

Геоинформатика. 2024. № 2. С. 36–44.

Geoinformatika. 2024;(2):36–44.

Моделирование геообъектов и геопроцессов

Научная статья

УДК 552.08

<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-2-36-44>

Динамика физико-механических свойств песчаника в слое годовых теплооборотов Южной Якутии (на примере г. Нерюнгри)

© 2024 г. — Леонид Георгиевич Нерадовский

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН; Россия, г. Якутск

leoner@mpi.ysn.ru

Аннотация: Впервые по лабораторным данным инженерно-геологических изысканий в квартале М г. Нерюнгри получены обобщенные вероятностные оценки изменчивости физико-механических свойств массива песчаника в слое годовых теплооборотов. Установлено, что в интервале опробования свойств массива песчаника на глубине 1–18 м на фоне непредсказуемой случайной изменчивости единичных значений объемного веса, прочности в воздушно-сухом состоянии и коэффициента размягчаемости среднеинтервальные оценки этих свойств закономерно возрастают по глубине, образуя зональную систему из трех границ. На первой границе на глубине 2,0 м залегает выветренная часть песчаника с блочно-ячеистой структурой. На второй границе на глубине 6,0–7,0 м располагается сильнотрещиноватая часть песчаника с трещинно-жильной структурой. На третьей опорной границе на глубине 10–15 м находится песчаник очень прочной категории с монолитной структурой. В верхней части зональной системы со средним объемным весом 2,53 г/см³ средние потери изначальной прочности песчаника, равной 70,2 МПа, максимальны – 47 %. В нижней части с объемным весом 2,58–2,61 г/см³ и прочностью 110,00–115,30 МПа аналогичные потери минимальны и равны 22 %. В целом при сохранении воздушно-сухого состояния массив песчаника представляет собой надежное скальное основание, благоприятное для строительства и эксплуатации инженерных сооружений.

Ключевые слова: г. Нерюнгри; квартал М; слой годовых теплооборотов; массив песчаника; объемный вес; прочность; размягчаемость.

Для цитирования: Нерадовский Л.Г. Динамика физико-механических свойств песчаника в слое годовых теплооборотов Южной Якутии (на примере г. Нерюнгри) // Геоинформатика. — 2024. — № 2. — С. 36–44. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-2-36-44>.

Modeling of geological objects and geoprocesses

Original article

Dynamics of the physical properties of sandstone within the depth of annual ground temperature variation, Southern Yakutia (Neryungri case study)

© 2024 — Leonid G. Neradovskii

Melnikov Permafrost Institute SB RAS; Yakutsk, Russia

leoner@mpi.ysn.ru

Abstract: Using available geotechnical laboratory testing data for residential district M in the city of Neryungri, this study presents the first generalized probabilistic estimates of the variation in physico-mechanical properties of the sandstone mass within the depth of annual temperature variation. Although the individual values of bulk density, dry strength and softening coefficient vary randomly within the sampling depth range of 1–18 m, the mean interval estimates systematically increase with depth, forming a zonal system of three boundaries. Occurring at the first boundary at a depth of 2,0 m is weathered sandstone with a blocky structure. The second boundary is at 6,0–7,0 m depth where the sandstone mass is strongly fissured and has a seamy structure. The third boundary is at 10–15 m with very strong sandstone of massive structure. The upper part of the zonal system with an average bulk density of 2,53 g/cm³ is characterized by the greatest average strength loss (47 %) from initial strength of 70,2 MPa. The lower part with bulk densities of 2,58–2,61 g/cm³ and strengths of 110,00–115,30 MPa exhibits minimal strength loss, 22%. Overall, the sandstone mass can serve as competent foundation for engineering structures provided that its air-dry condition is maintained.

Key words: Neryungri City; District M; ground layer of annual temperature variation; sandstone mass; bulk density; strength; softening.

For citation: Neradovskii L.G. Dynamics of the physical properties of sandstone within the depth of annual ground temperature variation, Southern Yakutia (Neryungri case study). *Geoinformatika*. 2024;(2):36–44. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-2-36-44>. In Russ.

Введение

В настоящей статье по данным инженерно-геологических изысканий (далее изысканий), собранных в архиве ООО «Нерюнгростройизыскания», изучена изменчивость в слое годовых теплооборотов криолитозоны Южной Якутии физико-механических свойств массива песчаника, слагающего основание инженерных сооружений на территории г. Нерюнгри. В петрофизическом отношении результат исследований дополняет ранее полученную аналогичную информацию по данным метода дистанционного индуктивного зондирования [1]. Данные изысканий были получены в 1976–1985 гг. в одном из жилых кварталов г. Нерюнгри и представляют собой значения объемного веса, прочности в воздушно-сухом состоянии и коэффициента размягчаемости водой образцов песчаника. Они приготавливались из монолитов, отобранных из керн скважин в слое годовых теплооборотов на глубине 1–18 м. Будучи весьма сложным по пространственно-временной динамике, этот слой до сих пор служит объектом пристального научного внимания со стороны инженерной геологии, мерзловедения, грунтоведения и геофизики криолитозоны. Значимость слоя годовых теплооборотов настолько велика для изучения вечно-многолетнемерзлых и сезонно-мерзлых геолого-грунтовых сред, что А.Т.Акимов образно назвал его «фабрикой криогенных процессов» [2]. Нельзя не согласиться с этой яркой и точной всеохватывающей оценкой, не теряющей своей актуальности и в современный период времени. Научная цель настоящей статьи состояла в изучении закономерностей и особенностей изменчивости в слое годовых теплооборотов обозначенных выше свойств песчаника в сфере механического и теплового взаимодействия с инженерными сооружениями, где происходит интенсивное разнонаправленное и нелинейно-затухающее по глубине воздействие не только со стороны климатических, но и антропогенно-техногенных факторов.

Участок исследований

Исследования изменчивости в слое годовых теплооборотов физико-механических свойств массива песчаника выполнены в жилом квартале М, расположенном в возвышенной юго-западной центральной части г. Нерюнгри. Выбор этого квартала объясняется тем, что со времени доступа к материалам изысканий в архиве ООО «Нерюнгростройизыскания» именно с этого квартала начались сбор и всесторонний анализ вместе с систематизацией и обобщением фактического материала буровых и лабораторных работ для решения задач геомеханики и петрофизики касательно толщи углевмещающих осадочных пород Южной Якутии.

Небольшой по размерам и численности населения административный центр Южной Якутии — г. Нерюнгри находится примерно в 800 км на юго-запад

от г. Якутска. Абсолютные отметки высоты поверхности рельефа местности в квартале М над уровнем Балтийского моря изменяются от 859 до 873 м. В квартале находятся разной этажности (1–10 этажей) инженерные сооружения социальной инфраструктуры (жилые дома, детсады, школы, магазины и пр.). В структурном отношении г. Нерюнгри расположен в зоне складчатости по краевому шву Предстанового прогиба на южной окраине Алданского плоскогорья в пределах Чульманской впадины, выполненной угленосными осадочными породами юры и нижнего мела. Инженерно-геологические условия строительства и эксплуатации инженерных сооружений в квартале М мало чем отличаются от аналогичных условий в остальных кварталах г. Нерюнгри. В свою очередь эти условия типичны для всей криолитозоны Южной Якутии, где распространена толща углевмещающих осадочных пород. По данным региональных обобщений, приведенных в работах МГУ имени М.В. Ломоносова [3] и В.М. Желинского [4], в толще мезозойских осадочных пород основным литотипом является мелко-среднезернистый кварц-полевошпатовый песчаник. По данным изысканий, в г. Нерюнгри песчаник позднечульманского возраста кабактинской свиты образует пологонаклонную толщу с углом падения около 20°. На этом однородном литогенном фоне проявляют себя в местном (г. Нерюнгри) и региональном масштабах (Южной Якутии) две главные природные черты. Первая черта — изначальная неоднородность и высокая изменчивость прочности песчаника, разуплотненного процессами тектоники и криогипергенеза с образованием сложнейшей системы дробления и трещиноватости [5–7]. Вторая черта — неустойчивая в пространстве (по площади и глубине) и во времени прерывисто-островная криолитозона. Она сформировалась позднее в результате действия климатических факторов и внутриземных тепловых потоков [8] в сложнейшем сочетании с геоморфологией и ландшафтом Южной Якутии. По общим оценкам мощность островной мерзлоты на водораздельных пространствах Южной Якутии на территории г. Нерюнгри преимущественно равна 20–50 м. Среднегодовая температура осадочных пород в нижней части слоя годовых теплооборотов на глубине 10–15 м близка к 0 °С. В г. Нерюнгри по данным термометрии изыскательских скважин мощность островной мерзлоты была равна 13–18 м, а температура на глубине 8–10 м изменялась от –0,1 до –0,7 °С. На участках антропогенно-техногенной деградации островной мерзлоты под аварийными инженерными сооружениями температура на указанной глубине изменялась от ± 0,0 до + 6,5 °С. Более мягкий тепловой режим в нижней части слоя годовых теплооборотов с температурой не выше + 0,6 °С наблюдается на участках природного отсутствия мерзлоты. На обозначенных участках происходит сезонное оттаивание промерзших зимой и весной немерзлых пород или их промерзание (зимой-вес-

ной) до глубины 3–6 м, охватывая криогенным метаморфизмом верхнюю часть выветренного силънотрещиноватого массива песчаника, залегающего под слоем делювия-элювия.

Фактический материал и методика исследований

Фактический материал был собран в квартале М г. Нерюнгри и состоял из 573 определений значений объемного веса (ρ), временного предела прочности на одноосное сжатие в воздушно-сухом состоянии (R_c), коэффициента размягчаемости водой ($k_{соф}$). Благодаря большому объему фактического материала задачи вероятностно-статистического анализа решались корректно как в части идентификации теоретических законов, так и в части количественной оценки описательных статистик вероятностных распределений значений исследуемых физико-механических свойств образцов песчаника, а по их совокупности и всего массива песчаника. Для решения ряда задач вероятностно-статистическим анализом применялась лицензионная эргономичная программа А.П. Кулаичева «Стадия» [9], отличающаяся многими достоинствами, которых нет у зарубежных программ, например «Statistica» и «Origin».

В методическом отношении с помощью программы «Стадия» последовательно изучалось строение вероятностной структуры изменчивости значений физико-механических свойств песчаника в двух направлениях: по площади квартала М и по глубине слоя годовых теплооборотов. Обобщенные образы изменчивости свойств песчаника отображались в виде дискретных графиков по глубине и гистограмм. Затруднения возникали при выборе интервала группирования значений свойств массива песчаника по глубине. Объясняется это неравномерной схемой отбора монолитов из массива песчаника, принятой в XX веке в НПО «Стройизыскания»

Госстроя РСФСР [10]. Несмотря на методический недостаток схема оптимальна по сочетанию параметров геологической информативности и экономической эффективности. Благодаря этому она не теряет своей актуальности в современный период времени рыночных отношений.

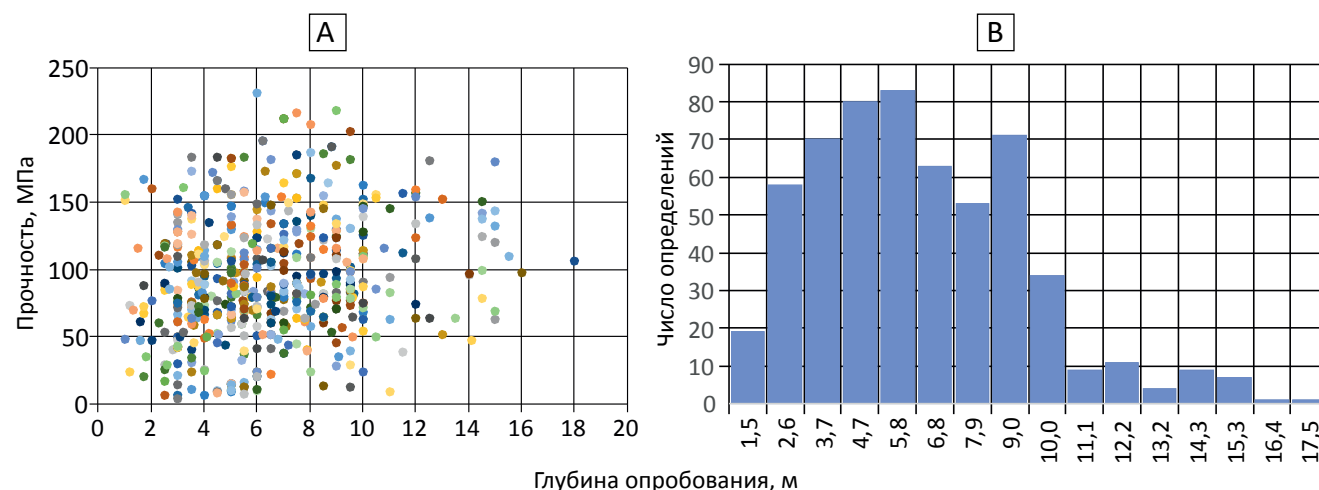
Кластерный анализ, проведенный с помощью программы «Стадия» [9], помог корректно выбрать интервалы группирования в следующей последовательности, м: 1–2; 2–3; 3–4; 4–5; 5–6; 6–7; 7–8; 8–9; 9–10; 10–11; 11–15; 15–18. Число достаточных для вероятностно-статистического анализа определений в приведенных интервалах изменялось более-менее равномерно: 17; 24; 81; 55; 97; 69; 62; 45; 52; 31; 32; 8. Менее всего процесс изменчивости физико-механических свойств массива песчаника оказался изучен по восьми определениям в интервале глубины 15–18 м.

Результаты исследований

Применительно к инженерно-геологическим условиям квартала М г. Нерюнгри подтверждается отмеченная выше оптимальность изыскательской схемы опробования грунтовых сред по информативности и экономичности (см. рис. 1 А). Интервал опробования свойств массива песчаника охватывает глубину 1,0–18,0 м. В подавляющем большинстве случаев (89,3 %) опробование выполнено в интервале 2,1–10,6 м (см. рис. 1 В) во всех частях массива песчаника начиная с верхней выветренной части и заканчивая нижней плотной частью. В редких случаях отбор монолитов сделан из массива песчаника на максимальной глубине 12,7–18,0 м. Все вместе взятое свидетельствует о репрезентативности результатов опробования для решения задачи изменчивости свойств песчаника в слое годовых теплооборотов.

Рис. 1. Облако случайного разброса опробования по глубине прочности массива песчаника (А) и гистограмма распределения значений глубины отбора монолитов песчаника из керна изыскательских скважин (В) (объем выборки — 573 определения)

Fig. 1. Random scatter cloud of strength sampling depth in sandstone mass (A) and depth histogram of intact sandstone samples from geotechnical exploration borehole cores (B) (sample size is 573 determinations)



Рассмотрим вероятностный ряд изменчивости значений объемного веса массива песчаника. В науках о Земле эта физическая характеристика горных пород считается фундаментальной. Существуют разные методы количественной оценки объемного веса. В технических отчетах по изысканиям нет указаний на конкретный метод оценки объемного веса. Однако в лабораторных ведомостях физико-механических свойств его значения приводятся вместе со значениями прочности, полученными по одним и тем же образцам правильной геометрической формы. Это дает основание сделать вывод, что объемный вес был определен методом непосредственных измерений веса и вычисления объема образцов [11].

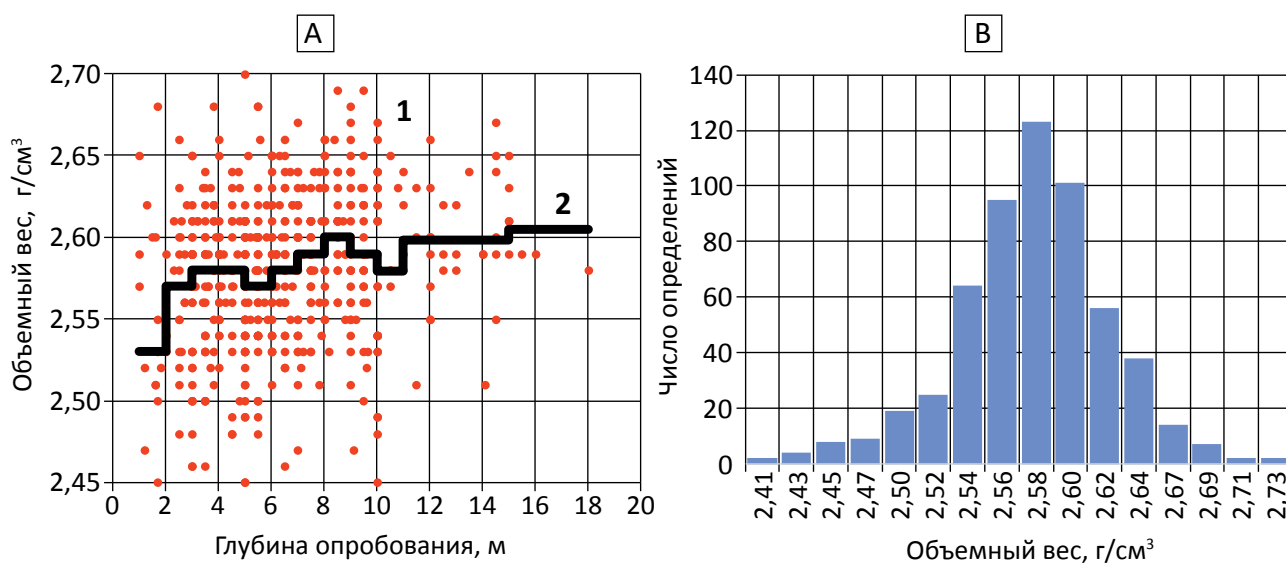
Вероятностная изменчивость разобщенных по площади и глубине определений единичных значений объемного веса песчаника представляет облако случайного рассеяния (рис. 2 А). В нем не увидишь никакой закономерности, но она присутствует. И только в устойчивом компактном пространстве средних интервальных значений закономерность становится очевидной в кусочно-монотонном прерывистом росте значений ρ . Скачок роста объемного веса от 2,53 до 2,57 г/см³ происходит на глубине 2,0 м. Положение этой обобщенной для всего квартала М начальной границы кардинального изменения объемного веса соответствует кровле наиболее выветренной дезинтегрированной части малопрочного массива песчаника, называемой «рухляком».

Второй рост объемного веса до 2,59–2,60 г/см³ с более сложной динамикой происходит на глубине 7,0 м. Здесь рост связан с переходом выветренной верхней части массива песчаника в среднюю сильнотрещиноватую часть с блочно-ячеистой структурой. В этой части массив песчаника представляет разобщенные между собой прочные скальные останцы, сохранившиеся от интенсивного физического выветривания. Именно они при опробовании имеют максимальное значение ρ , равное 2,60 г/см³. Между блоками объемный вес снижается до 2,58 г/см³. Изменения небольшие, но они обеспечены лабораторной точностью и вдобавок статистически значимы.

Третий и последний незначительный, но четкий в своей контрастности рост объемного веса до максимальных средних интервальных значений 2,60–2,61 г/см³ происходит на глубине 11,0 м. На этой границе располагается относительно сохранный от влияния процесса криогипергенеза прочный массив песчаника с трещинно-жильной структурой. Эта граница опорная и контрастная как в структурном, так и в петрофизическом отношении. На ней по данным геофизиков-изыскателей, работавших в г. Нерюнгри, происходит резкий рост скорости распространения сейсмических и электромагнитных волн, а также удельного электрического сопротивления на постоянном токе. Границу окончательной консолидации массива песчаника с максимальным уплотнением и уменьшением числа и ширины открытости трещин по дискретному изменению значений ρ установить невозможно.

Рис. 2. Сводная диаграмма динамики по глубине (А) и гистограмма значений объемного веса (В) массива песчаника (объем выборки — 573 определения)

Fig. 2. Cumulative diagram of variation with depth (A) and histogram of bulk density (B) in the sandstone mass (sample size is 573 determinations)



1 — облако случайного рассеяния единичных значений объемного веса; 2 — дискретный график средних интервальных значений объемного веса

1 — random scatter cloud of individual bulk density values; 2 — discrete plot of mean interval values of bulk density

Однако можно предположить, что граница залегает на глубине не менее 15,0 м (см. рис. 2).

Вероятностное распределение объемного веса в массиве песчаника почти идеально симметрично и сбалансировано в окрестности максимума гистограммы, соответствующего доминирующему значению ρ , равному $2,58 \text{ г/см}^3$ (см. рис. 2 В). По близости показателей средних значений это выборочное распределение можно принять соответствующим теоретическому закону больших чисел или, как его принято называть законом нормального вероятностного распределения. Однако по результатам тестовой проверки по трем независимым критериям (Колмогорова, Омега-квадрат и Хи-квадрат) этот закон теоретически точно не описывает вероятностное распределение значений объемного веса. Тем не менее, выборочное среднее арифметическое значение приблизительно можно принять за математическое ожидание теоретической оценки генеральной средней объемного веса. При допущении такой идентификации и изменчивости единичных значений от $2,18$ до $2,74 \text{ г/см}^3$ общая по кварталу М локально-фоновая оценка среднего объемного веса массива песчаника с доверительной вероятностью 95,0 % будет равна $2,58 \text{ г/см}^3$ с исчезающе малой погрешностью $\pm 0,004 \text{ г/см}^3$. На этом фоне в 80,0 % случаев случайный разброс значений ρ заключен в интервал $2,51\text{--}2,65 \text{ г/см}^3$. Такая динамика объемного веса удостоверяет, что массив песчаника в пределах слоя годовых теплооборотов находится в сильно неоднородном состоянии.

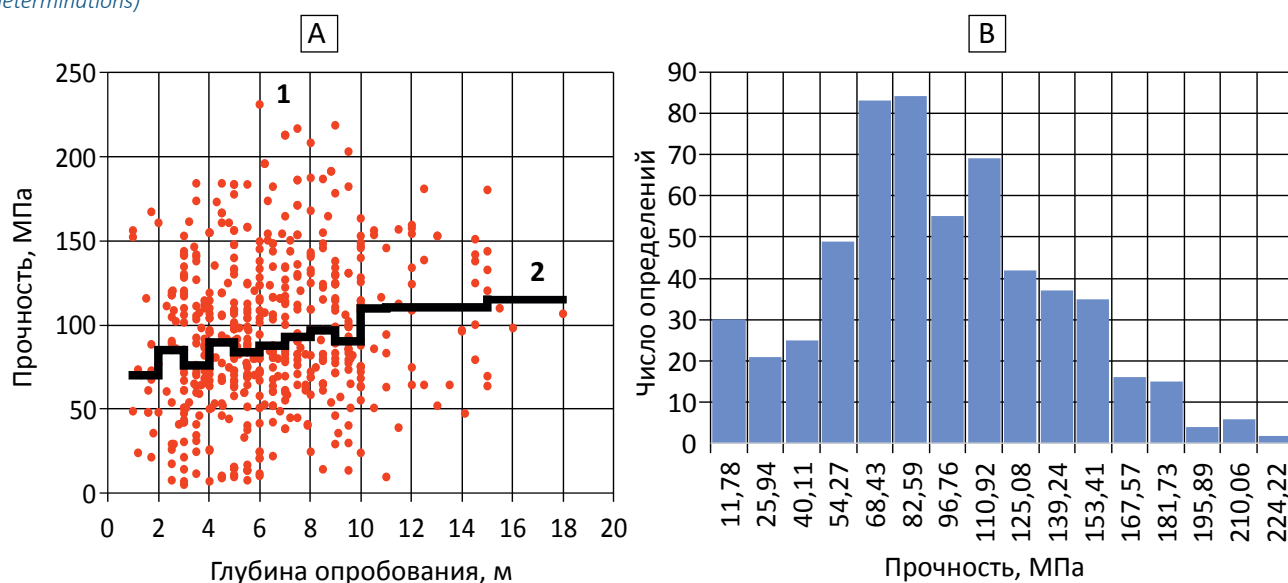
Дополняющим утверждением к сделанному выше выводу служит вероятностное распределение прочности массива песчаника в воздушно-сухом состоянии. Как и при изучении объемного веса эта механическая характеристика распределена случайным образом без каких-либо следов закономерности (рис. 3 А) с широким разбросом единичных значений R_c от 4,7 до 231,3 МПа. На этом фоне средние показатели прочности, образующие центр тяжести вероятностного распределения в интервале глубины 2–10 м, составляют 64,00–93,93 МПа.

В сравнении с незначительным коэффициентом вариации объемного веса, равным 2,1 %, у прочности он намного выше (47,4 %). Объясняется эта аномальная разница несопоставимым масштабом природной изменчивости и числом влияющих факторов. У объемного веса изменчивость происходит в микроскопическом масштабе и зависит от небольшого по числу, но сильных по влиянию таких физических факторов, как минералогический и гранулометрический (размер минеральных зерен) состав, а также не менее сильных, но второстепенных факторов, связанных с типом и составом цемента, который скрепляет минеральные агрегации в единое целое геологическое образование — массив песчаника.

К перечисленным факторам добавляются факторы, действующие в мезомасштабе. Они кардинальным образом усиливают изменчивость прочности массива песчаника. Это текстурно-структурные факторы: число, ширина и ориентация системы трещин вместе с примесями, которые

Рис. 3. Сводная диаграмма динамики по глубине (А) и гистограмма значений прочности массива песчаника в воздушно-сухом состоянии (В) (объем выборки — 573 определения)

Fig. 3. Cumulative diagram of variation with depth (А) and histogram of air-dry strength values (В) in the sandstone mass (sample size is 573 determinations)



1 — облако случайного рассеяния единичных значений прочности; 2 — дискретный график средних интервальных значений прочности

1 — random scatter cloud of individual strength values; 2 — discrete plot of mean interval strength values

в сосредоточенном или рассеянном виде заполняют трещины и каверны (воздух, вода, лед, глинистые материалы, углистые частицы, налеты или пленки гидроокислов железа).

В своей совокупности отмеченные факторы формируют в упорядоченном пространстве групповых среднеинтервальных значений R_c закономерное изменение прочности по глубине в слое годовых теплооборотов. Картина этой изменчивости в целом, аналогична картине, наблюдаемой на рис.2 А. В ней также три границы, на которых происходит прочностной переход между основными зональными структурно-петрофизическими частями массива песчаника. В верхней сильноветренной части массива до глубины 2,0 м его минимальная средняя прочность в воздушно-сухом состоянии достаточно высока для строительства и эксплуатации инженерных сооружений и составляет 70,2 МПа. Ниже, до глубины 6,0 м, средняя прочность постепенно растет до 83,8 МПа. Кардинальная смена прочности до 110,0–115,3 МПа происходит на опорной границе на глубине 10,0 м. Здесь и залегает консолидированная часть монолитного прочного массива песчаника с редкой сетью тонких трещин волосяного типа. Разница по положению этой границы в сравнении с объемным весом равна 1 м. Вероятностное распределение значений прочности массива песчаника не подчиняется закону больших чисел и сосредоточено в окрестности максимума гистограммы со средними интервальными значениями R_c от 54,27 до 153,41 МПа (см. рис. 3 В). Эта особенность вероятностной структуры показывает, что в большинстве случаев (79,2 %) опробованный в квартале М массив песчаника в воздушно-сухом состоянии принадлежит к типу скальных грунтов прочной (50–120 МПа) и очень прочной (более 120 МПа) категорий [12].

Рассмотрим как изменяется в слое годовых теплооборотов степень размягчаемости водой воздушно-сухого массива песчаника, т. е. значений коэффициента k_{sof} . Его значения определяются как отношение значений прочности образцов песчаника в водонасыщенном состоянии к значениям прочности воздушно-сухих образцов. Порядок количественной оценки прочности в лабораторных условиях установлен ГОСТ 21135.2–84 [13]. Априорное знание значений коэффициента k_{sof} имеет большое практическое значение. Оно предоставляет возможность до производства проектно-испытательских работ прогнозировать потери прочности скально-полускальных оснований инженерных сооружений при их естественном или искусственном временном замачивании атмосферно-подземными или антропогенно-техногенными водами. В этом прогнозе большие значения коэффициента k_{sof} будут указывать на низкие потери прочности оснований фундаментов, а низкие — на большие потери прочности. Разграничивающим эмпирическим критерием для классификации осадочных

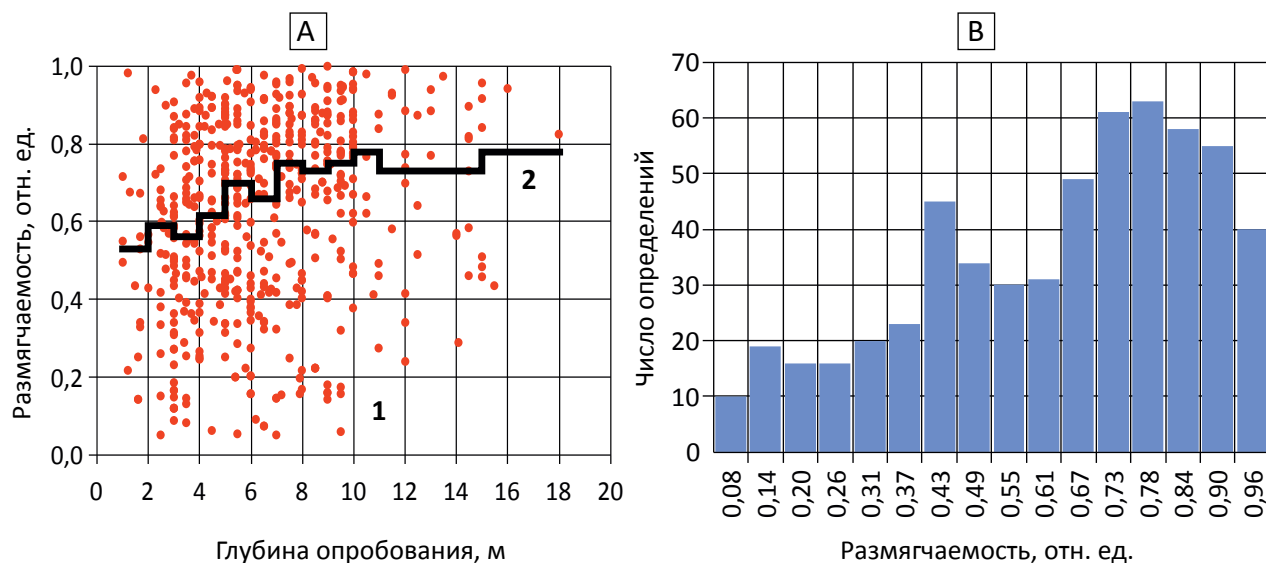
пород на неразмягчаемые-размягчаемые разности по рекомендации пособия к СНиП 2.02.01-83 (пункт 2.24, табл. 1) принято значение k_{sof} равное 0,75 отн. ед. [14].

При очень большой широте случайной изменчивости единичных значений k_{sof} от 0,05 до 1,00 отн. ед. интегральный показатель изменчивости размягчаемости в воде воздушно-сухих образцов песчаника по коэффициенту вариации оказывается небольшим — 37,4 % и даже немного меньше, чем у прочности. Эта статистика косвенно указывает на присущую, хотя и в разной степени, всем геологическим образованиям природного свойства устойчивости к внешним воздействиям, в частности, замачиванию водой. Однако мера сопротивления этому процессу, оцененная по разнице значений коэффициентов вариации лабораторных характеристик R_c и k_{sof} , очень слабая и приблизительно равна 10 %, так как большая часть массива песчаника, изначально ослабленная процессами тектоники и содержащая множество дефектов — внутренних микроочагов механического напряжения, находится в зоне постоянного действия процесса физического выветривания (криогипергенеза). При замачивании водой отмеченные дефекты исчезают с мгновенным исчезновением напряжений и разрушением структуры песчаника на микроуровне. Микроскопическая неоднородность с дефектами в виде очагов свободной прочносвязанной незамерзшей воды присутствует и в мерзлых четвертичных дисперсных отложениях песчано-глинистого состава. Применительно к геоэлектрическим исследованиям и опережая или учитывая результаты работ П.А. Ребиндера [15] А.Д. Фролов назвал внутреннюю неоднородность дисперсных отложений «коагуляционно-кристаллической структурой» [16]. В отличие от разрушительного химического действия воды на скально-полускальный грунт (песчаник) на разрушение мерзлых дисперсных грунтов действует внешний тепловой фактор, повышая их температуру. При достижении некоторого критического температурного уровня происходит нарушение равновесного термодинамического состояния. Оно вызывает неуправляемый лавинообразный процесс роста количества незамерзшей воды с разрушением и переходом в талое состояние механически прочных мерзлых песков и менее прочных супесей, суглинков и глин. В обоих случаях природная и тем более засоленная антропогенно-техногенная вода действует разрушительным образом как на немерзлые и морозные скально-полускальные грунты, так и на мерзлые дисперсные грунты.

Непредсказуемое и неконтролируемое в лабораторных условиях изменение прочности массива песчаника при его замачивании водой проявляет себя в асимметрии облака случайного рассеяния со сдвигом значений k_{sof} в верхнюю часть диаграммы (рис. 4 А).

Рис. 4. Сводная диаграмма динамики по глубине (А) и гистограмма значений размягчаемости в воде воздушно-сухого массива песчаника (В) (объем выборки — 573 определения)

Fig. 4. Cumulative diagram of variation with depth (A) and histogram of softening coefficients of the air-dry sandstone mass (B) (sample size is 573 determinations)



1 — облако случайного рассеяния единичных значений коэффициента размягчаемости; 2 — дискретный график средних интервальных значений коэффициента размягчаемости

1 — random scatter cloud of individual softening coefficient values; 2 — discrete plot of mean interval softening coefficients

Вероятностная тенденция становится закономерностью в пространстве обобщенных среднеинтервальных значений k_{sof} . Их мнотонный рост на дискретном графике до глубины 7,0 м показывает существенное снижение размягчаемости песчаника водой. Действительно, на глубине до 2,0 м значение k_{sof} минимально и равно 0,53 отн. ед. При таком значении потери прочности выветренной части воздушно-сухого песчаника при его замачивании водой велики и составляют в среднем 47 %. На глубине 7,0 м при значении k_{sof} равном 0,66 отн. ед. потери прочности в менее выветренном, но сильно трещиноватом песчанике уменьшаются до 34 %. Относительная разница средних потерь прочности равна 32,1 %.

Начиная с глубины 7,0 и до 15 м на фоне локальных вариаций происходит стабилизация изменчивости значений k_{sof} около асимптотического уровня 0,74 отн. ед. При таком значении k_{sof} массив песчаника в квартале М г. Нерюнгри находится в пограничном почти равновероятностном состоянии между размокаемым и неразмокаемым. Переход из этого состояния происходит на глубине 15 м в зоне расположения очень прочного массива песчаника (R_c более 120 МПа). Однако к этому выводу надо относиться с осторожностью, так как среднеинтервальные оценки коэффициента размягчаемости получены на глубине 15–18 м по незначительному числу определений. Несмотря на оговорку сделанный вывод все же следует считать статистически и энергетически значимым, принимая во внимание тесную корреляционную связь

среднеинтервальных значений k_{sof} с аналогичными значениями объемного веса и прочности. Параметрические значения коэффициентов корреляции этой эмпирической связи равны 0,732 и 0,833 соответственно. Они удостоверяют, что на соответствующем иерархическом уровне в слое годовых теплооборотов существует цепочка причинно-следственных отношений физико-механических свойств песчаника. Судя по непараметрическим значениям коэффициентов парной корреляции меньших для $\rho-k_{sof}$ (0,616) и больших для R_c-k_{sof} (0,863) в обозначенной цепочке отношений рост объемного веса порождает линейный рост прочности, а прочность в свою очередь с более высокой силой приводит к более высокому, но уже нелинейному росту коэффициента размягчаемости водой, означающему последовательное снижение по глубине потерь прочности массива песчаника.

В целом изученный в квартале М г. Нерюнгри массив песчаника преимущественно размокается водой, о чем свидетельствует гистограмма распределения значений k_{sof} во всем охвате глубины опробования (см. рис. 4 В). Более половины определений (59,3 %) меньше критического значения 0,75 отн. ед. Остальная часть с компактным вероятностным распределением сосредоточена в пределах максимума гистограммы в полосе часто встречающихся среднеинтервальных значений 0,78–0,96 %, где потери прочности воздушно-сухого массива песчаника при его замачивании водой сведены до минимума, равного 22–14 %.

Заключение

Вероятностно-статистический анализ лабораторных данных впервые обнаружил в квартале М г. Нерюнгри 3-зональную структуру с закономерной изменчивостью в слое годовых теплооборотов среднеинтервальных оценок физико-механических свойств массива песчаника. Верхняя часть структуры до глубины 2,0 м сложена сильновыветренной частью массива песчаника с объемным весом 2,53 г/см³, прочностью 70,2 МПа и размягчаемостью 0,53 отн. ед. Средняя часть структуры сложена на глубине 2,0–7,0 м выветренной сильнотрещиноватой частью массива песчаника с нарастанием обозначенных свойств до 2,57 г/см³, 83,8 МПа и 0,70 отн. ед. Опорная в структурно-петрофизическом отношении нижняя часть структуры залегает на глубине 10,0–15,0 м. Она сложена плотным неразмокаемым в воде консолидированным массивом песчаника с редкой системой во-

лосяных трещин и характеризуется максимальными значениями объемного веса (2,58–2,61 г/см³), прочности (110,00–115,30 МПа) и размягчаемости (0,73–0,78 отн. ед.). В целом опробованный буровыми работами на глубине 1,0–18,0 м массив песчаника представляет собой скальное основание инженерных сооружений в квартале М г. Нерюнгри. Однако при этом положительном качестве массив песчаника отличается сложной непредсказуемой изменчивостью по площади и глубине единичных значений объемного веса и прочности вместе со склонностью к размягчаемости водой. Учет последней особенности важен при проектировании инженерных сооружений, так как средние потери прочности массива песчаника при естественном или искусственном замачивании водой могут изменяться от незначительных (26 %) до аномально больших (95 %).

Автор статьи приносит глубокую благодарность главному инженеру ООО «Нерюнгрострой изыскания» А.В. Осмушкину за предоставленную возможность систематически работать с материалом инженерно-геологических изысканий г. Нерюнгри.

Исследования выполнены по госбюджетному финансированию в лаборатории инженерной геокриологии Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН в рамках НИР 2024 г. по программе СО РАН «Устойчивость природно-технических систем в криолитозоне и разработка технологий использования криогенных ресурсов». Регистрационный номер АААА-А20-120111690011-9.

Список источников

1. Нерадовский Л.Г. Технология изучения методом дистанционного индуктивного зондирования электрофизических характеристик осадочных пород Южной Якутии на железнодорожной станции Кюргеллях // Геоинформатика. – 2023. – № 4. – С. 39–51. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-4-39-51>.
2. Акимов А.Т. Вопросы теории и практики электроразведки мерзлых пород // Труды ПНИИИС Госстроя РСФСР. Т. VI. Геофизические методы исследований при изысканиях в строительстве. – М.: Изд-во ПНИИИС. – 1971. – С. 6–76.
3. Южная Якутия: мерзлотно-геологические и инженерно-геологические условия Алданского горнопромышленного района / Под ред. В.А. Кудрявцева. – М.: Изд-во МГУ, 1975. – 444 с.
4. Желинский В.М. Мезозойская угленосная формация Южной Якутии / отв. ред. А. К. Матвеев. – Новосибирск: Изд-во Наука. Сиб. отд-ние, 1980. – 119 с.
5. Булдович С.Н., Мелентьев В.С., Наумов М.С., Фурикевич О.С. Роль новейших разрывных нарушений в формировании мерзлотно-геологических условий (на примере Нерюнгринской синклинали Южно-Якутского мезозойского прогиба) // Мерзлотные исследования. М., Изд-во Моск. ун-та, 1976, вып. XV, с. 120–125.
6. Мокшанцев К.Б., Горнштейн Д.К., Гусев Г.С. и др. Тектоническое строение Якутской АССР. – М.: Наука, 1964. – 240 с.
7. Шестернев Д.М. Криогипергенез и геотехнические свойства пород криолитозоны. – Новосибирск: СО РАН, 2001. – 266 с.
8. Железняк М.Н. Геотемпературное поле и криолитозона юго-востока Сибирской платформы. – Новосибирск: Наука, 2005. – 227 с.
9. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006. – 512 с.
10. 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 учётом требований проектирования. – М.: Госстрой РФСР. НПО Стройизыскания, 1989. – 173 с.
11. Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований: Учебное пособие. – Л.: Недра, 1990. – 328 с.
12. ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация. – М.: Изд-во Стандартинформ, 2020. – 38 с.
13. ГОСТ 21135.2–84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 7 с.
14. Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83) / НИИОСП им. Н.М. Герсеванова Госстроя СССР – М.: Стройиздат, 1986. – 415 с.

15. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия: избранные труды. – М.: Наука, 1978. – 368 с.
16. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. – Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1998. – 515 с.

References

1. Neradovskii L.G. Technology for studying the electrophysical characteristics of sedimentary rocks of South Yakutia at the railway station Kyurgellyakh using the method of remote inductive probing. *Geoinformatica*. 2023; (4):39–51. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-4-39-51>.
2. Akimov A.T. Voprosy teorii i praktiki elektrorazvedki merzlykh porod [Theoretical and practical issues of electrical exploration of permafrost]. In: Proc. of PNIIS, USSR Gosstroy. Vol. 6. Geophysical Methods in Engineering Investigations. Moscow: The Industrial Research Institute in Construction; 1971. p. 6–73.
3. Yuzhnaya Yakutiya: merzlotno-gidrogeologicheskie i inzhenernogeologicheskie usloviya Aldanskogo gornopromyshlennogo rajona [Southern Yakutia: permafrost-hydrogeological and engineering-geological conditions of the Aldan mining region]. V.A. Kudryavtsev (Ed.). Moscow: MGU; 1975. 444 p.
4. Zhelinskij V.M. Mezozojskaya uglenosnaya formaciya Yuzhnoj Yakutii [Mesozoic coal-bearing formation of South Yakutia]. Novosibirsk: Nauka; 1980. 119 p.
5. Buldovich S.N., Melentiev V.S., Naumov M.S., Furikevich O.S. Rol' novejshih razryvnyh narushenij v formirovanii merzlotno-gidrogeologicheskikh uslovij (na primere Neryungirskoj sinklinali Yuzhno-Yakutskogo mezozojskogo progiba) [The role of recent faults in the formation of permafrost and hydrogeological conditions (case study of the Neryungri syncline, South-Yakutian Mesozoic trough)]. In: Merzlotnye Issledovania. Iss 15. Moscow: MGU; 1976, p. 120–125.
6. Mokshantsev, K.B., Gornshtein, D.K., Gusev, G.S. et al. Tektonicheskoe stroenie Yakutskoj ASSR [The tectonic structure of Yakut ASSR]. Moscow: Nauka Publ.; 1964. 240 p.
7. Shesternev D.M. Kriogipergenez i geotekhnicheskie svoystva porod kriolitozony [Cryohypergenesis and geotechnical properties of permafrost rocks]. Novosibirsk: SB RAS; 2001. 266 p.
8. Zheleznyak M.N. Geotemperaturnoe pole i kriolitizona yugo-vostoka Sibirskoj platformy [Geotemperature field and permafrost in the south-eastern Siberian Platform]. Novosibirsk: Nauka Publ.; 2015. 227 p.
9. Kulaichev A.P. Metody i sredstva kompleksnogo analiza dannykh [Methods and means of complex data analysis]. Moscow: FORUM: INFRA–M; 2006. 512 p.
10. Levkovich, A.I. Metodika obosnovaniya sostava i ob'yomov inzhenerno-geologicheskikh izyskanij dlya stroitel'stva razlichnykh tipov zdaniy i sooruzhenij promyshlennogo, sel'skohozyajstvennogo i zhilishchno-grazhdanskogo naznacheniya v rajonah rasprostraneniya vechnomyozrylykh gruntov s uchyotom trebovanij proektirovaniya [Methodology for defining the scope and content of engineering-geological investigations for different types of industrial, agricultural and residential buildings and structures on permafrost with consideration of design requirements]. Moscow: Gosstroy RSFSR, NPO Stroyizyskaniya; 1989. 173 p.
11. Lomtadze V.D. Fiziko-mekhanicheskie svoystva gornykh porod. Metody laboratornykh issledovanij: Uchebnoe posobie [Physico-mechanical properties of rocks. Laboratory testing methods. Textbook]. Leningrad: Nedra; 1990. 328 p.
12. GOST 25100-2020. Grunty. Klassifikaciya [Soils. Classification]. Moscow: Standartinform; 2020. 38 p.
13. GOST 21135.2-84. Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom szhatii [Rocks. Methods for determining uniaxial compression strength]. Moscow: Izd-vo standartov; 1984. 7 p.
14. Posobie po proektirovaniyu osnovanij zdaniy i sooruzhenij (k SNiP 2.02.01-83) / NIIOSP im. N.M. Gersevanova Gosstroya SSSR [Guidelines for foundation design (ref. to SNiP 2.02.01-83) / N.M. Research Center of Construction, USSR Building Committee]. Moscow: Stroyizdat; 1986. 415 p.
15. Rebinder P.A. Poverhnostnye yavleniya v dispersnykh sistemah. Kolloidnaya himiya: izbrannye trudy [Surface phenomena in disperse systems. Colloid Chemistry: Selected Publications]. Moscow: Nauka; 1978. 368 p.
16. Frolov A.D. Elektricheskie i uprugie svoystva myozrylykh porod i l'dov [Electrical and elastic properties of frozen soils and ice]. Pushchino: ONTI PNTS RAN; 1998. 515 p.

Статья поступила в редакцию 26.04.2024, одобрена после рецензирования 26.05.2024, принята к публикации 20.06.2024.
The article was submitted 26.04.2024; approved after reviewing 26.05.2024; accepted for publication 20.06.2024.

Информация об авторе

Нерадовский Леонид Георгиевич

Доктор технических наук, старший научный сотрудник
лаборатории инженерной геокриологии
ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова
(ИМЗ)» СО РАН
677010 Якутск, Республика Саха (Якутия), ул. Мерзлотная, д. 36
e-mail: leoner@mpi.ysn.ru

Information about author

Leonid G. Neradovskii

Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory
of Engineering Geocryology
Melnikov Permafrost Institute SB RAS
36, Merzlotnaya St., Yakutsk, 677010, Russia
e-mail: leoner@mpi.ysn.ru