

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2023, Том 15, № 3 / 2023, Vol. 15, Iss. 3 <https://esj.today/issue-3-2023.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/21NZVN323.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Нерадовский, Л. Г. Внутренняя верификация точности вероятностной модели прочности скально-полускального основания инженерных сооружений в одном из жилых кварталов г. Нерюнгри / Л. Г. Нерадовский // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 3. — URL: <https://esj.today/PDF/21NZVN323.pdf>

For citation:

Neradovskii L.G. Internal verification of the accuracy of the probabilistic strength model of the rock-semi-rock foundation of engineering structures in one of the residential areas of Neryungri. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(3): 21NZVN323. Available at: <https://esj.today/PDF/21NZVN323.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

Считаю приятным чувством долга принести глубочайшую признательность главному инженеру А.В. Осьмушкину ООО «Нерюнгростройизыскания» за доброжелательное отношение к нуждам научных исследований, понимания необходимости их выполнения и предоставленную редкую в нынешнее время бескорыстную возможность работы с ценным архивным материалом инженерно-геологических изысканий по кварталу «М» г. Нерюнгри

УДК 550.379+550.85

Нерадовский Леонид Георгиевич

ФГБУН «Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова
Сибирского отделения Российской академии наук», Якутск, Россия

Старший научный сотрудник

Доктор технических наук

E-mail: L031950N@ya.ru

РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=394470

Внутренняя верификация точности вероятностной модели прочности скально-полускального основания инженерных сооружений в одном из жилых кварталов г. Нерюнгри

Аннотация. Предложен оригинальный вариант внутренней верификации точности вероятностной модели прогноза прочности массива пещаника в водонасыщенном состоянии. Верификация модели выполнена в жилом квартале «М» г. Нерюнгри, расположенного в криолитозоне Южной Якутии. Фактическим материалом верификации модели служили данные инженерно-геологических изысканий, полученных в 1984–1985 гг. и данные геофизики, полученные наземным методом дистанционного индуктивного зондирования на частоте 1,125 МГц в 2017–2018 гг. Задача верификации была решена путём сравнительного анализа значений прочности массива пещаника с устранением между ними временной разницы. Частной разницы между данными в точках скважин и общей фоновой разницы между сгруппированными данными по отдельно взятым инженерным сооружениям. По результатам сравнительного анализа было установлено в разной мере систематическое снижение по отношению к данным изысканий значений прочности массива пещаника, полученных по вероятностной модели. В целом, относительная мера фоновой разницы прочности за прошедшие почти 40 лет с начала строительства и эксплуатации инженерных сооружений составила около 40–45 %. Несмотря на такое существенное итоговое снижение прочности массив пещаника даже в прогнозируемом водонасыщенном состоянии по-прежнему относится к типу скальных грунтов средней категории прочности (25,72–65,24 МПа). Ошибки вероятностной модели в определении в таком прогнозном состоянии средних значений прочности массива пещаника в благоприятных условиях строительства и эксплуатации

инженерных сооружений не превышают 15 %. В сложных неблагоприятных условиях с появлением в массиве песчаника воды, тектонических зон дробления и трещиноватости, малопрочных прослоев и слоёв углистых аргиллитов, алевролитов с пластами каменных углей, а также высокотемпературной прерывисто островной мерзлоты ошибки модели существенно повышаются, но не превышают ± 30 %. Такой уровень точности модели близок к предельно допустимой по ГОСТ 21135.2-84 точности лабораторного определения временного предела прочности образцов скально-полускальных грунтов на одноосное сжатие, равной ± 20 %.

Ключевые слова: квартал «М»; инженерные сооружения; инженерно-геологические изыскания; массив песчаника; прочность; прогноз водонасыщенное состояние; метод дистанционного индуктивного зондирования; вероятностная модель; верификация; ошибки модели

Введение

В общем случае под вероятностной моделью понимают визуальный в виде графика и аналитический в виде уравнения образ нечётких и неоднозначных одномерных или многомерных вероятностных отношений между любыми характеристиками. С одной стороны прямых и физически обусловленных причинно-следственной отношений, математически описываемых разными уравнениями корреляционной связи. С другой стороны обратных физически нереальных, но формально наблюдаемых отношений, которые также описываются математическими функциями в виде уравнений регрессионной связи.

В настоящей статье речь идёт о вероятностной модели регрессионной связи геолого-геофизических характеристик. Со стороны геофизики это — мера затухания¹ в массиве песчаника гармонического поля высокочастотного вертикального магнитного диполя (ВВМД), а со стороны геологии — временной предел прочности лабораторных образцов песчаника в водонасыщенном состоянии (значения R_c в МПа).

Такая вероятностная модель (далее, модель) была ранее построена по данным метода дистанционного индуктивного зондирования (ДИЗ) и лабораторным данным применительно для инженерно-геологических условий г. Нерюнгри. Особенности модели и её ошибок в решении по данным метода ДИЗ задачи прогноза прочности массива песчаника в водонасыщенном состоянии подробно рассмотрены в журнале «Криосфера Земли» [1]. Кроме внутренней верификации точности модели г. Нерюнгри², выполнена более важная в своей независимости и более высокой степени объективности внешняя верификация точности модели³. Результатам этой верификации посвящена статья в журнале «Геоинформатика» [2]. В настоящей статье продолжается тема верификации с целью доказательства выдвинутой гипотезы о принадлежности модели г. Нерюнгри к классу региональных петрофизических моделей криолитозоны Южной Якутии.

¹ Значения коэффициента k в m^{-1} — показателя степенной функции, корректно и адекватно описывающей закономерное нелинейное уменьшение модуля напряжённости амплитуды вертикальной составляющей поля ВВМД на оптимальной частоте 1,125 МГц или на частотах 0,562 и 0,281 МГц.

² По собранному фактическому материалу, на основе которого была построена модель.

³ В качестве справки: это участок трассы Амуро-Якутской железнодорожной магистрали между станцией «Амга» и разъездом «Болотный». Участок протяжённостью 52 км расположен в 420–470 км от г. Нерюнгри на север в примыкании к сплошной криолитозоне Центральной Якутии. На этом участке внешней верификации модели скально-полускальным основанием насыпного полотна магистрали служит сильновыветренная осадочная порода доломит, находящаяся в мёрзлом низкотемпературном состоянии. Кроме этого, трещины доломита заполнены большим количеством глинистого материала.

Цель настоящей статьи состоит в рассмотрении вопроса внутренней верификации точности модели г. Нерюнгри более сложным и необычным путём. Идея использовать этот путь возникла в ходе работы при сопоставлении данных по прочности массива песчаника, полученных в жилом квартале «М» г. Нерюнгри по результатам геологического опробования в 1984–1985 гг. и геофизического изучения методом ДИЗ в 2017–2018 гг.

Место и фактический материал верификации модели г. Нерюнгри

Оригинальное решение задачи верификации получено в жилом квартале «М» в связи с появившейся возможностью⁴ планомерного изучения материалов инженерно-геологических изысканий, полученных в ходе застройки территории г. Нерюнгри. Выбор из 12 кварталов города квартала «М» объясняется тем, что по нему в первую очередь начался сбор фактического материала изысканий в дополнение к уже имеющемуся материалу работ методом ДИЗ. Сам квартал «М» шириной 450 м и длиной 670 м расположен в центральной части города на его наиболее возвышенной юго-западной окраине с абсолютными отметками высоты рельефа над уровнем моря равными 859–873 м.

В квартале находятся разной этажности (1–10 этажей) инженерные сооружения социально-торговой и инженерной инфраструктуры (жилые дома, детсады, школы, магазины и пр.). Местоположение квартала «М» показано на рисунке 1. Расположенные в квартале восемь инженерных сооружений 1-ой очереди застройки, по которым была сделана внутренняя верификация точности вероятностной модели г. Нерюнгри, показаны заливкой чёрного цвета на рисунке 2.



Рисунок 1. Схема квартальной застройки г. Нерюнгри. Контур чёрного цвета — жилой квартал «М» (оригинал схемы взят из Интернета в открытом доступе)

⁴ Такая редкая в настоящее время бескорыстная возможность была предоставлена главным инженером А.В. Осьмушкиным ООО «Нерюнгростройизыскания».

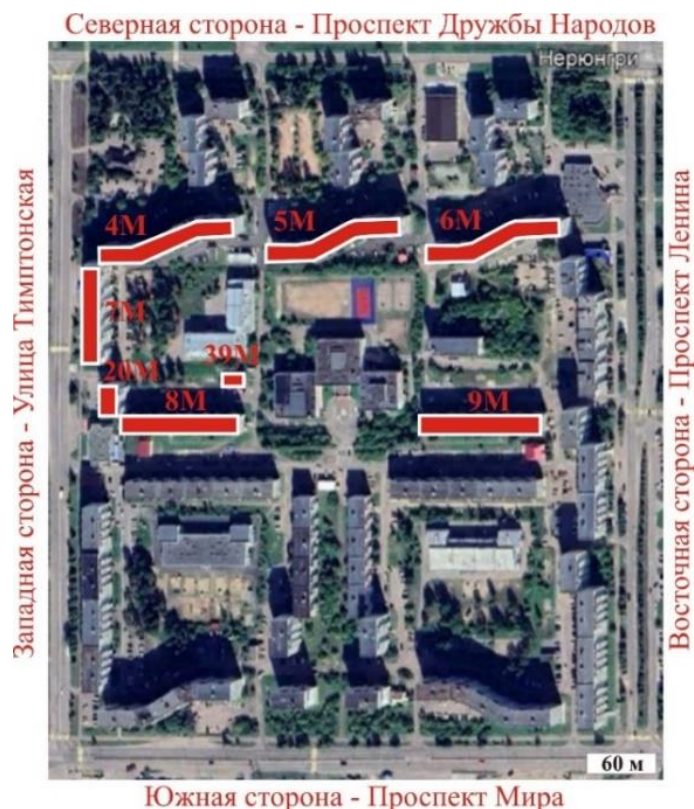


Рисунок 2. Космическое изображение застройки квартала «М». Контуры с заливкой красного цвета — инженерные сооружения 1-ой очереди застройки квартала в 1984–1985 гг. Цифры — номера проектных позиций сооружений (составлено автором)

Названия и адреса эксплуатируемых инженерных сооружений и соответствующие им номера проектных позиций приведены в таблице 1.

Таблица 1

Перечень инженерных сооружений квартала «М»

Номер позиции проектирования и адрес сооружения	Тип и назначение сооружения/кол-во скважин	Кол-во скважин
4М — пр. Дружбы Народов, 6/1	9-ти этажный жилой дом	7
5М — пр. Дружбы Народов, 8/1	9-ти этажный жилой дом	11
6М — пр. Дружбы Народов, 10/1	9-ти этажный жилой дом	9
7М — ул. Тимптонская, 1	9-ти этажный жилой дом	8
8М — ул. Тимптонская, 3/1	5-ти этажный жилой дом	6
9М — пр. Ленина, 14/корпус 1	5-ти этажный жилой дом	7
20М — ул. Тимптонская, 3	9-ти этажный жилой дом	3
39М — ул. Тимптонская, 3а	1-этажное здание лифторемонта	2

Разновременные геолого-геофизические значения R_c образцов и массива песчаника определены в квартале «М» по 53 скважинам (табл. 1).

Скважины бурились колонковым способом на стадии рабочей документации. На этой детальной стадии изысканий буровые работы выполнялось по контуру проектируемых сооружений до глубины 10–15 м и реже, глубже. Расстояние между скважинами изменялось от 20 до 50 м при среднем значении около 30 м. В процессе бурения из керна каждой скважины отбирались на разной глубине 1–5 монолитов песчаника из блоков разной прочности. Монолиты отбирались на глубине 1,0–15,5 м, но наиболее часто отбор делался в интервале глубины 5–10 м.

По отобраннным монолитам в лаборатории Южно-Якутского отделения Якутского треста инженерно-строительных изысканий (ЮЯО ЯкутТИСИЗ) готовились образцы песчаника для испытания их прочности в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии.⁵ Схема неравномерного избирательного опробования грунтовых массивов и, в частности, скально-полускального массива песчаника г. Нерюнгри была принята в НПО «Стройизыскания» Госстроя РСФСР [3] и, по-прежнему, используется изыскательскими организациями из-за её оптимальности по показателям экономичности и информативности при изучении свойств грунтов.

Интервал преимущественного геологического опробования охватывал среднюю и нижнюю часть массива песчаника, залегающего под слоем делювия-элювия четвертичного возраста в среднем на глубине 2–3 м. По данным ЮЯО ЯкутТИСИЗ средняя часть массива песчаника сложена выветренным сильнотрециноватым малопрочным песчаником, называемого «разборной скалой». В этой части массива трещины имеют экзогенную природу и ориентированы хаотично по простиранию и падению. Нижняя часть массива сложена относительно сохранным⁶ песчаником средней-высокой прочности с упорядоченной системой тектонических трещин. Эта структурно-консолидированная часть массива по данным геофизики⁷, залегает на глубине 8–17 м при среднем значении 12–13 м. По данным режимной термометрии изыскательских скважин эти значения глубины соответствует положению нижней части слоя годовых теплооборотов. В петрофизическом отношении именно здесь происходит скачок роста плотности (объёмного веса) песчаника и скорости распространения продольных и поперечных сейсмических волн.

Измерения в методе ДИЗ выполнялись весной 2017–2018 гг. с помощью аппаратуры «СЭМЗ»⁸ на оптимальной частоте 1,125 МГц в 1–2 или 3–4 азимутах. Точки метода ДИЗ располагались в доступной для азимутальных измерений незастроенной окрестности давно уже уничтоженных изыскательских скважин 1984–1985 гг. Их местоположение в квартале «М» восстанавливалось по отчётной геолого-топографической документации, в которой были точно известны расстояния скважин от углов проектируемых сооружений. На стадии рабочей документации их плановое положение уже не изменялось в ту или иную сторону. Поэтому и привязки скважин на местности можно считать достоверными.

В отличие от всего г. Нерюнгри в квартале «М» нормативные эффективные значения электрофизических характеристик массива песчаника были несколько иными. В качестве пояснения отметим, что нормативными значениями⁹ в отечественном грунтоведении принято называть средние значения, вычисленные с надлежащей степенью надёжности.

⁵ ГОСТ 21135.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. — Москва: Изд-во стандартов, 1984. — 7 с.

⁶ От действия процессов физического выветривания, включая очень сильный по своей разрушительной силе на дневной поверхности и в меньшей степени в слое годовых теплооборотов процесс криогенного метаморфизма [5; 6]. Добавим, что в высокотемпературной прерывисто-островной криолитозоне Южной Якутии мощность отмеченного слоя может быть аномально большой, достигая по разным оценкам 30–50 м.

⁷ Полученных в г. Нерюнгри методом вертикального электрического зондирования на постоянном токе (ВЭЗ) и сейсмического метода преломленных волн (МПВ).

⁸ Комплекс среднечастотной аппаратуры электромагнитного зондирования. Техническое описание. Изд-во НПО «Сибцветметавтоматика» СССР. — Красноярск, 1991. — 30 с.

⁹ Грунтоведение / Трофимов В.Т., Королёв В.А., Вознесенский Е.А., Голодковская Г.А., Васильчук Ю.К., Зиангиров Р.С. Под ред. В.Т. Трофимова. — 6-е изд., переработ. и доп. — М.: Изд-во МГУ, 2005. — 1024 с. — (Классический университетский учебник).

Вещественная часть комплексной диэлектрической проницаемости для начального разноса¹⁰ 5–10 м составляла 5,1 отн. ед., а для конечного разноса 30–50 м уменьшалась до 4,2 отн. ед. Электрическое сопротивление при таких же разносах изменялось сильнее от 506 до 1 564 Ом·м. При отмеченных значениях электрофизических характеристик, разносе и частоте прочность массива песчаника изучалась в среднем на глубине от 4,7–7,1 до 13,7–14,3 м. С округлением от 5–7 до 14 м.

Максимальная относительная разница положения по глубине верхней и нижней границ среднего интервала геофизического опробования прочности массива песчаника в сравнении с наиболее часто повторяющимся интервалом геологического опробования одинакова и равна 33,3 %. Это означает, что методы ДИЗ и бурения скважин в разное время изучали прочность массива песчаника практически в одном и том же интервале глубины с разницей по верхней и нижней границам не более 2–4 м соответственно. Из этого в свою очередь следует, что поставленная задача внутренней верификации точности вероятностной модели г. Нерюнгри в большинстве случаев решалась корректно в квартале «М». Причём, сопоставление значений прочности сделано для наиболее важной в строительно-эксплуатационном отношении части массива песчаника с сохранившейся от действия процессов выветривания блочно-ячеистой и трещинно-жильной структурой, на которую устанавливался ленточный или ленточно-столбчатый фундамент инженерных сооружений.

Сравнительный анализ прочности

Сравнительный анализ прочности массива песчаника в квартале «М» сделан в точках скважин между данными инженерно-геологических изысканий 1984–1985 гг. и данными метода ДИЗ в 2017–2018 гг. Для решения задачи сравнения существовало 4 варианта.

Первый вариант допускал сравнение прочности массива песчаника по данным метода ДИЗ с отдельно взятыми на разной глубине лабораторными данными. Во втором варианте сравнение данных ДИЗ выполнялось со среднеарифметическими лабораторными значениями прочности, вычисленных по совокупности единичных лабораторных определений в интервале глубины опробования массива песчаника. В совокупность таких осреднённых определений входили и те редкие точки скважин, в которых опробование прочности массива песчаника было сделано на какой-либо одной глубине. В третьем варианте данные метода ДИЗ сравнивались с разноглубинными средневзвешенными лабораторными значениями R_c . Весом доверия в этом случае являлась мощность той части блока массива¹¹, из которой геологом-коллектором был взят монолит на лабораторное определение прочности. В четвёртом варианте, являющимся уточнённым модифицированным третьим вариантом, сравнивались данные ДИЗ со средневзвешенными послойными нормативными значениями прочности массива песчаника в пределах единых для всей изученной площади 1-ой очереди застройки квартала «М» инженерно-геологических элементов (ИГЭ № 9–11), которые были выделены в результате комплексной классификации фактического материала.

Из 4-х возможных вариантов сопоставления разновременных значений прочности изученного массива песчаника был выбран первый вариант. С точки зрения соблюдения правила корректности в сопоставлении объёмно-точечных значений R_c этот вариант менее пригоден нежели четвёртый вариант для формально правильной верификации вероятностной

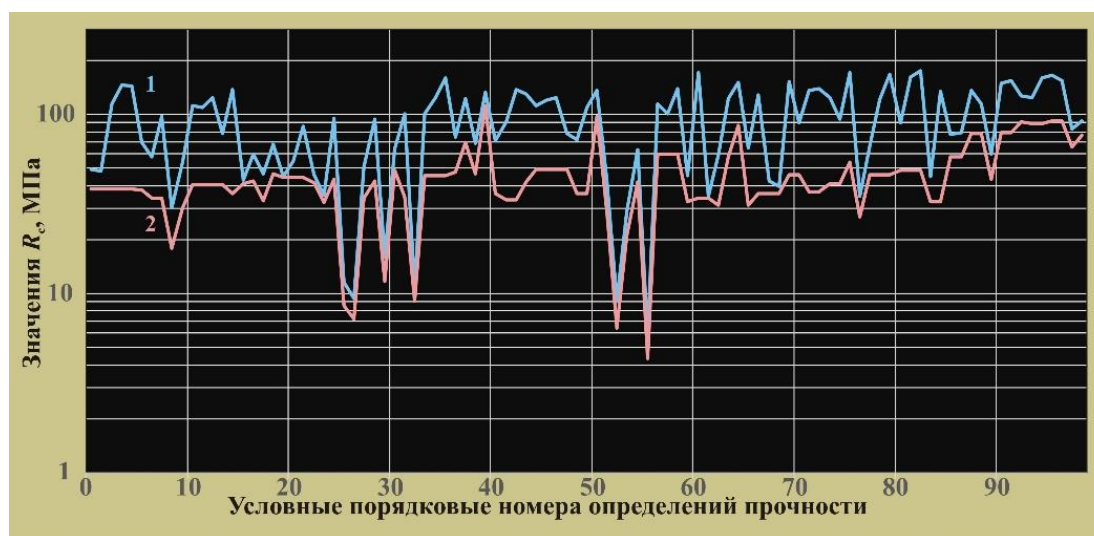
¹⁰ Расстояние между передающей (излучающей первичное поле ВВМД) антенной и приёмной антенной, в точке расположения которой измерялось суммарное первичное и вторичное поле ВВМД, образовавшееся от вихревых токов индукции в массиве песчаника.

¹¹ Его строение, состав и состояние подробно описаны в геологических колонках паспортов скважин.

модели. Однако достоинством первого варианта служит возможность более тонкого изучения вероятностного распределения ошибок модели в намеренном допущении усиления действия случайных факторов. При таком подходе возрастает объективность результата решения верификации модели, что гораздо важнее стремления к улучшению оценок точности модели. Более того, в отличие от четвертого варианта первый вариант даёт более быстрое решение верификации модели на всём, а не на усечённом фактическом материале.

Обратимся к результатам разновременного геолого-геофизического сравнения по первому варианту прочности массива песчаника в квартале «М».

Поисковый предварительный статистический анализ установил, что в подавляющем большинстве случаев данные геофизики в разной мере занижены по отношению к геологическим данным. Эта закономерность систематического занижения удостоверяет, что за почти 40 лет, прошедших со времени начала изысканий, строительства и последующей эксплуатации инженерных сооружений прочность их скально-полускального основания в квартале «М», уменьшилась. В единичных случаях прочность практически не изменилась (снизилась на 3–5 %) или напротив, сильно изменилась, превышая 80 %. В редких случаях с вероятностью около одного процента прочность по данным метода ДИЗ оказалась аномально высокой в сравнении с лабораторными данными, кардинально нарушая доминирующую по всей площади квартала «М» физически обусловленную закономерность временного снижения прочности. Во избежание этого нарушения такие аномальные по величине и встречаемости нетипичные события были убраны из исходного фактического материала. В этом отфильтрованном от «выбросов»¹² упорядоченном виде вероятностное распределение разновременных определений геолого-геофизических значений R_c массива песчаника показано на рисунке 3.



1 — по данным инженерно-геологических изысканий 1984–1985 гг.; 2 — по вероятностной модели с использованием данных метода ДИЗ, полученных в 2017–2018 гг.

Рисунок 3. Графики разновременных изменений в квартале «М» прочности массива песчаника в интервале глубины от 5–7 м до 10–14 м. Объём выборки — 99 определений (составлено автором)

¹² В математической статистике так называют максимальные и минимальные значения на концах ряда значений вероятностных распределений, выходящие за границы 95-ти или 99-ти процентного доверительного интервала.

Площадная изменчивость геолого-геофизических значений R_c в квартале «М» (рис. 3) показана в логарифмическом масштабе по вертикальной оси. Эта картина демонстрирует неоднородное прочностное состояние тектонически нарушенного дроблённого и трещиноватого массива песчаника, находящегося в нижней части зоны физического выветривания на глубине от 5–7 до 10–14 м. Мера интегральной изменчивости прочности по данным изысканий, оцененная по коэффициенту вариации, равна 48,9 %. По данным метода ДИЗ мера изменчивости прочности меньше и составляет 44,1 %. Эти цифры свидетельствуют о том, что несмотря на прочностную неоднородность массив песчаника представляет собой консолидированное по структурным механическим связям цельное, а не разобщённое геологическое образование. Кроме того, если рассматривать, как это принято в геофизике [6], коэффициент вариации, в качестве косвенного показателя меры информативности, то метод ДИЗ в этом отношении немного уступает данным инженерно-геологических изысканий в части чувствительности к изменению прочности массива песчаника. Относительная разница по информативности всего лишь 10,3 %. Такая статистическая деталь конечно же, важна для понимания информационных возможностей метода ДИЗ в решении прогнозной задачи геомеханики касательно вероятностной оценки прочности массива песчаника. Причём, в крайне неблагоприятном для строительства и эксплуатации инженерных сооружений водонасыщенном состоянии. Подчеркнём, что такая прогнозная оценка прочности массива песчаника имеет высокую научно-производственную цену. Почему? Потому, что заранее даёт возможность рассчитать риски и рассмотреть последствия аварий и даже катастрофы местного масштаба в допущении массового перехода высокотемпературного мёрзлого и/или воздушно-сухого основания зданий и сооружений г. Нерюнгри в водонасыщенное состояние под влиянием техногенных и климатических факторов.

Таблица 2

Характеристики массива песчаника в квартале «М»

Описательная статистика	Значения R_c , МПа		Снижение прочности	
	Лаборатория	ДИЗ	%	Разы
Среднее арифметическое (САР)	92,76	45,98	42,05	2,06
Медианное среднее	93,93	42,18	44,43	1,79
Модальное среднее	112,0	38,12	-	-
Стандартное отклонение	45,37	20,26	24,61	0,91
Коэффициент вариации, %	48,91	44,06	58,52	44,17
Минимум	5,8	4,34	25,17	1,34
Максимум	175,2	111,2	80,06	5,02
Кол-во определений	99	99	99	99
Уровень надежности САР (95,0 %)	9,05	4,04	4,91	0,18

Результат сравнительного анализа (табл. 2) успокаивает. В чём же? В том, что для принятия гипотезы о возникновении техногенно-социальной катастрофы в г. Нерюнгри при переходе массива песчаника в водонасыщенное состояние частично под отдельными зданиями или повсеместно под всеми зданиями 1-ой очереди застройки квартала «М»¹³, нет никаких весомых аргументов. Несмотря на снижение прочности массив песчаника и через прошедшие почти 40 лет после вскрытия и неизбежного нарушения естественного состояния строительными работами, а также последующей и не всегда правильной эксплуатации инженерных сооружений остаётся скальным основанием.

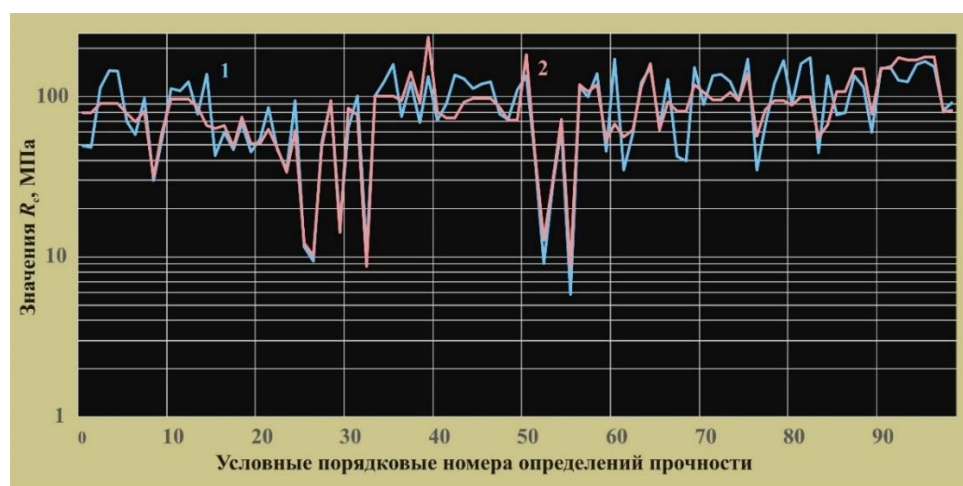
¹³ Допущение такого катастрофического события нельзя исключить, но оно крайне маловероятно с технической точки зрения и в констатации учёными факта завершения потепления климата в Якутии [8–10].

При фоновом снижении за 40 лет прочности массив песчаника на 42,05–44,43 % он в прогнозируемом по данным метода ДИЗ водонасыщенном состоянии относится по ГОСТ 25100-2020¹⁴ к средней категории прочности с нормативными значениями R_c равными 38,12–45,98 МПа (табл. 2). С вероятностью около 70 %¹⁵, единичные значения распределены в границах доверительного интервала 25,72–65,24 МПа.

Насколько точна прогнозная оценка прочности массива песчаника в водонасыщенном состоянии? Иначе говоря, какова точность вероятностной модели г. Нерюнгри, по которой эта оценка получена с использованием данных ДИЗ?

Ответ на поставленный вопрос был получен в результате устранения общего временного фона снижения прочности массива песчаника с учётом особенностей изменения по каждому инженерному сооружению. После этой операции выполнялась более тонкая операция выравнивания локальных участков вероятностного распределения с уменьшенными, но сохранившимися и вновь образовавшимися систематическими отклонениями в ту или иную сторону. Цель этой такой подгоночной операции состояла в максимально возможном приближении к равновероятному отклонению геофизических значений прочности массива песчаника в сторону завышения/занижения по отношению к лабораторным данным.

Результат кропотливой и длительной ручной интерактивной регуляризации, которая не сравнима ни с какими распиаренными современными алгоритмами так называемого «искусственного интеллекта», показан на рисунке 4.



1 — данные инженерно-геологических изысканий 1984–1985 гг.; 2 — данные метода ДИЗ 2017–2018 гг. после устранения временного фона систематического снижения значений прочности массива песчаника

Рисунок 4. Приведение к единому временному базису 1984–1985 гг. геофизических определений прочности массива песчаника в квартале «М». Объем выборки — 99 определений (составлено автором)

¹⁴ ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. — Москва: Изд-во Стандартиформ, 2020. — 38 с.

¹⁵ В точности неизвестно существовали ли в прошлом веке и существуют ли в настоящее время ведомственные документы, утверждающие необходимость применения уровня доверительной вероятности 70 % для правильной оценки результатов наземных геофизических работ. Однако из-за физических ограничений, обусловленных геологической неоднозначностью и математической некорректностью решения обратных задач в части построения физико-геологических моделей геологической среды оценивать результаты геофизики заведомо нельзя на высоком уровне доверия, равном 95 или 99 %. Исключение составляют наземные методы магниторазведки, радиометрии и скважинные метода геофизики.

Судя по рисунку 4 воспроизводимость динамики площадной изменчивости прочности массива песчаника по данным метода ДИЗ в сравнении с данными изысканий стала ещё лучше чем была до проведения отмеченной регуляризации. Об этом удостоверяет рост коэффициента параметрической корреляции от 0,614 до 0,743, в допущении линейной зависимости между значениями R_c геолого-геофизических рядов. Способность правильно передавать общие черты и детали относительной линейной или площадной изменчивости характеристик строения, состава, свойств и состояния геологических образований считается в геологическом сообществе главной и достаточной информационной ценностью наземных методов геофизики.¹⁶ Разумеется, важна и количественная сторона геофизической информации со знанием абсолютных значений геологических характеристик, но из-за сложности решения такого рода петрофизических задач с поверхности Земли эта сторона геофизики до сих пор находится в подчинённом отношении.

Другое следствие, но уже не вероятностно-статистического, а методического плана более важно в понимании того, что устранение фона систематического снижения прочности песчаника равносильно тому, как если бы работы методом ДИЗ были выполнены возле точек бурения скважин во время производства инженерно-геологических изысканий 1-ой очереди застройки квартала «М». В этом временном сближении и состоит реализация идеи внутренней верификации точности вероятностной модели г. Нерюнгри на фактическом материале квартала «М».

Ошибки вероятностной модели

Вероятностно-статистический анализ ошибок вероятностной модели г. Нерюнгри (далее, модели) выполнен с помощью программы «Стадия» [10]. Статистика частных ошибок модели, полученных в точках скважин без учёта того, где и по какому инженерному сооружению они пробурены, приведена в таблице 3. Полигоны вероятностных распределений значений ошибок показаны на рисунке 5.

Таблица 3

Точечные частные ошибки модели

Описательная статистика	Ошибки модели	
	МПа	%
Среднее арифметическое (САР)	4,55	1,57
Медианное среднее	-0,75	-2,48
Модальное среднее	-2,19	нет
Стандартное отклонение	31,13	30,09
Минимум	-101,20	-69,12
Максимум	103,38	86,79
Кол-во определений	99	99
Уровень надежности САР (95,0 %)	6,21	6,00

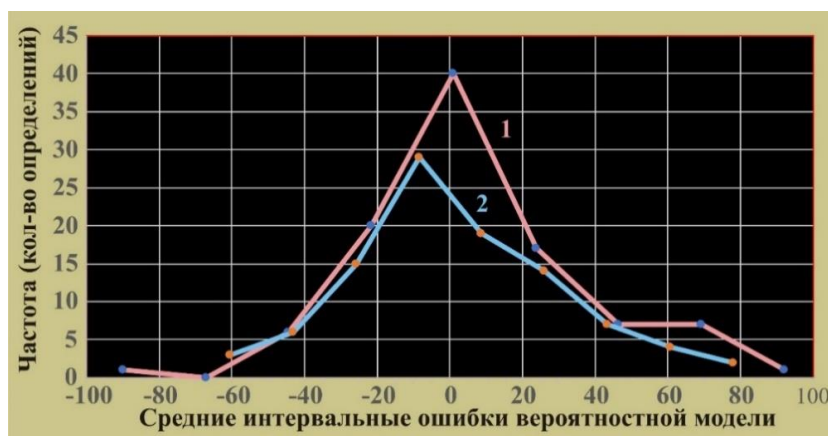
Главное внимание на рисунке 5 обратим на вероятностное распределение значений абсолютных ошибок модели г. Нерюнгри. И визуально, и по результатам тестовой проверки, сделанной по трём критериям (Колмогорова, Омега-квадрат и Хи-квадрат) распределение ошибок подчиняется теоретическому закону нормального вероятностного распределения¹⁷. В соответствии с этим законом ошибки распределены сбалансированно и равновероятно в

¹⁶ За исключением методов магниторазведки и радиометрии, в которых инструментально измеряются значения намагниченности и радиоактивности горных пород с целью прямых поисков и разведки месторождений железных и урановых руд.

¹⁷ В теории ошибок этот закон зачастую называют законом Гаусса.

окрестности нулевого среднего значения. Тем самым, подтверждается правильность выполненной процедуры по устранению фоновых компонент временного систематического снижения прочности массива песчаника между геолого-геофизическими данными. Вместе с этим подтверждением доказывается возможность применения в будущем предложенного оригинального подхода в решении задачи внутренней верификации точности модели в определении прочности массива песчаника с использованием разновременных геолого-геофизических данных. И не только на разных участках квартальной застройки г. Нерюнгри, но и за его пределами в криолитозоне Южной Якутии с одинаковым или близким геологическим строением и криогенным состоянием углеводородной толщи осадочных пород. А оно таковым является, принимая во внимание уникальную по широте комплексного охвата обобщающую работу МГУ [11], а также более специализированные в геолого-поисковом и съёмочном направлении работы В.М. Желинского, В.Н. Коробицыной, С.С. Каримовой [12; 13].

Общим для г. Нерюнгри и Южной Якутии, и это следует из вышеприведённых работ, является три основных природных черты: (1) неустойчивая во времени и сильно изменчивая по площади и глубине высокотемпературная прерывисто-островная мерзлота небольшой мощности (20–50 м); (2) преобладание песчаника в осадочной толще углеводородных пород; (3) повсеместное нарушение тектоническими процессами первоначального строения и ослабления прочности осадочных пород. Что касается относительных ошибок, то их вероятностное распределение визуально и по результатам тестирования не подчиняется теоретическому нормальному закону.



1 — абсолютные ошибки, ширина интервала 17,32 МПа; 2 — относительные ошибки, ширина интервала 22,75 %

Рисунок 5. Полигоны ошибок вероятностной модели г. Нерюнгри в определении прочности массива песчаника в прогнозируемом водонасыщенном состоянии в квартале «М». Объем выборки — 99 определений (составлено автором)

Такая особенность трансформации законов вероятностного распределения при переходе из пространства абсолютных ошибок в пространство относительных ошибок есть обычное явление в математической статистике и на него не стоит обращать особого внимания. Тем более, для рассматриваемого сложного случая разновременной внутренней верификации модели в квартале «М». Впрочем, и мера отклонения относительных ошибок от нормального закона не так уж, и велика. Наиболее часто по результатам ручного анализа фактического материала ошибки модели появляются в интервале от -17,15 до +0,17 % со средним значением -8,49 %. Это означает, что модель в среднем незначительно завышает прочность массива песчаника по отношению к лабораторным данным. Однако по результатам компьютерного анализа, сделанного с помощью программы «Стадия», нет данных по значениям рассматриваемой ошибки модального среднего (табл. 3). Если же, не обращать на этот нюанс

внимания, то ошибки модели и в относительном определении незначительны. Среднеарифметическая ошибка равна 1,57 %. Среднемедианная ошибка имеет другой знак и чуть больше (-2,58 %).

Всё вместе взятое даёт основание считать средние значения абсолютных и относительных ошибок модели практически равными нулю. Стоит заметить, что в геофизике с давних пор главное внимание уделяется знанию не абсолютных, а относительных ошибок. Значения таких ошибок модели с вероятностью 70,7 % не выходят за границы интервала $\pm 30,09\%$ (табл. 3). Такой уровень ошибок близок к ошибкам массового лабораторного определения прочности образцов скально-полускальных грунтов. Поясним, что по пункту 1.3.9 ГОСТ 21135.2-84⁵ лабораторные ошибки средней прочности, определённые с надёжностью не ниже 80,0 % по серии из шести образцов, не должны превышать $\pm 20,0\%$.

Ошибки модели становятся меньше и ближе к лабораторным ошибкам в случае оценки прочности массива песчаника не в разрозненных точках скважин, а в их упорядоченной системе. Под этим следует понимать совокупность точек расположенных в границах отдельно взятых инженерных сооружений. Применение такого локально-интегрированного подхода не только оправдано, но и важно тем, что вероятностный прогноз прочности делается избирательно с учётом целевого предназначения какого-либо выбранного инженерного сооружения¹⁸ и особенностей его текущей эксплуатации. Например, жилого дома с аварийной утечкой горячей воды из систем тепловой коммуникации или торгового центра в случае его реконструкции и т. д.

Таблица 4

Объектно-групповые ошибки модели по среднеарифметическому показателю

Проектная позиция инженерных сооружений	Число определений	Нормативные значения прочности в МПа		Ошибки модели %
		лаборатория	модель	
7М	14	88,09	80,64	8,83
20М	5	71,15	63,76	10,96
8М	9	48,11	41,95	13,68
9М	16	93,66	91,44	2,40
4М	22	86,54	81,49	6,01
5М	11	104,65	97,16	7,42
6М	20	122,94	122,38	0,54
39М	2	87,09	81,19	7,01

Таблица 5

Объектно-групповые ошибки модели по показателю медианного среднего

Проектная позиция инженерных сооружений	Число определений	Нормативные значения прочности в МПа		Ошибки модели %
		лаборатория	модель	
7М	14	87,75	83,35	5,14
20М	5	60	66,15	-9,75
8М	9	46,15	48,07	-4,08
9М	16	97,25	92,17	5,36
4М	22	89,1	71,72	21,61
5М	11	123,7	95,47	25,76
6М	20	130,5	107,73	19,12
39М	2	87,09	91,19	7,01

Результат интегрированного подхода в решении задачи внутренней верификации модели приведён в таблицах 4 и 5. Подробно рассмотрим этот результат в 2-х вариантах осреднения лабораторных и модельных значений R_c .

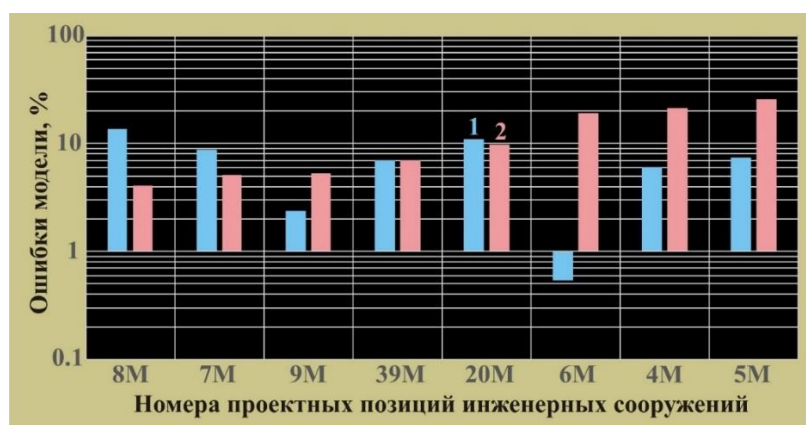
¹⁸ Как изначального проектируемого объекта гражданско-промышленного строительства.

Общим для двух вариантов осреднения является положительный знак ошибок, означающий занижение модельных нормативных значений R_c в сравнении с лабораторными значениями. Лишь в двух случаях наблюдается завышение по позициям 20М и 8М (табл. 5). Эти отклонения незначительны. Поэтому на них не будем обращать внимание и придавать им важное значение с особым смыслом. Иначе можно запутаться в деталях, нюансах статистического анализа.

Значения ошибок модели невелики и чаще всего, не превышают 10 %. Вероятность появления на позициях 20М и 8М (табл. 4) и позициях 4М–6М (см. табл. 5) ошибок выше 10 %, равна 25,0 % по среднеарифметическому показателю и 37,5 % по среднемедианному показателю.

Возникает непростой и не риторический вопрос: какому варианту осреднения отдать предпочтение в более объективной оценке точности модели прогноза прочности массива песчаника в водонасыщенном состоянии?

Первый вариант среднеарифметического осреднения привлекателен по статистике небольших ошибок модели, но к нему нужно относиться с осторожностью при работе с небольшим количеством¹⁹ определений в неоднородном по вероятностной структуре фактическом материале. Зная, что в этом материале лабораторные и модельные значения R_c ведут себя не сбалансировано около статистического центра тяжести²⁰ с образованием ложных нулевых ошибок. Такие случаи, возникают в результате непредсказуемого случайного компенсирующего или доминирующего влияния аномально высоких или низких единичных значений, оказавшихся в фактическом материале и выравнивающих нормативные геолого-геофизические значения прочностной характеристики R_c .



1 — среднеарифметические ошибки; 2 — среднемедианные ошибки

Рисунок 6. Ряды объектно-групповых ошибок вероятностной модели г. Нерюнгри в определении прочности массива песчаника в прогнозируемом водонасыщенном состоянии в квартале «М». Расшифровку номеров проектных позиций см. в таблице 1. Объем выборки — 99 определений (составлено автором)

В квартале «М» имеем дело именно с такой непредсказуемой ситуацией. Поэтому не будем обольщаться маленькими среднеарифметическими ошибками модели. Однако и игнорировать их не будем, так как в сравнении с универсальными для любого закона вероятностного распределения и надёжными среднемедианными ошибками модели они

¹⁹ Этот критерий хорошо известен: не меньше 30–50 определений.

²⁰ Так называют в математической статистике середину вероятностного распределения, возле которой сосредоточена большая часть единичных определений.

обретают существенный вес доверия. Иллюстрация такого осторожного подхода показана на рисунке 6 в виде сопоставления отсортированного в порядке возрастания значений ряда среднемедианных ошибок с подчинённым ему рядом среднеарифметических ошибок.

Первое, на что сразу же обращается внимание при рассмотрении рис. 6, это минимальная среднеарифметическая ошибка модели на позиции 6М (9-ти этажный жилой дом по пр. Дружба Народов, 10/1). Ошибка равна 0,54 % и представляет собой тот заманчивый случай, когда хочется признать ошибку, как свидетельство высокой точности модели в локально-объектном её применении. Этот соблазн исчезает в контрасте сравнения с более надёжной среднемедианной ошибкой, равной на этой же позиции 19,12 % (табл. 5). Такие же повышенные ошибки модели, равные 21,61 и 25,76 %, наблюдаются на позициях 4М и 5М, где построены и эксплуатируются 9-ти этажные жилые дома, расположенные по пр. Дружба Народов, 6/1 и 8/1 на одной проектной линии с востока на запад. По остальным позициям 7М–9М и 20М, 39М среднемедианные ошибки модели выравниваются по порядку значений со среднеарифметическими ошибками и в обоих случаях не превышают 15 %. Это и есть тот искомый предельно возможный фоновый уровень точности модели, который с вероятностью 62,5–75,0 % обеспечивает решение задачи прогноза прочности водонасыщенного массива песчаника на участках с благоприятными или условно благоприятными инженерно-геологическими условиями строительства и эксплуатации инженерных сооружений на участках проектно-изыскательских работ в квартале «М».

Повышенный фон среднемедианных ошибок модели до 19,12–25,76 % наблюдается на участках площади (позиции 7М–9М и 20М, 39М) с неблагоприятными инженерно-геологическими условиями в виде высокой степени неоднородности строения и состава массива песчаника и/или изменчивости его свойств и состояния по площади и глубине. Анализ материалов изысканий в архиве ООО «Нерюнгростройизыскания» позволил понять основные причины образования неблагоприятных инженерно-геологических условий в квартале «М» на отмеченных проектных позициях инженерных сооружений. Перечислим причины в порядке значимости влияния природных мерзлотно-грунтовых факторов на прочность массива песчаника. Это — тектоника, литология, мерзлота, вода. Непредсказуемое сочетание числа и силы разнонаправленного влияния отмеченных факторов в итоге приводит к существенному росту масштабной разницы между точечными лабораторными оценками средних значений R_c образцов песчаника и объёмными аналогичными оценками R_c по данным метода ДИЗ.

Тектонический фактор проявляет себя в виде зоны дробления и трещиноватости, пересекающей с востока на запад отмеченные площадки жилых многоэтажных домов. Литологический фактор дополняет тектонический фактор и обнаруживается по появлению в массиве песчаника разного количества малопрочных прослоев или слоёв углистых аргиллитов, алевролитов с пластами каменного угля разной мощности. Ещё одним дополнением к главной основной причине служит фактор прерывисто-островной мерзлоты, границы которой сложным и не всегда понятным образом²¹ охватывают массив песчаника, создавая в нём зоны температурных напряжений. Кроме них возникают и механические напряжения при замерзании воды в трещинах массива песчаника. Гидрогенный фактор с присутствием в блочно-ячеистой и трещинно-жильной структуре массива песчаника неравномерно распределённой атмосферной и подземной воды²² ещё более усложняет картину изменчивости прочности массива песчаника по данным метода ДИЗ и делает её максимально неоднозначной

²¹ Из-за редкой сети термометрических скважин.

²² По данным буровых работ вода появляется на разной глубине, то в одной, то в другой скважине, расположенных друг от друга на расстоянии не более 30–50 м.

и противоречивой в сравнении с данными изысканий. В отдельных редких случаях влияние какого-либо одного или всех мерзлотно-грунтовых факторов оказывается настолько сильным, что приводит к потере физической и вероятностно-статистической связи между данными метода ДИЗ и изысканий.

В максимальной мере неблагоприятные инженерно-геологические условия с сочетанием отмеченных основных природных мерзлотно-грунтовых факторов проявили себя на участке расположения 9-ти этажного жилого дома по проспекту Дружбы Народов, 8/1 (позиция 5М). Именно поэтому здесь среднемедианная фоновая ошибка модели достигла максимального значения, равного 25,76 %.

Разносторонний, хотя и далеко не исчерпывающий анализ причин снижения прочности массива песчаника в квартале «М» сделан в журнале «Научный альманах» [14].

Из всего вышеизложенного следует, что в любом варианте внутренней разновременной верификации с разумным уровнем доверия к данным метода ДИЗ, равным около 70 %, относительные ошибки модели в квартале «М» при определении средних значений R_c не превышают 30 %. Такие же по порядку значений (27,78 %) и уровне доверия ошибки были получены для центральной части г. Нерюнгри при внутренней верификации модели на фактическом материале, по которому модель была построена [1].

Заключение

Разные варианты внутренней верификации вероятностной модели г. Нерюнгри доказали пригодность её применения не только в квартале «М», но и в других кварталах г. Нерюнгри с мало чем отличающимися типичными инженерно-геологическими условиями строительства и эксплуатации зданий и сооружений гражданского и технического назначения.

Статистика удостоверяет приемлемую точность модели для решения одной из важных прогнозных задач геомеханики: определения временного предела прочности скально-полускального массива песчаника на одноосное сжатие в водонасыщенном состоянии.

В варианте разрозненных единичных определений прочности в точках ДИЗ с 1–2 или 3–4 азимутальными измерениями относительные ошибки модели в 7 из 10 случаев не превышают 30 %. В интегрированном варианте с такими же азимутальными измерениями в группах точек ДИЗ, расположенных в пределах границ отдельно взятых сооружений, фоновые ошибки модели даже в неблагоприятных инженерно-геологических условиях строительства и эксплуатации сооружений едва достигают 30 %.

В благоприятных и условно благоприятных условиях фоновые ошибки модели существенно меньше и не превышают 15 %. При такой удовлетворительной статистике предложенный автором настоящей статьи оригинальный способ внутренней верификации вероятностной модели г. Нерюнгри рекомендуется применять во всех остальных случаях²³ с разновременным определением прочности массива песчаника по данным инженерно-геологических изысканий и метода ДИЗ.

²³ В г. Нерюнгри и за его пределами на застроенных территориях Южной Якутии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нерадовский Л.Г. Вероятностная модель прогноза прочности песчаников методом дистанционного индуктивного зондирования в криолитозоне Южной Якутии (на примере г. Нерюнгри) // Криосфера Земли, 2022, т. XXVI, № 6, с. 43–57. DOI: 10.15372/KZ20220605. EDN: SJTDBR.
2. Нерадовский Л.Г. Ошибки средних оценок прочности массивов осадочных пород Южной Якутии по данным метода дистанционного индуктивного зондирования // Геоинформатика, 2023, № 1, с. 48–62. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-1-48-62>.
3. Левкович А.И. Методика обоснования состава и объёмов 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. — Москва: Госстрой РФСР. НПО Стройизыскания, 1989. — 173 с.
4. Мельников А.Е., Павлов С.С., Колодезников И.И. Разрушение пород насыпи новой железнодорожной линии Томмот-Кердём Амуро-Якутской магистрали под воздействием криогенного выветривания // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 2; URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=12945> (дата обращения: 06.02.2022). EDN: SBWMQZ.
5. Забелин А.В. Количественная оценка влияния процессов криогенного выветривания на устойчивость откосов бортов угольных карьеров Южной Якутии // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2003, № 7, с. 11–13. EDN: KXFGGJ.
6. Никитин А.А. Статистические методы выделения геофизических аномалий. — Москва: Недра, 1979. — 280 с.
7. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н. Мониторинг теплового режима грунтов Центральной Якутии. — Якутск: Изд-во ФГБУН Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН, 2021. — 156 с.
8. Шац М.М., Скачков Ю.Б. К дискуссии об основных тенденциях изменения климата Севера // Климатология, 2020, № 2(35), с. 3–18. EDN: PNLONU.
9. Скачков Ю.Б., Нерадовский Л.Г. Прогноз изменения температуры воздуха в Якутии до середины XXI века / Сборник трудов 10-ой международной конференции по мерзлотоведению TICOP: ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире. Том 3. Салехард, 25–29 июня 2012 года. — Салехард: Изд-во ООО «Печатник», 2012. С. 471–474. EDN: VSJKXN.
10. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных. — Москва: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006. — 512 с.
11. Южная Якутия: мерзлотно-гидрогеологические и инженерно-геологические условия Алданского горнопромышленного района / Под ред. В.А. Кудрявцева. — Москва: МГУ, 1975. — 444 с.
12. Желинский В.М., Коробицына В.Н., Каримова С.С. Мезозойские отложения и генетические типы угольных пластов Южной Якутии / Отв. ред. А.К. Матвеев. — Новосибирск: Изд-во «Наука», 1976. — 126 с., 22 п. ил.

13. Желинский В.М. Мезозойская угленосная формация Южной Якутии / Отв. ред. А.К. Матвеев. — Новосибирск: Изд-во «Наука». Сиб. отд-ние, 1980. — 119 с.
14. Нерадовский Л.Г. Снижение прочности оснований инженерных сооружений в криолитозоне Южной Якутии (на примере квартала «М» в г. Нерюнгри) // Научный альманах, 2023, № 3–2(101), с. 119–131.

Neradovskii Leonid Georgievich

Melnikov Permafrost Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

E-mail: L031950N@ya.ru

RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=394470

Internal verification of the accuracy of the probabilistic strength model of the rock-semi-rock foundation of engineering structures in one of the residential areas of Neryungri

Abstract. An original variant of internal verification of the accuracy of the probabilistic model for predicting the strength of a stove-pit massif in a water-saturated state is proposed. The model was verified in the residential quarter «М» of the city of Neryungri, located in the permafrost zone of South Yakutia. The actual material for verifying the model was the data of engineering and geological surveys obtained in 1984–1985. and geophysics data obtained by ground-based remote inductive sensing at a frequency of 1.125 MHz in 2017–2018. The verification problem was solved by comparative analysis of the strength values of the sandstone massif with the elimination of the time difference between them. The partial difference between the data at well points and the total background difference between the grouped data for individual engineering structures. Based on the results of a comparative analysis, a systematic decrease in the values of the strength of the sandstone massif obtained by a probabilistic model was found to varying degrees in relation to the survey data. In general, the relative measure of the background decrease in strength over the past almost 40 years since the beginning of the construction and operation of engineering structures was about 40–45 %. Despite such a significant final decrease in strength, the sandstone massif, even in the predicted water-saturated state, still belongs to the type of rocky soils of the medium strength category (25.72–65.24 MPa). The errors of the probabilistic model in determining in such a predictive state the average values of the strength of the sandstone massif under favorable conditions for the construction and operation of engineering structures do not exceed 15 %. Under complex unfavorable conditions, with the appearance of water in the sandstone massif, tectonic zones of crushing and fracturing, low-strength interlayers and layers of carbonaceous mudstones, siltstones with coal seams, as well as high-temperature discontinuous insular permafrost, model errors increase significantly, but do not exceed ± 30 %. This level of accuracy of the model is close to the maximum permissible accuracy according to GOST 21135.2-84 of laboratory determination of the temporal tensile strength of samples of rocky-semi-rocky soils for uniaxial compression, equal to ± 20 %.

Keywords: quarter «М»; engineering structures; engineering and geological surveys; sandstone massif; strength; forecast water-saturated state; remote inductive sensing method; probabilistic model; verification; model errors