной геокриологии Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук (г. Якутск, Россия) в рамках проекта (этап 2026 г.) «Устойчивость инженерных сооружений в криолитозоне. Методы контроля и прогноз состояния. Криогенные ресурсы» (регистрационный номер проекта FUFU-2026-0007).

Благодарности: Автор выражает благодарность Главному инженеру ООО «Нерюнгростройизыскания» А.В. Осмушкину за предоставленную возможность безвозмездного сбора архивных материалов инженерно-геологических изысканий, полученных во второй половине прошлого века на застраиваемой территории г. Нерюнгри (Якутия).

Для цитирования: Нерадовский Л.Г. Прочность осадочных пород в слое годовых теплооборотов прерывисто-островной мерзлоты Южной Якутии на территории г. Нерюнгри // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 4. С. 457–469. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-4-457-469>. EDN: EVLQCA.



Original article

Strength of sedimentary rocks in the annual heat cycle layer of discontinuous island permafrost in the town of Neryungri, Southern Yakutia

Leonid G. Neradovskii^a^aMelnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

Abstract. The purpose of this article is to summarize the data of engineering and geological surveys conducted in the 1970–1990s in the town of Neryungri in Southern Yakutia. According to the surveys, the foundation of engineering structures is composed of an unfrozen-frozen layer of coal-bearing sedimentary rocks, whose main lithotype is sandstones, which are also the object of study. The subject of the study is laboratory values of the uniaxial compressive strength of sandstone samples in the air-dry and water-saturated states. Variability of sandstone sample strength in the annual heat cycle layer was studied using probability theory and mathematical statistics. Using laboratory data, the strength of a sandstone massif at the depths of 2–11 m was estimated with 90 % reliability. The strength of the fractured part of sandstones was studied sporadically at depths of up to 22.5 m. The unbalanced probability distribution of strength near the mean values was interpreted as a natural defect of sandstones associated with their decompression by tectonic and exogenous-cryogenic processes. The defect is correctly approximated by the Weibull law. The strength of the sandstone massif in air-dry and water-saturated conditions varies from very low to very high. The proportion of rocky sandstones with the strength above 120 MPa is 78.9 %. The proportion of semi-rocky sandstones with the strength below 15 MPa is 12.1%. The background strengths of air-dry and water-saturated rocky sandstones range from 54.49 to 171.42 MPa and from 32.14 to 135.78 MPa, respectively. In the same conditions, the background strength values of semi-rocky sandstones are lower and range from 1.65 to 27.2 MPa and from 0.67 to 10.12 MPa. When the material is saturated with water, the variability of its strength decreases by a factor of 4. This pattern is explained by the loss of structural-petrographic, cryogenic-thermal, and temperature-moisture diversity in sandstones when they are soaked in water. The conducted studies led to the following conclusion: predicted based on laboratory data strength of the sandstone massif with the approximate reliability of 80 %, is sufficient for the safe operation of engineering structures in Neryungri.

Keywords: Neryungri city, engineering structures, annual heat cycle layer, sandstone massifs, strength, air-dry and water-saturated state, background strength values, strength probability distributions

Funding: The work was supported by state budget funding and carried out in the Laboratory of Engineering Geocryology of Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Yakutsk, Russia) under the project (stage 2026) “Sustainability of engineering structures in the cryolithozone. Monitoring methods and condition forecast. Cryogenic resources” (the FUFU project registration number is 2026-0007).

Acknowledgments: The author thanks the Chief Engineer of Neryungristroyziskany LLC A.V. Osmushkin for the provided opportunity for free collection of archival materials of engineering and geological surveys obtained in the second half of the last century in the development area of the town of Neryungri (Yakutia).

For citation: Neradovskii L.G. Strength of sedimentary rocks in the annual heat cycle layer of discontinuous island permafrost in the town of Neryungri, Southern Yakutia. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(4):457-469. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-4-457-469>. EDN: EVLQCA.

Введение

Результаты исследований прочности широко распространенных осадочных пород опубликованы в очень большом количестве¹ научно-технических публикаций отечественных и зарубежных авторов. В этом разнообразии трудов значительно меньше монографий, в которых в систематизированном виде сосредоточены фундаментальные знания,

полученные в результате обобщения накопленного фактического материала. Такие работы, подготовленные на основе многолетних диссертационных исследований, представляют собой непреходящую во времени ценность. Они, как ориентиры, указывают пути развития наук о Земле и сопутствующих технологий (например технологий, применяемых в строительстве)². В этом аспекте би-

¹ По данной причине современное человечество сталкивается с серьезнейшей и неразрешимой проблемой ограниченного доступа к источникам научно-технической и иной информации. Вследствие этого не только снижается качество, полнота, глубина и широта научных исследований, но и происходит нарушение фундаментального принципа преемственности научных знаний, накопленных в прошлых веках. Без бережного сохранения отмеченного принципа исключено правильное развитие академической науки в настоящем и будущем.

² Эту отрасль президент России В.В. Путин назвал «локомотивом развития экономики».



блиографическую редкость для настоящего времени с дефицитом пополнения петрофизических знаний имеет справочник³, составленный по результатам межведомственных исследований. В нем собрана статистика по горно-геологическим и строительным характеристикам месторождений полезных ископаемых РСФСР, касающаяся минералов, руд, магматических, метаморфических и осадочных пород. Для настоящей работы интерес в справочнике представляют 685 лабораторных значений прочности воздушно-сухих образцов песчаников, отобранных на глубине в несколько сотен метров из керн-скважин и горных выработок. Тематическим дополнением к справочнику служат три работы. Во-первых, монография Г.А. Голодковской и др., в которой изучена прочность горных пород в Европейской части РСФСР и чехословацких Карпатах [1]. Во-вторых, монография Н.Н. Гриба и А.В. Самохина по изучению прочности осадочных пород угольных месторождений Южной Якутии [2]. В-третьих, обзорная статья по прочности песчаников зарубежных стран в сопоставлении с прочностью песчаников России, Южной Якутии и г. Нерюнгри [3]. В этом городе, начиная с 2017 г., автором настоящей работы были изучены физико-механические свойства песчаников. Результаты исследований впервые доказали возможность количественной оценки прочности осадочных пород Южной Якутии методом дистанционного индуктивного зондирования процесса затухания в породах установившегося во времени эллиптически поляризованного гармонического поля вертикального магнитного диполя [4].

В настоящей работе обобщен очень большой архивный материал⁴ инженерно-геологических изысканий с целью изучения площадной изменчивости прочности массива песчаников, слагающего скально-полускальное основание инженерных сооружений в центральной части г. Нерюнгри в пределах слоя годовых теплооборотов мощностью до 20–30 м. Этот слой, сопряженный со сферой механического, теплового, химического и биологического взаимодействия с инженерными сооружениями, исключительно важен для таких наук о Земле, как инже-

нерная геология, инженерная геокриология, геомеханика, петрофизика и инженерная геофизика. Об этом еще в 1971 г. заявлял известный мерзлотовед и геофизик А.Т. Акимов, образно и точно назвав слой годовых теплооборотов фабрикой криогенных процессов [5].

Исследования выполнены в г. Нерюнгри – административном центре Южной Якутии. Этот небольшой по размерам и численности населения красивый город находится примерно в 800 км на юго-запад от г. Якутска – столицы Республики Саха (Якутия). В изученной центральной части города рельеф дневной поверхности пологонаклонный в северо-восточном направлении к долинам мелководных порожистых горных рек Малый Беркамит и Амнуннакта. Здесь абсолютные отметки высоты рельефа уменьшаются с 871–848 до 842–832 м.

Территория г. Нерюнгри находится в зоне складчатости по краевому шву Предстанового прогиба на южной окраине Алданского плоскогорья в пределах Чульманской впадины. Инженерно-геологические региональные условия строительства и эксплуатации инженерных сооружений типичны для Алдано-Чульманского горнопромышленного района [6] и, возможно, для всей прерывисто-островной мерзлоты Южной Якутии, где в мезозойских депрессиях (впадинах) распространена мерзлая толща углевлещающих осадочных пород юры и нижнего мела с разной температурой в слое годовых теплооборотов [6, 7]. По данным В.М. Желинского [8], и это очень важно, в толще осадочных пород Южной Якутии доминирующим литотипом являются песчаники.

По материалам Южно-Якутской комплексной геологоразведочной экспедиции и ООО «Нерюнгростройизыскания», в г. Нерюнгри в стратиграфическом отношении песчаники составляют кабактинскую свиту верхнеюрского возраста. В структурном отношении свита смята тектоническими процессами в антиклиналь с углом падения 35–40° в северной сводовой части. В направлении к южным крыльям антиклинали угол падения уменьшается до 15–20°. Слабые по прочности прослои и слои алевролитов, аргиллитов и каменных углей имеют подчиненное отношение к песча-

³ Мельников Н.В., Ржевский В.В., Протоdjяконов М.М. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. М.: Недра, 1975. 279 с.

⁴ Материал получен по данным буровых и лабораторных работ в 70–90-х годах прошлого века.



никам и распространены преимущественно в северной части г. Нерюнгри. Состав песчаников кварц-полевошпатовый, мелко-среднезернистый. Преобладающий цвет песчаников – серый, а у выветренных разностей – желтый. Минеральная матрица песчаников скреплена преимущественно карбонатным цементом. Сверху массив песчаников перекрыт аллювиальными (пески, супеси, суглинки) и делювиальными отложениями (дресва, щебень, гравий). Общая средняя мощность отложений составляет около 3 м. В некоторых местах⁵ коренное основание массива песчаников выходит на дневную поверхность. Мощность деятельного слоя с сезонным оттаиванием – промерзанием толщи осадочных пород достигает 4–6 м.

На однородном литогенном фоне как в местном (г. Нерюнгри), так и в региональном масштабе (Южная Якутия) проявляют себя две главенствующие природные черты. Первая черта – неоднородность строения и высокая изменчивость по площади и глубине прочности песчаников, разуплотненных процессами разрывной и пликвативной тектоники с образованием сложнейшей разноориентированной линейной системы дробления и повышенной трещиноватости типа «разбитой тарелки» [9, 10]. Вторая черта – сложная по строению в пространстве и неустойчивая во времени прерывисто-островная мерзлота [6, 7]. Она сформировалась позднее тектонических процессов с наложением на результат их действия экзогенных и климатических процессов, включая процесс криогипергенеза или криогенного метаморфизма [11], который наиболее сильно проявляется в верхней части слоя годовых теплооборотов до глубины 3–7 м.

Строение, мощность и температура прерывисто-островной мерзлоты зависят от влияния климата, ландшафта, геоморфологии местности и теплофизических свойств углевмещающей толщи осадочных пород [6]. По данным инженерно-геологической съемки острова мерзлых песчаников занимают 57 % площади г. Нерюнгри. Снизу мощность и криогенное состояние островной мерзлоты регулируются мощными внутриземными тепловы-

ми потоками [7]. По общим оценкам мощность островной мерзлоты на водоразделах Алдано-Чульманского горнопромышленного района, включая г. Нерюнгри, преимущественно равна 20–50 м. В долинах рек и ручьев, а также на склонах северной экспозиции мощность мерзлоты увеличивается до 150–200 м [12]. Среднегодовая температура осадочных пород на водоразделах в примыкании к нижней части слоя годовых теплооборотов на глубине 10–15 м близка к нулю градусов по Цельсию (от -0,1 до -0,5 °С). В долинах рек, покрытых моховым покровом, температура на этой глубине снижается до уровня от -1 до -4 °С. В г. Нерюнгри температура островной мерзлоты повысилась из-за уничтоженного строительными работами теплоизолирующего почвенно-растительного покрова и частично или полностью убранного слоя аллювия и делювия. Полная деградация мерзлоты произошла под аварийными зданиями в результате действия антропогенно-техногенных факторов⁶. На этих участках температура повысилась на глубине 10–15 м до 2–7 °С.

Материалы и методы исследования

Фактический материал представлен выборкой из лабораторных ведомостей физико-механических свойств значений характеристики R_c – временного предела прочности образцов песчаников на одноосное сжатие в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии. Другие характеристики прочности песчаников не определялись изыскательскими организациями, которые работали в прошлом веке на территории г. Нерюнгри.

Избирательность в изучении прочности образцов песчаников объясняется двумя причинами. Во-первых, песчаники представляют собой доминирующий литотип углевмещающей толщи осадочных пород [8]. Во-вторых, за редким исключением, из алевролитов, аргиллитов и каменных углей невозможно изготовить (выпилить на камнерезном станке) для механических испытаний образцы правильной геометрической формы⁷. Указанные породы даже при небольших начальных нагрузках

⁵ Эти места составляют около 20 % изученной центральной части территории г. Нерюнгри.

⁶ Прорыва пресной воды из систем питьевого и теплового водоснабжения и минерализованной жидкости (фекалий) из систем канализации.

⁷ ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. М.: ИПК Издательство стандартов, 1984. 7 с.



рассыпаются. Что касается R_c , то она постоянно и широко изучается в отечественном грунтоведении и зарубежной геотехнике вместе с другими характеристиками прочностных и деформационных свойств скально-полускальных грунтов. В настоящее время главная цель их изучения заключается в поиске адекватных по точности локально-региональных одно-многочисленных регрессионных уравнений прогноза значений R_c по другим характеристикам⁸, которые определяются с меньшими затратами времени, труда и стоимости [13–18]. Технических и методических вариантов решения этой задачи математической статистики и теории вероятности много, но почти все они в настоящее время группируются возле технологии нейросетей [19–24] – предвестников искусственного интеллекта. Это стремительно развивающееся во всех областях жизни направление современного технократического общества зародилось в прошлом веке благодаря работам международного сообщества математиков и программистов по теории и алгоритмам распознавания четких и нечетких образов.

Площадная изменчивость прочности массива песчаников в пределах слоя годовых теплооборотов изучена по 2357 значениям R_c образцов песчаников, приготовленных из монолитов песчаников. Монолиты отбирались (вынимались) из керна 1936 скважин, пробуренных колонковым способом. Отбор монолитов производился по неравномерной избирательной схеме⁹. В соответствии с ней геолог-коллектор отбирал по одному монолиту из каждой прочностной разновидности массива песчаников (выветренной, сильнотрещиноватой, слаботрещиноватой) и реже из малопрочных алевролитов, аргиллитов и углей. В соответствии с действующим ГОСТ 21153.2-84⁷, из каждого монолита изготавливались по 6 образцов. По ним с надежностью не меньше 80 % определялись средние значения R_c с допустимой ошибкой ± 20 %.

Благодаря совокупности большого количества лабораторных значений R_c пло-

щадная изменчивость прочности массива песчаников в слое годовых теплооборотов репрезентативно оценена в прогнозируемом воздушно-сухом и водонасыщенном состояниях. Мерзлые образцы песчаников не испытывались, и по-этому прочность их массива в мерзлом высокотемпературном состоянии не была определена. Тем не менее известно, что для условий Южной Якутии прочность массива песчаников в таком состоянии мало чем отличается от немерзлых или талых антропогенно-техногенных воздушно-сухих прочных песчаников с положительными значениями температуры.

Вероятностно-статистический анализ изменчивости значений R_c выполнен с помощью программы А.П. Кулаичева «Стадия»¹⁰. В числе эргономических достоинств этой программы, например в сравнении с программой Statistica, нужно отметить оригинальный способ автоматического выбора числа и размера интервалов группирования, освобождающий исследователя от необходимости поиска этих параметров для корректного изучения сложной структуры мультипликативных композиций вероятностных распределений.

Результаты исследования и их обсуждение

По данным буровых и лабораторных работ прочность массива песчаников изучена на глубине от 0,5 до 22,5 м. Максимальная надежность решения этой задачи, равная 90 %, была достигнута на глубине 2–11 м, где залегают выветрелая и сильнотрещиноватая части массива песчаников. Глубже 11–16 м прочность слаботрещиноватой части массива изучена эпизодически во времени и фрагментарно по площади, что существенно снижает репрезентативность и достоверность полученных данных на этой глубине.

Тестирование, выполненное по трем независимым критериям (А.Н. Колмогорова, омега-квадрату Э. Лемана и хи-квадрату К. Пирсона с помощью программы «Стадия») свидетельствует, что даже при использовании довольно обширной по меркам математической

⁸ Включая геофизические характеристики.

⁹ Левкович А.И. Методика обоснования состава и объемов инженерно-геологических изысканий для строительства различных типов зданий и сооружений промышленного, сельскохозяйственного и жилищно-гражданского назначения в районах распространения вечномёрзлых грунтов с учетом требований проектирования. М.: Госстрой РСФСР. НПО «Стройизыскания», 1989. 173 с.

¹⁰ Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных: учеб. пособие для вузов. М.: ФОРУМ, ИНФРА-М, 2006. 512 с.



статистики¹¹ выборочной совокупности парных значений R_c , вероятностные распределения этих значений (рис. 1) не подчиняются фундаментальному (нормальному) закону больших чисел [25]. Среди законов ненормальных вероятностных распределений наиболее корректно и точно распределение значений R_c аппроксимируется законом Вейбулла. Он, как известно из теории надежности природно-технических систем, корректно устанавливает в рабочей контрольной выборке вероятность появления дефектных материалов и изделий¹². В этом аспекте согласные между собой фактические и теоретические (по закону Вейбулла) вероятностные распределения значений R_c выражают природный дефект прочности массива песчаников в сравнении с прошлым геологическим временем. То есть с тем начальным состоянием, в котором находилась литифицированная толща осадочных пород до начала разуплотнения тектоническими, экзогенными, криогенными процессами и последующими антропогенно-техногенными процессами. Результат разуплотнения наблюдается в виде сдвига максимумов гистограмм в сторону общего снижения прочности массива песчаников. В воздушно-сухом состоянии это снижение фиксируется по положению максимума гистограммы со значением $R_c = 55,27$ МПа

(см. рис. 1, а). В водонасыщенном состоянии максимум гистограммы теряет свою выразительность, а его значение R_c снижается почти в четыре раза до 13,97 МПа (см. рис. 1, б). Теоретические оценки снижения, полученные по закону Вейбулла, почти такие же.

Отсутствие точного знания о первоначальном состоянии и прочности массива песчаников в предыдущие геологические эпохи препятствует получению истинной оценки меры его дефектности по сравнению с нынешним временем. Однако если в качестве реликтового репера сравнения принять очень высокие среднеинтервальные значения R_c в конечной части гистограммы (см. рис. 1, а), равные 231,24–319,23 МПа, а также аномальные значения 682,20; 723,00; 792,15 МПа с долевым участием 0,13 %, то по отношению к наиболее часто встречающемуся значению 55,27 МПа (максимуму гистограммы) прочность массива песчаников за прошедшее геологическое время уменьшилась в 4–6 или 12–14 раз. Хотя такая примитивная оценка весьма приблизительна, но она подтверждает общеизвестный факт природной устойчивости горных пород к разрушению под воздействием геологических процессов (в частности, устойчивости песчаников в г. Нерюнгри и в других местах России [26, 27] к знакопеременным во времени механическим

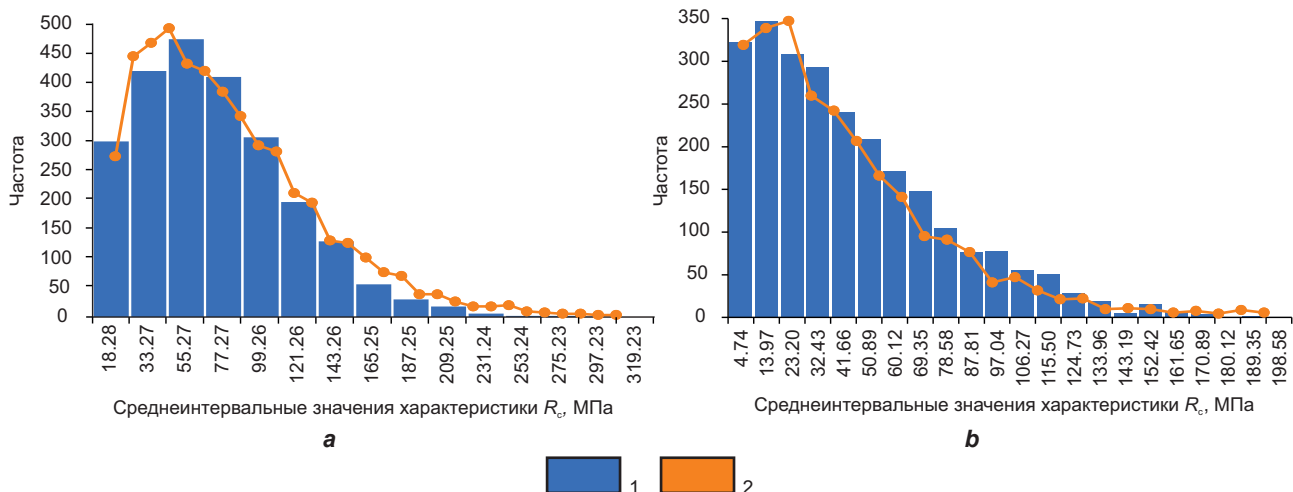


Рис. 1. Структура вероятностной изменчивости прочности массива песчаников в воздушно-сухом (а) и водонасыщенном (б) состояниях (объем выборки – 2357 образцов песчаников):

1 – гистограммы; 2 – графики аппроксимации по закону Вейбулла

Fig. 1. Structure of probabilistic variability of sandstone massif strength in air-dry (a) and water-saturated (b) states (the sample size is 2357 sandstone samples):

1 – histograms; 2 – Weibull fit plots

¹¹ Более одной тысячи определений.

¹² ГОСТ Р 50779.27-2017 (МЭК 61649: 2008). Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных. М.: Стандартинформ, 2020. 58 с.



напряжениям в межгодовых циклах климатического нагревания-охлаждения, которые происходят в слое годовых теплооборотов).

Среди геологических процессов одну из главенствующих ролей играет вода. Именно поэтому при решении задач проектно-строительных изысканий скально-полускальные осадочные, магматические и метаморфические породы классифицируются по показателю прочности не в воздушно-сухом, а в водонасыщенном состоянии, прогнозируемом по лабораторным данным. В этом состоянии указанные породы разделены на семь разновидностей¹³. В дальнейшем вместо расплывчатого понятия «разновидность» будем использовать более четкое понятие «категория».

Выполним вероятностно-статистический анализ площадной изменчивости в слое го-

довых теплооборотов прочности массива песчаников в воздушно-сухом и водонасыщенном состояниях. Для решения этой задачи отсортируем общую совокупность лабораторных значений R_c в порядке их роста, а затем разделим на семь категорий в соответствии с ГОСТ 25100-2020¹³. Результат анализа представлен в табл. 1 и 2. В этих таблицах категории 1–4 и 5–7 представляют полускальные и скальные грунты с нормативными значениями R_c ниже и выше 15 МПа соответственно. Доля значений R_c грунтов разной категории прочности определена по отношению к общей выборочной совокупности, состоящей из 2357 значений R_c .

Табличные данные, дополненные рис. 2, свидетельствуют об очень широкой площадной изменчивости единичных значений проч-

Таблица 1. Статистика по категориям прочности воздушно-сухого массива песчаников
Table 1. Statistics on the strength categories of the air-dry sandstone massif

Статистика	Категории прочности по R_c , МПа							
	1	2	3	4	5	6	7	1–7
Среднее арифметическое	2,92	6,86	18,81	32,63	59,06	108,31	184,42	72,83
Медианное среднее (фон)	1,65	3,88	11,52	27,2	54,49	103,17	171,42	65,21
Модальное среднее	2,53	2,74	5,95	43,73	48,66	120,11	155,13	50,48
Стандартное отклонение	3,76	9,85	16,75	21,82	23,17	43,21	80,27	51,83
Коэффициент вариации, %	128,8	143,6	89,3	66,9	39,2	39,9	43,5	71,2
Минимум	0,28	1,14	3,59	6,32	18,74	52,28	124,66	0,28
Максимум	16,86	53,54	63,33	177,7	155,5	723,32	792,15	792,15
Количество образцов	45	94	79	281	962	803	86	2357
Доля в выборке, %	1,9	4,0	3,3	11,9	41,2	34,1	3,6	100,0

Примечание. Категории прочности соответствуют границам значений R_c в водонасыщенном состоянии (см. табл. 2).

Таблица 2. Статистика по категориям прочности водонасыщенного массива песчаников
Table 2. Statistics on the strength categories of a water-saturated sandstone massif

Статистика	Категории прочности по R_c , МПа							
	1	2	3	4	5	6	7	1–7
Среднее арифметическое	0,61	1,89	4,11	9,71	32,53	75,86	143,84	45,89
Медианное среднее (фон)	0,67	1,85	4,18	10,12	32,14	71,66	135,78	38,76
Модальное среднее	0,73	1,53	3,24	12,12	16,75	50,35	124,71	50,48
Стандартное отклонение	0,25	0,58	0,57	3,02	9,57	19,17	28,47	35,45
Коэффициент вариации, %	41,0	30,7	13,9	30,9	29,4	26,1	19,8	77,2
Минимум	0,12	1,01	3,08	5,00	15,00	50,00	120,12	0,12
Максимум	1,00	3,08	5,00	15,00	50,00	120,00	332,42	332,42
Количество образцов	45	94	79	281	966	806	86	2357
Доля в выборке, %	1,9	4,0	3,3	11,9	41,2	34,1	3,6	100,0

Примечание. 1 – очень низкая (ниже 1 МПа); 2 – низкая (1–3 МПа); 3 – пониженная (3–5 МПа); 4 – малопрочная (5–15 МПа); 5 – средней прочности (15–50 МПа); 6 – прочная (50–120 МПа); 7 – очень прочная (более 120 МПа).

¹³ ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2020. 42 с.



ности массива песчаников в слое годовых теплооборотов. В воздушно-сухом состоянии минимальные и максимальные значения изменяются от 0,28 до 792,15 МПа, а в водонасыщенном состоянии – от 0,12 до 332,42 МПа. В этих состояниях более точная оценка меры изменчивости получается при использовании интегральной характеристики – коэффициента вариации. При заданной стандартной вероятности 68,3 % значения коэффициента между первой и седьмой категориями прочности массива песчаников в воздушно-сухом состоянии изменяются от 128,8 до 43,5 % (см. табл. 1). В водонасыщенном состоянии значения коэффициента корреляции в указанных категориях снижаются до 41–19,8 % (см. табл. 2). Таким образом, размягчение и разуплотнение массива песчаников при замачивании водой приводит к общему во всех категориях снижению изменчивости прочности в четыре раза. В меньшей степени эта особенность проявляет себя в отдельно

взятых состояниях между 1–7 категориями прочности по мере естественного уплотнения массива песчаников. В воздушно-сухом состоянии изменчивость прочности снижается в 2,96 раза, а в водонасыщенном состоянии – в 2,07 раза.

Коррелируемые между собой участки с аномально большой изменчивостью пониженных и низких значений прочности, наблюдаемые на рис. 2, означают результаты лабораторных определений, полученные по естественным обломкам выветренных и сильнотрещиноватых песчаников, а также обломкам слаботрещиноватых песчаников с прожилками и прослойками алевролитов, аргиллитов или углей. Из таких заведомо малопрочных пород, как уже отмечалось выше, невозможно приготовить для механических испытаний образцы правильной геометрической формы. Тем не менее и в таких случаях ГОСТ 24941-81¹⁴ допускает оценивать среднее значение прочности полускальных грунтов

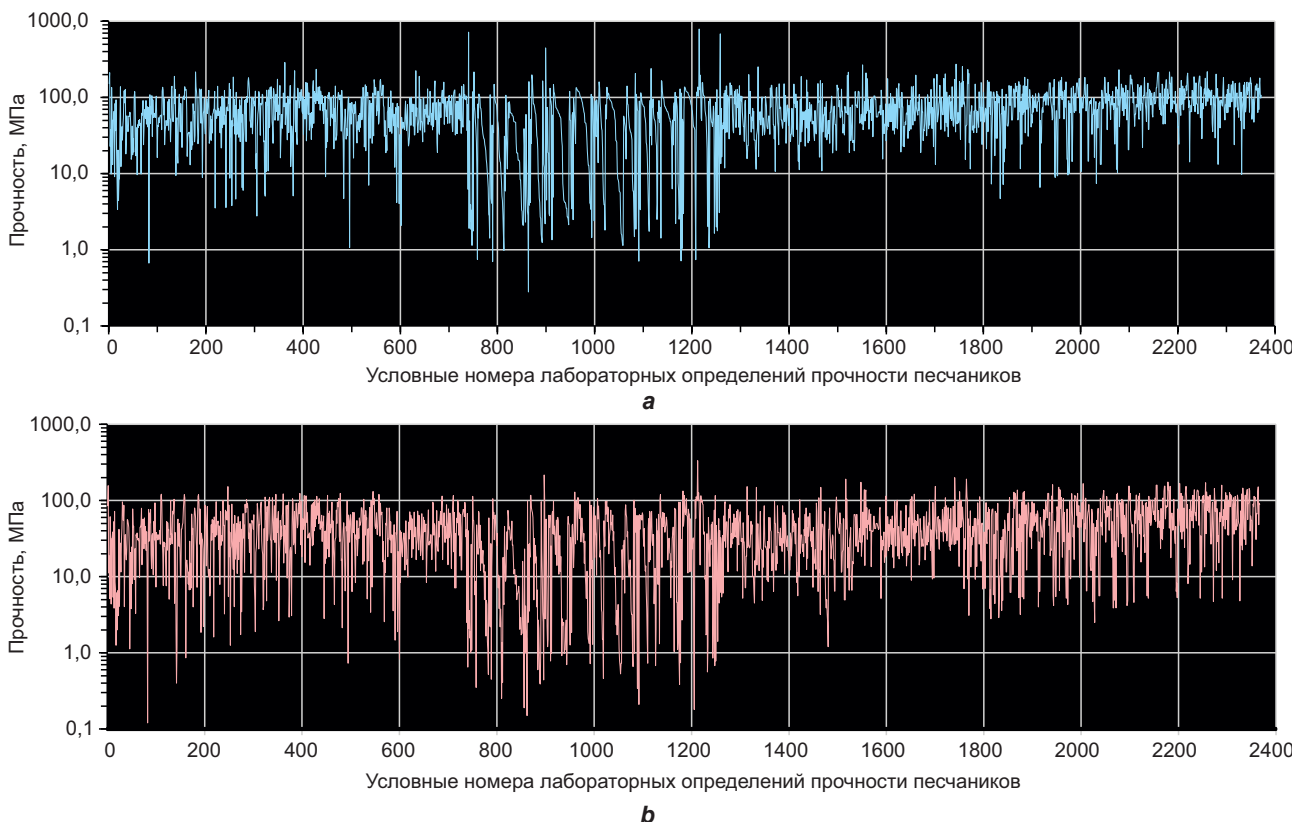


Рис. 2. Площадная изменчивость в слое годовых теплооборотов прочности массива песчаников по лабораторным данным в воздушно-сухом (а) и водонасыщенном (б) состояниях

Fig. 2. Areal variability in the layer of annual heat cycle of the sandstone massif strength according to laboratory data in air-dry (a) and water-saturated (b) states

¹⁴ ГОСТ 24941-81. Породы горные. Методы определения механических свойств нагружением сферическими инденторами. М.: ИПК Издательство стандартов, 1981. 16 с.



для решения проектно-изыскательских задач. При этом ошибка их решения при массовых производственных определениях по сериям из десяти обломков грунтов не должна превышать $\pm 30\%$ при уровне надежности 80% .

Существенное снижение площадной интегральной изменчивости в слое годовых теплооборотов прочности массива песчаников при замачивании водой, а также в естественном уплотненном слаботрещиноватом состоянии означает необратимую потерю или меньшую природную контрастность структурно-петрофизического, криогенно-температурного и влажностно-теплового разнообразия. Этот эффект нивелирования особенно сильно проявляет себя в местах пересечения тектонических зон дробления. Эти места сложены песчаниками очень низкой (ниже $1,0$ МПа), низкой ($1-3$ МПа), пониженной ($3-5$ МПа) и малопрочной ($5-15$ МПа) категориями прочности. В инженерной геологии такие полускальные массивы песчаников называют «рухляками» и «разборной скалой». Они непригодны или малопригодны для строительства и эксплуатации инженерных сооружений. Доля таких образований в центральной части г. Нерюнгри составляет $21,1\%$. В отличие от них скальные массивы песчаников средней ($15-50$ МПа), прочной ($50-120$ МПа) и очень прочной (более 120 МПа) категорий прочности составляют в своей совокупности $78,9\%$.

Широкая изменчивость наблюдается и в росте средних арифметических, медианных и модальных¹⁵ значений категории прочности (см. табл. 1 и 2). Во избежание методических ошибок фоновая площадная изменчивость прочности массива песчаников в слое годовых теплооборотов оценена по медианному среднему значению¹⁶. Другие средние значения применять нельзя из-за отмеченных выше

ненормальных вероятностных распределений значений R_c .

В ряду роста номеров категорий прочности воздушно-сухого массива песчаников фоновые значения R_c (см. табл. 1) выстраиваются в следующей последовательности: $1,65 - 3,88 - 11,52 - 27,2 - 54,49 - 103,17 - 171,42$ МПа. Общее по всем категориям фоновое значение прочности равно $65,21$ МПа. В водонасыщенном состоянии общее фоновое значение прочности снижается до $38,76$ МПа вместе с сопутствующими фоновыми значениями в аналогичном ряду категорий: $0,67 - 1,85 - 4,18 - 10,12 - 32,14 - 71,66 - 135,78$ МПа.

На основании репрезентативного вероятностно-статистического анализа очень большого объема лабораторных данных допустимо сделать следующий вывод. Несмотря на размягчение и существенное снижение прочности массива песчаников в $1,7$ раз при замачивание водой преобладающая часть массива остается в скальном состоянии с высокими фоновыми значениями прочности, равными $71,66-135,78$ МПа. Такая прочность достаточна для безопасной и надежной¹⁷ эксплуатации инженерных сооружений¹⁸, построенных в центральной и других частях г. Нерюнгри на ленточном и ленточно-столбчатом фундаментах. В этом аспекте полученные результаты исследований без ложного преувеличения будут так или иначе и в той или иной мере востребованы¹⁹ для науки и практики. Причем, не только для дальнейшего детального освоения микрорайонов г. Нерюнгри, но и уже освоенных или осваиваемых территорий Южной Якутии с одинаковыми или близкими инженерно-геологическими условиями строительства и эксплуатации инженерных сооружений в областях распространения мезозойской углевмещающей толщи осадочных пород с доминированием песчаников [8].

¹⁵ Наиболее часто встречающиеся значения.

¹⁶ В математической статистике эта характеристика считается универсальной в части корректной оценки положения центра тяжести любых вероятностных распределений вне зависимости от размера выборочной совокупности.

¹⁷ Надежность составляет около 80% .

¹⁸ Несмотря на землетрясения в Южной Якутии, промышленные взрывы на ближайшем угольном карьере, влияние климатических и антропогенно-техногенных факторов, за прошедшие 50 лет не было ни одного случая частичного или полного разрушения, а также серьезных деформаций с повреждением конструкции зданий и сооружений, построенных по сейсмостойкой технологии в прошлом веке, начиная с 1975 г.

¹⁹ По имеющимся данным [28, 29] в настоящее время оживился интерес к проблемам инженерной геологии в части изучения массивов скально-полускальных грунтов. Эти данные объективно констатируют наступление очередного периода переосмысления накопленных знаний, определяющих дальнейшее развитие науки инженерной геологии с применением современных цифровых технологий. Аналогичный стремительно развивающийся процесс «цифровизации» наблюдается и в таких классических описательных науках о Земле, как геология и география. В меньшей степени этим процессом затронуты геоморфология и почвоведение.



Заключение

Вероятностно-статистический анализ очень большого количества буровых скважин и лабораторных данных, полученных в г. Нерюнгри в 70–90-х годах прошлого века, позволяет сделать следующее заключение.

Основание инженерных сооружений в изученной части г. Нерюнгри сложено толщей углевмещающих осадочных пород с преобладанием песчаников. Влияние тектонических, экзогенных, криогенных и антропогенно-техногенных процессов привело к образованию сложного по строению и неоднородного по прочностному и тепловому состоянию массива песчаников. Эта особенность рассматривается как природный дефект, который корректно описывается законом Вейбулла.

Прочность массива песчаников изучена с надежностью 90 % в выветрелой и сильнотрещиноватой частях на глубине 2–11 м. Глубже, до 22,5 м, прочность слаботрещиноватого массива песчаников изучена эпизодически во времени и фрагментарно по площади. Прогнозируемая по лабораторным данным прочность массива песчаников в воздушно-сухом и водонасыщенном состояниях изменяется в широких пределах, охватывая все категории прочности от очень низкой до очень высокой. Преобладают средняя и прочная категории прочности со значениями R_c 15–120 МПа. Суммарная доля скального массива песчаников с такими категориями прочности, включая редко встречаемую категорию очень высокой прочности (выше 120 МПа), составляет 78,9 %. Доля полускального массива песчаников с категориями очень низкой (ниже 1 МПа), низкой (1–3 МПа), пониженной (3–5 МПа) и малой прочности (5–15 МПа) составляет 12,1 %. Фоновые значения прочности воздушно-сухого

скального массива песчаников изменяются от 54,49 до 171,42 МПа. У водонасыщенного скального массива песчаников фоновые значения ниже и изменяются от 32,14 до 135,78 МПа. У полускального воздушно-сухого и водонасыщенного массива песчаников фоновые значения прочности изменяются в диапазонах 1,65–27,2 и 0,67–10,12 МПа соответственно. По мере разуплотнения массива песчаников при его замачивании водой пространственная вариативность значений его прочности сужается в четыре раза. Аналогичный эффект нивелирования в разной мере наблюдается и при уплотнении массива песчаников в прогнозируемом воздушно-сухом и водонасыщенном состояниях. Эти закономерности объясняются потерей структурно-петрофизического, криогенно-температурного и влажностно-теплого многообразия массива песчаников. Однако на период проведения инженерно-геологических изысканий в конце прошлого века прочность массива песчаников с надежностью около 80 % была достаточной для безопасной эксплуатации инженерных сооружений в центральной части г. Нерюнгри. Среди полученных результатов исследований особую научно-практическую ценность имеют общие и частные (по категориям) фоновые значения прочности, полученные с высокой надежностью для воздушно-сухого и водонасыщенного состояния массива песчаников. Эти значения предлагается использовать как априорные региональные оценки прочности массива песчаников на начальной стадии²⁰ инженерно-геологических изысканий при дальнейшем промышленном освоении территории Южной Якутии в областях распространения прерывисто-островной мерзлой углевмещающей мезозойской толщи осадочных пород.

Список источников

1. Голодковская Г.А., Матула М., Шаумян Л.В. Инженерно-геологическая типизация и изучение скальных массивов. М.: Изд-во МГУ, 1986. 272 с.
2. Гриб Н.Н., Самохин А.В. Физико-механические свойства углевмещающих пород Южно-Якутского бассейна. Новосибирск: Наука, 1999. 240 с.
3. Нерадовский Л.Г. Прочность скального основания инженерных сооружений в криолитозоне Южной Якутии (г. Нерюнгри) // Вестник Евразийской науки. 2022. Т. 14. № 2. С. 1–24. <https://doi.org/10.15862/01NZVN222>. EDN: GZZPFS.
4. Нерадовский Л.Г. Электромагнитная технология изучения прочности осадочных пород методом дистанционного индуктивного зондирования (на примере застроенных участков криолитозоны Южной Якутии). М.: АНО «Изд. Дом “Научное обозрение”», 2025. 286 с.
5. Акимов А.Т. Вопросы теории и практики электроразведки мерзлых пород // Геофизические методы исследований при изысканиях в строительстве. М.: Труды ПНИИИС Госстроя СССР, 1971. Т. 6. С. 6–73.

²⁰ Технично-экономического обоснования.



6. Труш Н.И., Чижов А.Б., Чижова Н.И. Южная Якутия: мерзлотно-геологические и инженерно-геологические условия Алданского горнопромышленного района. М.: Изд-во МГУ, 1975. 444 с.
7. Железняк М.Н. Геотемпературное поле и криолитозона юго-востока Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 2005. 228 с. EDN: QKFKWL.
8. Желинский В.М. Мезозойская угленосная формация Южной Якутии. Новосибирск: Наука, 1980. 119 с.
9. Булдович С.Н., Мелентьев В.С., Наумов М.С., Фурикевич О.С. Роль новейших разрывных нарушений в формировании мерзлотно-геологических условий (на примере Нерюнградской синклинали Южно-Якутского мезозойского прогиба) // Мерзлотные исследования. М.: Изд-во МГУ, 1976. Т. 15. С. 120–125.
10. Мокшанцев К.Б., Горнштейн Д.К., Гусев Г.С., Деньгин Э.В., Штех Г.И. Тектоническое строение Якутской АССР. М.: Наука, 1964. 291 с.
11. Шестернев Д.М. Криогипергенез и геотехнические свойства пород криолитозоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 266 с.
12. Сысолытин Р.Г., Железняк М.Н. Геокриологические условия Токарикского и Гувилгринского грабенов (Южная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2023. Т. 28. № 2. С. 261–274. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-261-274>. EDN: ZKESHR.
13. Жабин А.Б., Поляков А.В., Аверин Е.А., Линник Ю.Н., Линник В.Ю. Обобщение современных сведений о корреляционных зависимостях предела прочности на сжатие с иными прочностными показателями горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 6. С. 5–19. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_6_0_5. EDN: KUFEV5.
14. Basarir H., Tutluoglu L., Karpuz C. Penetration rate prediction for diamond bit drilling by adaptive neuro-fuzzy inference system and multiple regressions // Engineering Geology. 2014. Vol. 173. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2014.02.006>.
15. Atapour H., Mortazavi A. The influence of mean grain size on unconfined compressive strength of weakly consolidated reservoir sandstones // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2018. Vol. 171. P. 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.07.029>.
16. Teymen A., Mengüç E.C. Comparative evaluation of different statistical tools for the prediction of uniaxial compressive strength of rocks // International Journal of Mining Science and Technology. 2020. Vol. 30. Iss 6. P. 785–797. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.06.008>.
17. Chaudhary V., Srivastav A., Pandey V.H.R., Kainthola A., Tiwari S.K., Dwivedi S.B., et al. Physico-mechanical characteristics of Vindhyan sandstone, India // Journal of the Institution of Engineers (India): Series D. 2022. Vol. 103. Iss. 1. P. 295–302. <https://doi.org/10.1007/s40033-021-00301-1>.
18. Zorlu K., Gokceoglu C., Ocakoglu F., Nefeslioglu H.A., Acikalin S. Prediction of uniaxial compressive strength of sandstones using petrography-based models // Engineering Geology. 2008. Vol. 96. Iss. 3–4. P. 141–158. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.10.009>.
19. Кричинский А.К., Поспеев А.В. Интеграция искусственного интеллекта в обработку геолого-геофизических данных при разведке твердых полезных ископаемых // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 3. С. 310–320. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-310-320>. EDN: WAUKUO.
20. Шиверский Г.В., Кривошеков С.Н. Перспективы применения методов искусственного интеллекта в нефтегазовой геологии // Master's Journal. 2022. № 2. С. 57–67. EDN: MXLKEW.
21. Царегородцева Т.К., Горкин Г.М. Применение искусственного интеллекта в разведке и добыче углеводородов // Недропользование XXI век. 2022. № 2. С. 12–15. EDN: FRHXVC.
22. Степанов И.Ю. Использование методов машинного обучения в геоинформационных моделях при решении задач геофизической разведки // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2024. Т. 29. № 2. С. 108–117. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2024-29-2-108-117>. EDN: BHXC8Y.
23. Jooshaki M., Nad A., Michaux S. A systematic review on the application of machine learning in exploiting mineralogical data in mining and mineral industry // Minerals. 2021. Vol. 11. Iss. 8. P. 816. <https://doi.org/10.3390/min11080816>.
24. Corrigan C.C., Ikonnikova S.A. A review of the use of AI in the mining industry: Insights and ethical considerations for multi-objective optimization // The Extractive Industries and Society. 2024. Vol. 17. P. 101440. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101440>. EDN: EKFKQY.
25. Бернулли Я. О законе больших чисел / пер. с лат. М.: Наука, 1986. 176 с.
26. Melnikov A., Zhang Z., Yan Q., Romanis T. Spatio-temporal changes in the annual frequency of freeze-thaw cycles // Physics and Chemistry of the Earth. Parts A/B/C. 2025. Vol. 140. P. 104031. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2025.104031>.
27. Латыпов А.И., Гараева А.Н., Королев Э.А. Зональность профиля выветривания среднепермских песчаников на территории Восточного Закамья // Грунтоведение. 2024. Т. 1. С. 33–43. <https://doi.org/10.53278/2306-9139-2024-1-22-33-43>. EDN: UJYLXY.
28. Рященко Т.Г., Маслов Е.А., Брыжак Е.В., Корнилова Т.А., Вашестюк Ю.В., Болотнев А.Ю. Инженерно-геологическая оценка скальных грунтов на примере анализа коллекции образцов Албазинского месторождения // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 2. С. 197–210. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-197-210>. EDN: MOPKPO.
29. Новые идеи и теоретические аспекты инженерной геологии // Труды международной научной конференции: сб. статей / под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королева (г. Москва, 4 февраля 2021 г.). М.: Изд-во ООО «Сам полиграфист», 2021. 334 с.



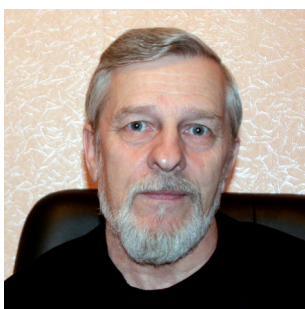
References

1. Golodkovskaya G.A., Matula M., Shahumyan L.V. *Engineering and geological typification and study of rock massifs*. Moscow: Moscow State University; 1986, 272 p. (In Russ.).
2. Grib N.N., Samokhin A.V. *Physical and mechanical properties of coal-bearing rocks in the Southern Yakutian basin*. Novosibirsk: Nauka; 1999, 240 p. (In Russ.).
3. Neradovsky L.G. Strength of hard foundation rocks in the Southern Yakutian permafrost region (city of Neryungri). *The Eurasian Scientific Journal*. 2022;14(2):1-24. (In Russ). <https://doi.org/10.15862/01NZVN222>. EDN: GZZPFS.
4. Neradovsky L.G. *Electromagnetic technology for studying the strength of sedimentary rocks by remote inductive sensing (using the example of built-up areas of the permafrost zone of Southern Yakutia)*. Moscow: Nauchnoe obozrenie; 2025, 286 p. (In Russ).
5. Akimov A.T. Theoretical and practical issues of permafrost rocks electrical prospecting. In: *Geophysical research methods for surveying in construction*. Moscow: Proceedings of the Production and Research Institute for Engineering Surveys in Construction of the USSR Gosstroy; 1971, vol. 6, p. 76-73 (In Russ).
6. Trush N.I., Chizhov A.B., Chizhova N.I. *Southern Yakutia: Permafrost-hydrogeological and engineering-geological conditions of the Aldan mining region*. Moscow: Moscow State University; 1975, 444 p. (In Russ).
7. Zheleznyak M.N. *The ground temperature field and permafrost in the south-eastern part of the Siberian platform*. Novosibirsk: Nauka; 2015, 228 p. (In Russ). EDN: QKFKWL.
8. Zhelinsky V.M. *Mesozoic coal-bearing formation of Southern Yakutia*. Novosibirsk: Nauka; 1980, 119 p. (In Russ).
9. Buldovich S.N., Melentiev V.S., Naumov M.S., Furikevich O.S. The role of recent faults in the formation of permafrost-hydrogeological conditions (on the example of the Neryungri syncline of the Southern Yakutian Mesozoic trough). In: *Permafrost Research*. Moscow: Moscow State University; 1976, vol. 15, p. 120-125. (In Russ).
10. Mokshantsev K.B., Gornshtein D.K., Gusev G.S., Dengin E.V., Shtekh G.I. *Tectonic structure of the Yakut ASSR*. Moscow: Nauka; 1964, 291 p. (In Russ).
11. Shesternev D.M. *Cryohypergenesis and geotechnical properties of permafrost rocks*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2001, 266 p. (In Russ).
12. Sysolyatin R.G., Zheleznyak M.N. Geocryological conditions of the Tokarikan and Guvilgra grabens (South Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(2):261-274. (In Russ). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-261-274>. EDN: ZKESHR.
13. Zhabin A.B., Polyakov A.V., Averin E.A., Linnik Yu.N., Linnik V.Yu. Generalization of up-to-date information on correlation dependences of ultimate compressive strength and other strength characteristics of rocks. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2022;6:5-19. (In Russ). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_6_0_5. EDN: KUFESV.
14. Basarir H., Tutluoglu L., Karpuz C. Penetration rate prediction for diamond bit drilling by adaptive neuro-fuzzy inference system and multiple regressions. *Engineering Geology*. 2014;173:1-9. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEO.2014.02.006>.
15. Atapour H., Mortazavi A. The influence of mean grain size on unconfined compressive strength of weakly consolidated reservoir sandstones. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018;171:63-70. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.07.029>.
16. Teymen A., Mengüç E.C. Comparative evaluation of different statistical tools for the prediction of uniaxial compressive strength of rocks. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020;30(6):785-797. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.06.008>.
17. Chaudhary V., Srivastav A., Pandey V.H.R., Kainthola A., Tiwari S.K., Dwivedi S.B., et al. Physico-mechanical characteristics of Vindhyan sandstone, India. *Journal of the Institution of Engineers: Series D*. 2022;103(1):295-302. <https://doi.org/10.1007/s40033-021-00301-1>.
18. Zorlu K., Gokceoglu C., Ocakoglu F., Nefeslioglu H.A., Acikalin S. Prediction of uniaxial compressive strength of sandstones using petrography-based models. *Engineering Geology*. 2008;96(3-4):141-158. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.10.009>.
19. Krichinsky A.K., Pospeev A.V. Integration of artificial intelligence into geological and geophysical data processing in solid minerals exploration. *Earth Sciences and Subsoil Use*. 2025;48(3):310-320. (In Russ). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-310-320>. EDN: WAUKUO.
20. Shiverskii G.V., Krivoschekov S.N. Prospects for the application of artificial intelligence methods in the geology of oil and gas. *Master's Journal*. 2022;2:57-67. EDN: MXLKEW. (In Russ.).
21. Tsaregorodtseva T.K., Gorkin G. M. Application of artificial intelligence in hydrocarbon exploration and production. *Nedropol'zovanie XXI vek*. 2022;2:12-15. (In Russ.). EDN: FRHXVC.
22. Stepanov I.Y. The use of machine learning methods in geoinformation models in solving problems of geophysical exploration. *Vestnik SSUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*. 202;29(2):108-117. (In Russ). <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2024-29-2-108-117>. EDN: BHXCBY.
23. Jooshaki M., Nad A., Michaux S. A systematic review on the application of machine learning in exploiting mineralogical data in mining and mineral industry. *Minerals*. 2021;11(8):816. <https://doi.org/10.3390/min11080816>.
24. Corrigan C.C., Ikonnikova S.A. A review of the use of AI in the mining industry: Insights and ethical considerations for multi-objective optimization. *The Extractive Industries and Society*. 2024;17:101440. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101440>. EDN: EKFAQHY.



25. Bernoulli J. On the law of large numbers; 1913, 176 p. (Russ. ed.: *O zakone bol'shikh chisel*. Moscow: Nauka; 1986, 176 p.).
26. Melnikov A., Zhang Z., Yan Q., Romanis T. Spatio-temporal changes in the annual frequency of freeze-thaw cycles. *Physics and Chemistry of the Earth. Parts A/B/C*. 2025;140:104031. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2025.104031>.
27. Latypov A.I., Garaeva A.N., Korolev E.A. Zonality of the weathering profile of middle Permian sandstones in the territory of Eastern Zakamye. *Gruntovedenie*. 2024;1(22):33-43. (In Russ).
28. Ryashchenko T.G., Maslov E.A., Bryzhak E.V., Kornilova T.A., Vashestyuk Yu.V., Bolotnev A.Yu. Engineering-geological assessment of rocky soils based on the analysis of the collection of Albazinskoye deposit samples. *Earth Sciences and Subsoil Use*. 2022;45(2):197-210. (In Russ). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-197-210>. EDN: MOPKPO.
29. New ideas and theoretical aspects of engineering geology. In: V.T. Trofimov, V.A. Korolev (ed.). *Proceedings of the International Scientific conference: collected articles*. 4 February 2021, Moscow. Moscow: Sam poligrafist; 2021, 334 p. (In Russ).

Информация об авторе / Information about the author



Нерадовский Леонид Георгиевич,

доктор технических наук,
заслуженный деятель науки Республики Саха (Якутия),
старший научный сотрудник лаборатории инженерной геокриологии,
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова
Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Якутск, Россия,

✉ L031950N@ya.ru

РИНЦ Author ID: 394470

Scopus Author ID: 17344126100

Leonid G. Neradovskii,

Dr. Sci. (Eng.),
Honored Scientist of the Republic of Sakha (Yakutia),
Senior Researcher of the Laboratory of Engineering Geocryology,
Melnikov Permafrost Institute,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, Russia,

✉ L031950N@ya.ru

RSCI Author ID: 394470

Scopus Author ID: 17344126100

Вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflict of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 10.11.2025; одобрена после рецензирования 25.11.2025; принята к публикации 15.12.2025.

The article was submitted 10.11.2025; approved after reviewing 25.11.2025; accepted for publication 15.12.2025.