

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

2023, Том 15, № 4 / 2023, Vol. 15, Iss. 4 <https://esj.today/issue-4-2023.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/02NZVN423.pdf>

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Нерадовский, Л. Г. Аprobация и верификация за пределами г. Нерюнгри вероятностной модели прогноза прочности осадочных пород / Л. Г. Нерадовский // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 4. —

URL: <https://esj.today/PDF/02NZVN423.pdf>

For citation:

Neradovskii L.G. Approbation and verification outside the city of Neryungri of a probabilistic model for predicting the strength of sedimentary rocks. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(4): 02NZVN423. Available at:

<https://esj.today/PDF/02NZVN423.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

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://elibrary.ru/author_profile.asp?id=394470

**Аprobация и верификация за пределами
г. Нерюнгри вероятностной модели прогноза
прочности осадочных пород**

Аннотация. Решена сложная задача внешней аprobации и верификации вероятностной модели г. Нерюнгри за его пределами в 572 км на северо-восток в сторону столицы Республики Саха (Якутия) г. Якутска. Аprobация модели выполнена на станции «Кюргеллях», расположенной на участке «Беркакит-Томмот-Якутск» трассы Амуро-Якутской железнодорожной магистрали. Участок отличается сложными мерзлотно-грунтовыми условиями. Это и мерзлота, и переслаивание осадочных пород (доломитов, известняков), и тектонические разрывные нарушения в виде зон дробления, трещиноватости, и образовавшиеся по ним глубокие впадины, заполненные глинами древней коры выветривания. Всё вместе взятое образует неоднородное по строению и сильно изменчивое по прочностному и криогенному состоянию грунтовое основание инженерных сооружений станции «Кюргеллях». Изыскательскими работами и методом дистанционного индуктивного зондирования основание изучено в прогнозируемом водонасыщенном состоянии на глубине 6–12 м. Прочность осадочных пород на этой глубине непредсказуемо изменяется по площади между точками скважин. Тем не менее, в большинстве случаев (61–65 %) при случайных вариациях единичных значений прочности от 15,3 до 49,8 МПа массив осадочных пород и в прогнозируемом водонасыщенном состоянии относится к скальным грунтам средней категории прочности. Несмотря на сложные природные условия результат изучения модели г. Нерюнгри оказался успешным. Относительные шибки, по которым оценивался показатель точности модели, мало чем отличаются от нормативных лабораторных ошибок с допустимым пределом $\pm 20\%$ при массовых определениях временного предела прочности скально-полускальных грунтов на одноосное сжатие в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии. При заданном одинаковом с лабораторными опытами уровне надёжности 80 % ошибки модели не превышают $\pm 25\%$. В местах расположения тектонических разрывных нарушений, где прочность пород становится

ниже 31 МПа, единичные ошибки модели возрастают до 30–40 и 60–70 %. Вероятность появления таких событий невелика. В целом, на станции «Кюргеллях» она составляет около 12 %. Квинтэссенция результатов апробации и верификации модели г. Нерюнгри заключена в очередном подтверждении доказательства ранее выдвинутой автором настоящей статьи гипотезы о региональном статусе модели, т. е. о допустимости её применения в разных местах криолитозоны Южной Якутии. Цель применения модели по-прежнему остаётся неизменной и заключается в районировании освоенных и осваиваемых территорий Южной Якутии по категории прочности скально-полускальных грунтов.

Ключевые слова: станция «Кюргеллях»; осадочные породы; прочность; глубина; изыскания; прогноз; модель г. Нерюнгри; ошибки модели

Введение

Вероятностная модель представляет собой визуально-аналитический образ одномерно-многомерных нечётких и неоднозначных взаимоотношений характеристик любой природы. Визуальный образ демонстрирует в виде графиков форму изменчивости зависимой характеристики от изменчивости одной или нескольких независимых характеристик. Аналитический образ описывает количественную сторону взаимоотношений характеристик. С одной стороны — физически обусловленных прямых причинно-следственной отношений, математически описываемых уравнениями корреляционной связи. С другой стороны — физически нереальных, но формально существующих обратных отношений, которые также описываются математическими функциями, но уже уравнениями регрессионной связи. Физически обусловленные отношения характеристик представляют собой первостепенный интерес академической науки, а математически формальные отношения — интерес прикладной науки и практики, производства.

При научно-практическом применении любой вероятностной модели важнейшим вопросом является рассмотрение её местного, регионального и в редких случаях, глобального планетарного статуса в масштабе всей Земли¹. Для решения такого рода задач любая вероятностная модель должна пройти по возможности многоступенчатую апробацию и верификацию. Проще говоря, модель обязана пройти внутреннюю и внешнюю проверку точности в разных условиях её применения.

В настоящей статье речь идёт о вероятностной модели (далее, модель), построенной по результатам экспериментальных исследований в 80–90-х годах прошлого века для инженерно-геологических условий г. Нерюнгри. Модель предназначена для прогноза прочности скально-полускального основания инженерных сооружений г. Нерюнгри по данным метода дистанционного индуктивного зондирования (ДИЗ). Первая внутренняя апробация модели была сделана путём сопоставления с фактическим материалом², по которому модель была построена. Этим материалом служили лабораторные определения временного предела прочности образцов песчаника в водонасыщенном состоянии (значения R_c в МПа). Со стороны данных метода ДИЗ применялись значения меры затухания³ в массиве песчаника

¹ К таким моделям чаще всего относятся модели прогноза климата Земли, например прогноза изменения приземного воздуха или изменения мощности льда в Арктике и Антарктиде.

² В лаборатории Южно-Якутского отделения Якутского треста инженерно-строительных изысканий (ЮЯО ЯкутТИСИЗ).

³ 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.

гармонического поля высокочастотного вертикального магнитного диполя (ВВМД). Методика построения и результаты апробации модели с анализом её ошибок подробно описаны в журнале «Криосфера Земли» [1]. Результаты второй более сложной внутренней апробации модели, полученные в квартале «М» г. Нерюнгри по результатам сопоставления разновременных геолого-геофизических значений прочности образцов и массива песчаника, рассмотрены в журнале «Вестник Евразийской науки» [2]. Внешняя апробация модели выполнена за пределами г. Нерюнгри⁴. Результатам этой верификации посвящена статья в журнале «Геоинформатика» [3]. В настоящей статье продолжается тема разносторонней апробации модели г. Нерюнгри с целью доказательства или опровержения выдвинутой автором настоящей статьи гипотезы о принадлежности модели к классу петрофизических региональных моделей с помощью которой можно было бы решать задачи геомеханики мёрзлых грунтов на освоенной и осваиваемой территории Южной Якутии в районах распространения углевмещающих осадочных пород. Цель настоящей статьи — рассмотреть результаты 2-ой внешней апробации модели г. Нерюнгри за его пределами на ещё одном участке — станции «Кюргеллях» Амуро-Якутской ж/д магистрали (АЯМ).

Описание условий апробации и верификации модели

Внешняя проверка точности модели г. Нерюнгри выполнена по данным совместных инженерно-геологических изысканий ЮжЯкутТИСИЗ и ЯкутТИСИЗ, полученных в 1990–1991 гг. на площадке проектируемого жилого посёлка станции «Кюргеллях» размером 600 на 600 м². Станция расположена от административного центра Южной Якутии г. Нерюнгри на северо-восток в сторону столицы Республики Саха (Якутия) — г. Якутска. Расстояние от станции «Нерюнгри-Пассажирская» до станции «Кюргеллях» по трассе железной дороги составляет 572 км. Недалеко от станции (около 12 км на юго-запад) расположен посёлок дорожников Улу.

В геоморфологическом отношении станция «Кюргеллях» находится на вершине и привершинных пологих склонах водораздела 2-х ручьёв: Орто-Тала и Аччыгый-Тала⁵. Абсолютные отметки поверхности водораздела в пределах расположения станции изменялись от 513 до 529 м.

Изыскания на площадке жилого посёлка станции «Кюргеллях» были выполнены ЯкутТИСИЗ на стадии «проект» с бурением 25 колонковых скважин до глубины 10–12 м. Буровые работы производились по квадратной сетке с расстоянием между скважинами 150 м.

По данным буровых работ скально-полускальное грунтовое основание будущих инженерных сооружений посёлка сложено морскими нижнекембрийскими осадочными карбонатными породами Олёкминской свиты. В пределах изученной на площади посёлка части этой свиты осадочные породы представлены переслаиванием доломитов с известняками, которые имеют подчинённое распространение по площади и глубине. Сверху осадочные породы покрыты слоем четвертичных и древних делювиально-элювиальных отложений. Отложения четвертичного возраста мощностью от 0,4–0,8 до 1,0–2,1 м распространены почти повсеместно и сложены суглинком с включением дресвы и гравия осадочных пород. Древние отложения точно не известного кайнозойского или палеозойского возраста состоят из

⁴ На участке АЯМ (станция «Амга» — разъезд «Болотный» длиной 52 км в 420–470 км от г. Нерюнгри на север на границе со сплошной криолитозоной Центральной Якутии. На этом участке скально-полускальным основанием АЯМ служит сильновыветренный мёрзлый доломит, находящаяся низкотемпературном состоянии с большим количеством глинистого материала.

⁵ Ручьи текут параллельно друг другу в юго-западном направлении и впадают в р. Улу.

ярко-красных, жёлтых глин и распространены в тектонических зонах разрывных нарушений. В большинстве случаев мощность слоя глин равна 1,6–2,8 м, но в примыкании к тектоническим зонам увеличивается до 4,5–8,6 м и более. Так, например, в точках скважин № 901009 и № 901014 глины вскрыты до максимальной глубины бурения 10,0 и 11,7 м соответственно. По данным метода дискретной георадиолокации с аппаратурой 17ГРЛ-1⁶ в этих точках скважин глины древней коры выветривания распространяются до глубины 24,6 и 17,4 м.

Прочность осадочных пород на площадке жилого посёлка была изучена по схеме неравномерного избирательно-точечного опробования. Схема принята в прошлом веке в НПО «Стройизыскания» Госстроя РСФСР⁷ и до сих пор применяется в проектно-изыскательских организациях. По этой схеме из керна скважин необходимо вынимать один-два монолита из каждой литологической разновидности грунта. В соответствии с этим ведомственным правилом опробование прочности осадочных пород выполнено в интервале глубины 0,8–11 м. Наиболее часто (в 73 % случаев) монолиты отбирались на глубине ниже 6 м в относительно сохранной от влияния процессов выветривания части осадочных пород. Значения R_c образцов осадочных пород, приготовленных из монолитов, определялись в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии по ГОСТ 21135.2-84⁸.

Работы методом ДИЗ производились в опытно-производственном порядке геофизиками ЮжЯкутТИСИЗ с аппаратурой «СЭМЗ»⁹ в точках скважин и между ними на разном расстоянии от 50 до 100 м. В ходе работ принимались во внимание рекомендации геофизиков ПО «Якутзолото», которые на тот период времени имели опыт работы с аппаратурой «СЭМЗ». В соответствии с рекомендациями и особенностями геологического строения площадки жилого посёлка измерения сделаны в 4-х азимутах (юг-север, восток-запад). При этом на первом этапе полевых работ (летом 1991 г.) были измерены только ортогональные составляющие эллипса поляризации поля ВВМД. Это — значения модуля амплитуды напряжённости вертикальной (H_z) и горизонтальной (H_r) составляющей, измеренные на оптимальной частоте 1,125 МГц в интервале разноса¹⁰ 5–100 м. На втором этапе работ (летом 1991 г.) на нескольких скважинах¹¹ были сделаны дополнительные параметрические измерения на частоте 1,125 и 0,281 МГц всех составляющих эллипса поляризации, необходимые для определения эффективных значений двух базовых электрофизических характеристик. Это — электрическое сопротивление (далее сопротивление) и вещественная часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости (далее, проницаемость).

⁶ Метод входил в состав инженерно-геологических изысканий на станции «Кюргеллях» вместе с методом ДИЗ и методом ДЭМП — дипольного электромагнитного профилированием, который был выполнен с прибором «ЭРА-625М» на 3-х разносам (45, 80, 190 м) и частоте 625 Гц.

⁷ 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 РСФСР. НПО Стройизыскания, 1989. — 173 с.

⁸ ГОСТ 21135.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. — Москва: Изд-во стандартов, 1984. — 7 с.

⁹ Комплекс среднечастотной аппаратуры электромагнитного зондирования. Техническое описание. Изд-во НПО «Сибцветметавтоматика» СССР. — Красноярск, 1991. — 30 с.

¹⁰ Расстояние между излучающей первичное поле ВВМД антенной и приёмной антенной, в точке расположения которой микровольтметром измерялось суммарное первичное и вторичное поле ВВМД, образовавшееся от вихревых токов индукции в массиве осадочных пород.

¹¹ В 5 точках, расположенных по углам и центру жилого посёлка равномерно охватывающих его площадь.

По результатам ретроспективного анализа определялось среднее азимутальное значение коэффициента амплитудного ослабления значений H_z в зависимости от разнosa¹² (коэффициент k). Этот коэффициент рассматривался в качестве количественной оценки меры затухания поля ВВМД в грунтовом основании жилого посёлка в некоторой окрестности скважин. Значения k служили входными данными для модели г. Нерюнгри с использованием модифицированного уравнения степенной функции [4], по которому вычислялись прогнозные значения R_c массива осадочных пород в водонасыщенном состоянии.

Несмотря на определённые на скважинах параметрические эффективные значения сопротивления и проницаемости ради научного интереса они были оценены ещё раз, но иным путём, используя данные методов ДЭМП и георадиолокации. Со стороны СЭП в качестве эффективных значения сопротивлений применялись 3-х разносные сопротивления, определённые на частоте 625 Гц. Со стороны георадиолокации применялись значения скорости распространения электромагнитной волны, вычисленные для всех инженерно-геологических элементов (ИГЭ)¹³. Это понятие и методику его выделения на основе методов математической статистики впервые предложил в 1956 г. выдающийся учёный геолог Н.В. Коломенский в соавторстве с И.С. Комаровым. Об этом редко известном факте, который сообщил В.А. Комаров, свидетельствует учебник по инженерной геологии¹⁴, а также другие работы Н.В. Коломенского, в которых он развивал идею применения ИГЭ¹⁵ [5]. Что касается обязательного применения ИГЭ в практике инженерной геологии и инженерно-строительных изысканий, то оно было официально утверждено гораздо позже предложения Н.В. Коломенского и И.С. Комарова. Сначала ГОСТ 20522-75¹⁶, затем ГОСТ 20522-96¹⁷ и наконец, в обновлённом варианте эти документы заменены на ГОСТ 20522-2012¹⁸.

Приблизительная оценка сопротивления на частоте 1,125 МГц и близкой к ней частоте 0,281 МГц сделана по понижающему коэффициенту, равному двум. Исходным материалом для его определения служили значения сопротивления, полученные методом ДЭМП на частоте 625 Гц для 3-х разносов. Первый разнос 45 м характеризовал сопротивление верхней часть массива осадочных пород до глубины до 5–6 м. Второй и третий разнос 80 и 180 м характеризовали суммарное сопротивление верхней-средней и верхней-нижней части массива до глубины 13–15 и 35–40 м соответственно.

¹² По показателю степенной функции, корректно аппроксимирующей в неоднородной анизотропной геологической среде закономерное затухание поля ВВМД в виде монотонного снижения значений H_z .

¹³ ИГЭ представляют собой важнейший интеллектуальный результат работы геологов в части обобщения и упорядочивания строения, состава и свойств грунтов по данным буровых и лабораторных работ.

¹⁴ Коломенский Н.В. Инженерная геология. Учебник для геол.-развед. техникумов. Том 2. Часть 2. — М.: Изд-во Госгеоллиздат, 1956. — 320 с.

¹⁵ Коломенский Н.В. Общая методика инженерно-геологических исследований. — Москва: Недра, 1968. — 342 с.

¹⁶ ГОСТ 20522-75. Грунты. Метод статистической обработки результатов определений характеристик. — Москва: Издательство стандартов. Издание официальное. Государственный Комитет Совета Министров СССР по делам строительства, июль 1976. — 13 с.

¹⁷ ГОСТ 20522-96. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. — Москва: ИПК Издательство стандартов. Издание официальное. Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве (МНТКС), 1997. — 24 с.

¹⁸ ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. — Москва: Стандартинформ, 2013. — 16 с.

Значение понижающего коэффициента равно двум взято из работы М.Л. Владова¹⁹. В ней приведена таблица 1.2 (с. 14) пересчёта для нескольких типов осадочных пород (песчаника, известняка и др.) значений сопротивления на постоянном токе в сопротивлении на переменном токе для частоты 75 МГц. Конечно, разница между используемыми на станции «Кюргеллях» частотами 1,125 и 0,281 МГц с табличной частотой 75,0 МГц велика. Однако её можно не учитывать, принимая во внимание существование так называемого «георадарного плато», в пределах которого в диапазоне частот 10^6 – 10^9 Гц значения электрофизических характеристик теоретически постоянно [6]. С учётом этой же особенности, на которую ссылается М.Л. Владов и М.С. Судакова²⁰ по известной в георадиолокации формуле была вычислена приблизительная оценка проницаемости для высокоомной геологической среды (начиная примерно с 1000 Ом·м и более). Запись формулы приведена ниже:

$$\varepsilon = \left(\frac{0,299}{v}\right)^2, \quad (1)$$

где: ε — проницаемость в отн. ед.; 0,299 — скорость распространения света в вакууме в м/нс; v — скорость распространения электромагнитной волны в геологической среде в м/нс в частотном диапазоне аппаратуры 17ГРЛ-1 равном 30–150 МГц.

Грунтовое основание площадки жилого посёлка станции «Кюргеллях» за исключением самой верхней части (слоя суглинка) относится к высокоомной среде, так как находится в твёрдомёрзлом состоянии с температурой в нижней части слоя годовых теплооборотов равной на глубине 10 м минус 1,5–2,5°C. Несмотря на большое количество глинистого материала в слое делювия-элювия, а также в трещинах, кавернах и карстовых полостях осадочных пород при такой температуре сопротивление на частоте 625 Гц изменяется от 100–400 до 1000–3600 Ом·м. С учётом вышеприведённого понижающего коэффициента средневзвешенное²¹ значение сопротивления на частоте 1,125 МГц приблизительно оценивается в 1469 Ом·м.

Высокому сопротивлению мёрзлых осадочных пород соответствует низкое удельное затухание энергии электромагнитной волны. Для ИГЭ № 9–13, классифицирующих массив осадочных пород разной литологии, трещиноватости, кавернозности, размягчаемости и заглинизированности удельное затухание изменяется от 1,71 до 3,22 дБ/м при среднем значении 2,15 дБ/м. В мёрзлых льдистых и плотных глинах древней коры выветривания, заполняющих узкие и глубокие линейно вытянутые понижения в осадочные породы, удельное затухание возрастает, но незначительно — до 2,27–3,69 дБ/м.

В отличие от высокого сопротивления, обусловленного фактором плотности, льдистости и температуры, проницаемость более зависит от фактора глинистости. Поэтому в глинистых делювиально-элювиальных отложениях и присутствия большого количества глинистого материала в открытых трещинах осадочных пород наблюдается не типичная для мёрзлых образований пониженная скорость распространения электромагнитной волны. Групповые средние медианные значения скорости в слое древнего делювия-элювия и массиве осадочных пород равны 0,083 и 0,095 м/нс. Подставляя их в формулу (1), получим соответствующие групповые средние значения проницаемости, равные 13,06 и 9,97 отн. ед. Общая средняя оценка проницаемости для всего мёрзлого частично глинистого и в большей степени скально-полускального массива осадочных пород равна 10,87 отн. ед.

¹⁹ Владов М.Л. Георадиолокационные исследования по автодорогам. Учебное пособие. — Тверь: Изд-во ГЕРС, 2012. — 192 с.

²⁰ Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация: от физических основ до перспективных направлений. Учебное пособие. — Москва: Изд-во ГЕОС, 2017. — 240 с.

²¹ По интервалам глубины изучения методом СЭП грунтового основания станции «Кюргеллях».

При использовании частоты 1,125 МГц и знании эффективных значений сопротивления и проницаемости интервал разноса для определения по графикам H_z значений коэффициента k подбирался таким образом, чтобы приблизить глубину изучения прочности массива осадочных пород к глубине геологического опробования прочности массива осадочных пород. Таким интервалом разноса оказался интервал 5–50 м. Он соответствовал глубине изучения прочности массива методом ДИЗ равной 6,2–12,2 м. Если обратиться к результатам параметрических определений на скважинах средних эффективных значений сопротивления (845 Ом·м) и проницаемости (6,34 отн. ед.) на частоте 1,125 МГц, то при таком же подобранном разносе 5–50 м массив осадочных пород изучался бы методом ДИЗ на глубине 5,7–10,8 м. Напомним, что по данным изыскательских работ опробование прочности массива выполнено преимущественно на глубине 6–11 м.

Из сопоставления полученных данных приходим к трём выводам.

Во-первых, в случаях необходимости (недостатка времени, недостаточной квалификации инженерно-технического персонала, участвующих в полевых работ методом ДИЗ, или по иным причинам) можно не выполнять трудоёмкие измерения всех составляющих эллипса поляризации поля ВВМД и по ним не оценивать сложным и трудоёмким ручным путём без использования компьютерной техники эффективные значения сопротивления и проницаемости грунтово-геологической среды. Всё это можно заменить более простым косвенным путём, используя данные метода георадиолокации и метода электромагнитного профилирования.

Во-вторых, не столь большая вариативность приблизительных²² общих средних оценок сопротивления от 1469 до 845 Ом·м и проницаемости от 10,87 до 6,34 отн. ед., полученных разными путями (по эллипсу поляризации и без него) практически не изменяет глубины изучения методом ДИЗ прочности массива осадочных пород.

В-третьих, практически равный интервал изучения прочности осадочных пород по данным изысканий и геофизики создаёт благоприятные предпосылки для корректного сопоставления этих данных и последующего решения поставленной задачи апробации и внешней верификации модели г. Нерюнгри по показателю точности в совершенно иных и более сложных инженерно-геологических условиях на ещё незастроенной станции «Кюргеллях» в отличие от застроенной территории г. Нерюнгри.

Сравнительный анализ прочности

Сравнительный анализ прочности массива осадочных пород между данными изысканий и метода ДИЗ сделан по 34 скважинам. Из 25 скважин, пробуренных на площадке посёлка станции «Кюргеллях», были убраны две скважины (№ 901009 и № 901014), в которых не были отобраны монолиты пород на лабораторной оценке средней прочности из-за большой мощности глинистых отложений во впадинах древней коры выветривания, превышающей глубину бурения скважин 10,0–11,7 м. К оставшимся скважинам 23 скважинам были прибавлены 11 скважин, расположенных на других соседних объектах станции «Кюргеллях». Такая избирательность в формировании более полной по количеству определений выборочной совокупности фактического материала имела цель снизить возможное искажающее влияние единичных экстремальных значений (максимальных и/или минимальных) на результат верификации модели г. Нерюнгри.

²² Точные оценки могут быть получены только по образцам пород в лабораторных условиях и отчасти при электрическом каротаже скважин.

В целях уменьшения масштабной разницы между объёмными и точечными геолого-геофизическими оценками прочности осадочных пород лабораторные значения R_c корректировались путём вычисления по каждой скважине средневзвешенные значения R_c с учётом мощности блоков осадочных пород в пределах выделенных по совокупности геологических признаков границ ИГЭ № 9–13. Такая непростая трудоёмкая операция повышала вес доверия к результату сравнительного анализа, а значит, и к решению задачи внешней апробации модели г. Нерюнгри за его пределами.

Рассмотрим по отдельности скорректированные точечные и объёмные оценки средней прочности осадочных пород в водонасыщенном состоянии по данным изысканий и метода ДИЗ с использованием модели г. Нерюнгри.

Изыскательская оценка прочности

Гистограмма вероятностного распределения значений R_c показана на рисунке 1. Описательная статистика значений R_c осадочных пород представлена в таблице 1.

При рассмотрении рис. 1 видна несбалансированность распределения лабораторных значений прочности, что даёт основание сделать вывод о несоответствии этого частного распределения общему теоретическому закону нормального вероятностного распределения.

Строгая тестовая проверка, сделанная с помощью программы А.П. Кулаичева «Стадия» [7] по трём независимым критериям Колмогорова, Омега-квадрат и Хи-квадрат, опровергает ошибочно сделанный визуальный вывод. Благодаря этому появляется возможность для небольшой по количеству определений выборки фактического материала правильно оценить вероятностную оценку прочности по среднему арифметическому показателю.

Статистика свидетельствует, что его значение с доверительной вероятностью 95,0 % равно $46,6 \pm 7,1$ МПа. На этом прочностном фоне единичные значения R_c изменяются от 14,3 до 95,5 МПа и в большинстве случаев (около 70 %) сосредоточены в интервале 26,2–67,0 МПа (табл. 1). За исключением одного случая (скважина № 901015, в которой R_c равно 14,3 МПа) опробованный массив осадочных пород по данным изысканий относится к скальным грунтам. Причём, среди них по ГОСТ 25100-2020²³ доля грунтов средней прочности с интервальными значениями 15–50 МПа максимальна и составляет 61,7 %.

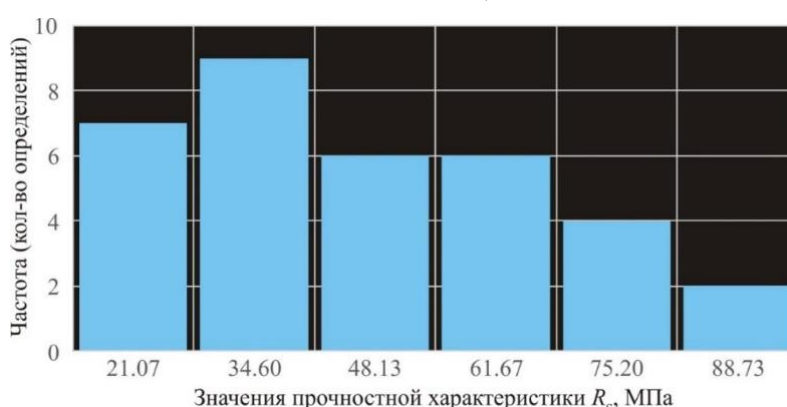


Рисунок 1. Гистограмма вероятностной изменчивости на станции «Кюргеллях» средневзвешенных лабораторных значений прочности водонасыщенных образцов осадочных пород. Объём выборки — 34 определения (составлено автором)

²³ ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. — Москва: Изд-во Стандартиформ, 2020. — 38 с.

В этой доминирующей группе среднее медианное значение R_c равно 42,2 МПа. В оставшейся группе прочных грунтов (50–120 МПа) средние медианные значения равны 67,9 МПа.

Из рассмотренной статистики следует, что по данным лабораторных опытов опробованный массив осадочных пород при временном недлительном замачивании водой, хотя и размягчается, но сохраняет запас прочности и не переходит в категорию нескальных грунтов с пониженной и низкой прочностью. Конечно, такой переход возможен в единичных случаях, но в целом, вероятность появления такого события на площадке жилого посёлка станции «Кюреллях» оценивается по изученному фактическому материалу в три процента.

Таблица 1

Прочность образцов доломитов, известняков по данным изысканий на глубине 6–11 м

<i>Описательная статистика</i>	<i>Значение R_c в МПа</i>
Среднее арифметическое (САР)	46,6
Медианное среднее	41,9
Модальное среднее	65,5
Стандартное отклонение	20,4
Коэффициент вариации, %	43,8
Минимум	14,3
Максимум	95,5
Кол-во определений	34
Уровень надежности САР (95,0 %)	7,1

Оценки прочности по модели г. Нерюнгри

Вероятностные оценки сделаны в 2-х вариантах. Первый вариант охватывает изменчивость прочности массива осадочных пород в прогнозируемом водонасыщенном состоянии в границах сопряжения с интервалом геологического опробования на глубине от 5,7–6,2 до 10,8–12,2 м. Во втором варианте изменчивость прочности изучена по данным метода ДИЗ ниже интервала геологического опробования. Для решения этой интересной задачи прогноза применялась частота 0,281 МГц, разнос 10–60 м и предположительно неизменные средние эффективны значения сопротивления и проницаемости. При таких параметрах индукционного зондирования прочность массива осадочных пород была изучена на эффективной глубине 12,3–27,5 м. Добавим, что по данным георадиолокации при использовании средневзвешенной скорости распространения электромагнитной волны равной 0,117 м/нс, массив осадочных пород, не затронутый процессами физического выветривания залегает на глубине 27–32 м. Возможно, что до этой глубины распространяется и нижняя граница слоя годовых теплооборотов. Гистограмма изменчивости на этой глубине прочности доломитов и известняков показана на рисунке 2.

Первый вариант. По данным тестовой проверки [7] вероятностная изменчивость прочности на рисунке 2 описывается теоретическим законом нормального распределения со средним арифметическим значением 44,86 в доверительном 95-ти процентном интервале 37,64–52,08 МПа. Эти геофизические вероятностные оценки средней прочности практически равны аналогичным оценкам по данным изысканий. Однако долевое соотношений категорий скальных грунтов изменилось. В сравнении с изысканиями доля грунтов прочной категории по данным ДИЗ уменьшилась с 35,3 % до 29,4 % при почти неизменной средней прочности равной 70,32 и 71,11 МПа. Напротив, небольшая доля грунтов с категорией пониженной прочности существенно увеличилась от 3,1 до 5,9 % при изменении единичных значений R_c от 14,3 до 8,8–5,1 МПа.

Статистика прочности осадочных пород по данным геофизики на сопоставимой глубине геологического опробования приведена в таблице 2. При сравнении статистик таблиц 1 и 2 обращает на себя внимание практически одинаковые значения коэффициентов вариации равных 43,8 и 46,2 соответственно. Такая близость важна тем, что свидетельствует о том, что несмотря на прочностную неоднородность массив осадочных пород представляет собой консолидированное, а не разобщённое в структурно-механических связях геологическое образование. Более того, если рассматривать, как это принято в геофизике [8], коэффициент вариации в качестве косвенного показателя меры информативности, то метод ДИЗ в этом отношении оказывается весьма чувствительным к изменению прочности массива осадочных пород даже в сложных инженерно-геологических условиях станции «Кюргеллях». Под ними понимается сочетание литологической неоднородности осадочных пород в виде переслаивания доломитов, известняков и наложенных на них разрывных тектонических нарушений с развитыми по ним линейными фрагментами древней коры выветривания.

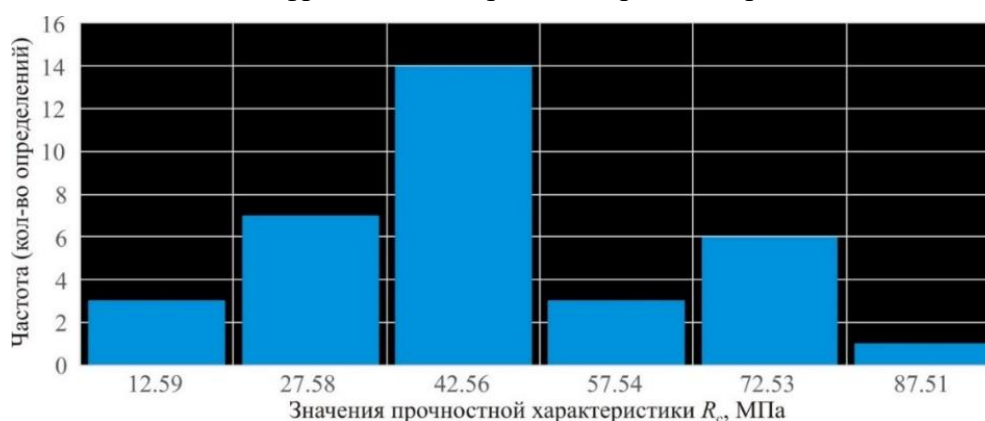


Рисунок 2. Гистограмма вероятностной изменчивости на станции «Кюргеллях» средних значений прогнозной прочности водонасыщенного массива осадочных пород на глубине от 5,7–6,2 до 10,8–12,2 м по модели г. Нерюнгри по данным метода ДИЗ. Объем выборки — 34 определения (составлено автором)

Таблица 2

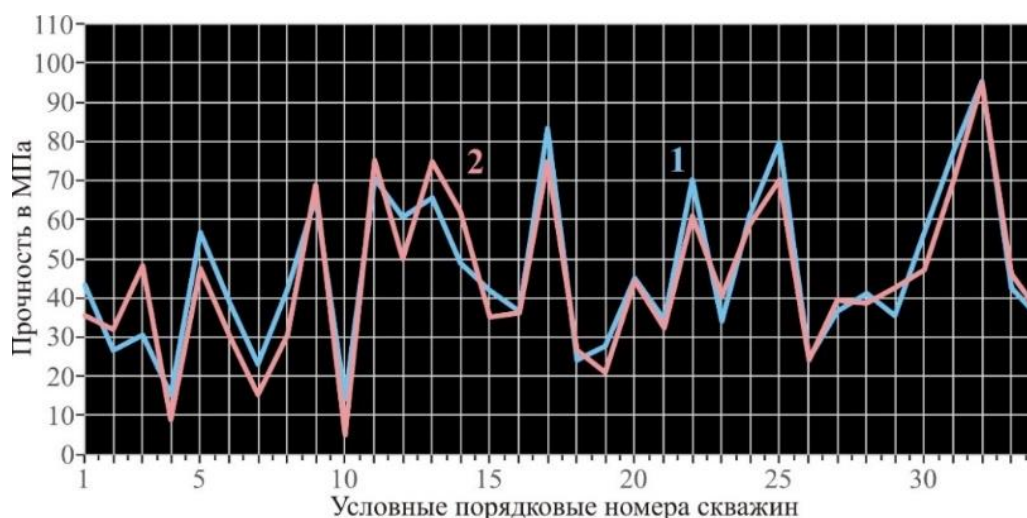
Прочность доломитов, известняков на глубине около 6,0–11,5 м по данным метода ДИЗ

Описательная статистика	Значения R_c в МПа
Среднее арифметическое (САР)	44,86
Медианное среднее	41,63
Модальное среднее	36,32
Стандартное отклонение	20,71
Коэффициент вариации, %	46,2
Минимум	5,13
Максимум	95,28
Кол-во определений	34
Уровень надежности САР (95,0 %)	7,22

Иллюстрация редко наблюдаемой при апробации вероятностных моделей высокой степени согласованной изменчивости геологических оценок средней прочности водонасыщенных образцов осадочных пород с такими же, но прогнозными оценками по данным метода ДИЗ показана на рисунок 3.

Мера вероятностно-статистической связи между выборочными геолого-геофизическими оценками, оцененная по параметрическому (линейному) коэффициенту корреляции, достигает 0,935. Это означает, что влияние фактора прочности на затухание поля ВВМД настолько

высоко, что подавляет влияние всех остальных мерзлотно-грунтовых факторов, совокупная доля которых составляет около семи процентов.



1 — по данным инженерно-геологических изысканий на глубине 6,0–11,0 м; 2 — по вероятностной модели с использованием данных метода ДИЗ на глубине около 6,0–11,5 м

Рисунок 3. Графики латерального изменения между скважинами прочности массива осадочных пород. Объём выборки — 34 определения (составлено автором)

Второй вариант

Гистограмма распределения прочности осадочных пород на глубине 12,3–27,5 м показана на рисунке 4. Статистика распределения представлена в таблице 3.

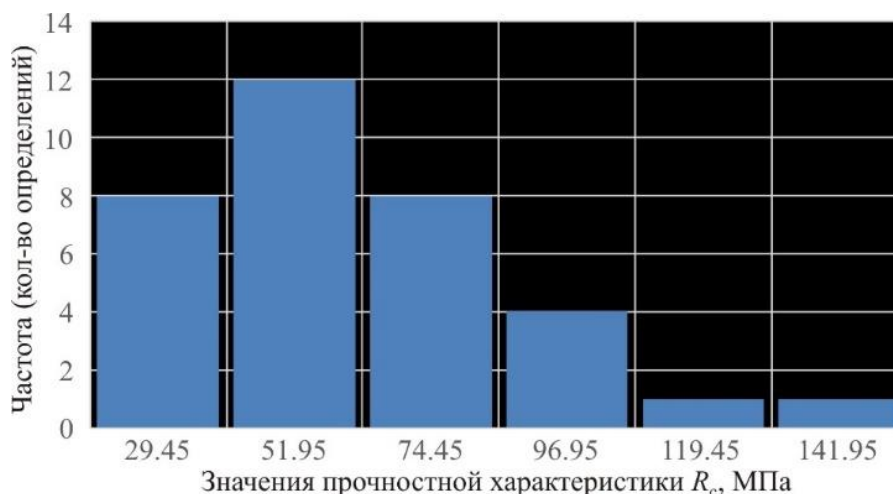


Рисунок 4. Гистограмма вероятностной изменчивости на станции «Кюргеллях» средних значений прогнозной прочности массива осадочных пород на глубине 12,3–27,5 м по модели г. Нерюнгри с использованием данных метода ДИЗ. Объём выборки — 34 определения (составлено автором)

Увеличение глубины изучения методом ДИЗ массива осадочных пород ниже глубины геологического опробования до 12,3–27,5 м по-разному отразилось на площадке посёлка станции «Кюргеллях». За исключением 4-х случаев (скважины № 910017, 901026, 910027, 910042), где значения R_c незначительно уменьшились в 1,03–1,17 раз, в остальных случаях значения R_c выросли, но по-разному. При изменении единичных значений роста прочности от 1,05 до 4,14 раз среднее медианное значение роста составило 1,39 раз. То есть по отношению к

начальной или базовой прочности геолого-геофизического опробования в интервале около 6–12 м рост прочности на глубине около 12–27 м в целом, на станции «Кюргеллях» оказался существенным и составил почти 40 %.

Таблица 3

Прочность доломитов, известняков на глубине 12,3–27,5 м по данным метода ДИЗ

Описательная статистика	Значения R_c в МПа
Среднее арифметическое (САР)	61,08
Медианное среднее	51,35
Модальное среднее	Нет
Стандартное отклонение	30,49
Коэффициент вариации, %	49,9
Минимум	18,2
Максимум	153,2
Кол-во определений	34
Уровень надежности САР (95,0 %)	10,64

Распределение значений R_c на обозначенной глубине по данным тестовой проверки [7] удовлетворяет теоретическому закону нормального вероятностного распределения. В соответствии с этим законом единичные значения прочности изменяются от 18,2 до 153,2 МПа и ведут себя сбалансированно. С равной вероятностью они встречаются в окрестности среднего арифметического значения 61,08 МПа, заключённого в 95-ти процентном доверительном интервале 50,44–71,72 МПа. Судя по максимуму гистограммы значения R_c наиболее часто встречаются в интервале 40,7–63,2 МПа со средним значением 51,95 МПа (рис. 4). Доля скальных грунтов прочной категории увеличилась до 50,0 % и сравнялась с долей грунтов средней категории прочности. Групповые средние медианные значения R_c по этим категориям составляют 41,1 и 79,0 МПа.

Несмотря на хаотичное изменение в отдельных точках скважин и ДИЗ роста прочности по глубине в этом, казалось бы, чисто случайном процессе, при его рассмотрении в масштабе всей станции «Кюргеллях» отчётливо выделяется трендовая составляющая. Она адекватно описывается экспоненциальной функцией с приведённым значением множественного коэффициента детерминации $R^2 = 0,716$ нелинейную связь средних показателей прогнозной прочности осадочных пород на глубине 12,3–27,5 м с фактически установленной прочностью на глубине геологического опробования, т. е. по данным изысканий. Ниже приводится уравнение экспоненциальной функции:

$$y = 20,662 * \exp^{0,0207*x}, \quad (2)$$

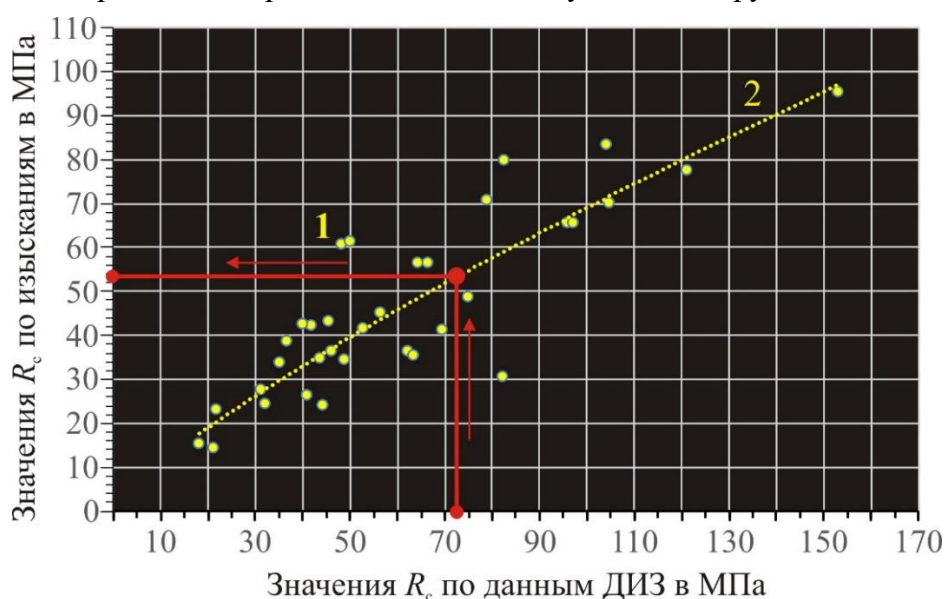
где, y — прогнозные значения R_c массива осадочных пород в МПа на глубине 12,3–27,5 м; x — тоже, на глубине 6,0–11,0 м по данным изыскательских работ с использованием интегральных оценок прочности трещиноватых блоков доломитов и известняков по ИГЭ № 9–13.

Уравнение (2) рекомендуется применять в сходных или близких мерзлотно-грунтовых условиях не только на станции «Кюргеллях», но и за её пределами для решения задач инженерно-строительных изысканий в части районирования застраиваемых территорий Южной Якутии по категории прочности скально-полускальных грунтов в зоне примыкания к трассе АЯМ на участке «Беркакит-Томмот-Нижний Бестях».

Большой интерес у геологов-изыскателей может вызвать решение обратной задачи с использованием модели г. Нерюнгри. Речь идёт о существовании возможности получения по данным метода ДИЗ на частоте 0,281 МГц и разnose 10–60 м интегральной оценки прочности массива осадочных пород, полученной с учётом ИГЭ на глубине опробования массива буровыми и лабораторными работами ниже 4–6 м, но не глубже обычной глубины бурения

изыскательских скважин равной 10–15 м. Проще и быстрее решается эта задача по графику регрессионной зависимости, показанному на рисунке 5.

В качестве примера применения рисунка 5 допустим следующее предположение. Пусть где-нибудь в районе станции «Кюргеллях» по модели г. Нерюнгри с использованием данных метода ДИЗ²⁴ на глубине 12,3–27,5 м определена средняя прочность переслаивающихся доломитов и известняков равная 72 МПа. Проводя от этого значения вертикальную линию до пересечения с графиком аппроксимирующей степенной функции и далее, передвигаясь по горизонтальной линии до пересечения с осью ординат, получим приблизительное значение равное 52 МПа. Такая простейшая практика применения графического способа оценки прочности важна тем, что позволяет на любой стадии инженерно-геологических изысканий с опережением буровых работ быстро получить приблизительную, но достоверную оценку прочности массива осадочных пород в Южной Якутии. В дополнение к тем, как всегда немногочисленным данным, которые получаются в результате трудоёмкого и длительного изыскательского опробования прочности скально-полускальных грунтов.



1 — поле рассеяния фактического материала; 2 — график аппроксимирующей степенной функции

Рисунок 5. Палетка определения изыскательских оценок средней прочности массива осадочных пород на глубине 6,0–11,0 м по данным метода ДИЗ на частоте 0,281 МГц. Объём выборки — 34 определения (составлено автором)

Результат апробации модели г. Нерюнгри

Главным предметом рассмотрения результатов апробации модели являются её ошибки. В геофизике за исключением методов радиометрии и магнитометрии принято анализировать не абсолютные, а относительные ошибки и по ним оценивать точность того или иного метода геофизики. Оценим ошибки на станции «Кюргеллях» по отношению к достоверным однозначным геологическим значениям средней прочности по следующей формуле:

$$\delta = ((x_1 - x_2)/x_1) * 100, \quad (3)$$

²⁴ Значений коэффициента затухания поля ВВМД по составляющей H_z на частоте 0,281 МГц и разnose 10–80 м.

где: δ — относительная ошибка в %; x_1 — лабораторные значения прочности водонасыщенных образцов доломитов и известняков в МПа, осреднённые по ИГЭ № 9–13; x_2 — средние значения прогнозной прочности водонасыщенного массива осадочных пород в МПа, вычисленные по модифицированному уравнению степенной функции модели г. Нерюнгри [6] с использованием азимутальных данных метода ДИЗ.

Статистика ошибок приведена в таблице 4. Вероятностное распределений значений ошибок показано на гистограмме (рис. 6).

Таблица 4

Ошибки модели в определении прочности массива осадочных пород на глубине около 6,0–11,5 м в прогнозируемом водонасыщенном состоянии

Описательная статистика	Ошибки в %
Среднее арифметическое (САР)	4,83
Медианное среднее	5,03
Модальное среднее	нет
Стандартное отклонение	21,98
Коэффициент вариации, %	455
Минимум	-57,33
Максимум	64,17
Кол-во определений	34
Уровень надежности САР (95,0 %)	7,67

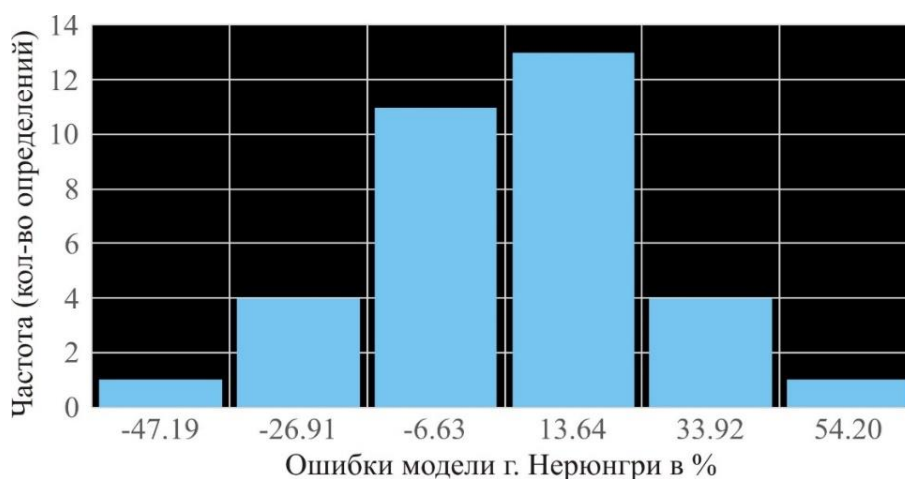


Рисунок 6. Гистограмма вероятностного распределения ошибок модели г. Нерюнгри в определении на глубине около 6,0–11,5 м средней прочности массива осадочных пород в прогнозируемом водонасыщенном состоянии на станции «Кюргеллях». Объём выборки — 34 определения (составлено автором)

Максимум гистограммы на рис. 6 указывает, что ошибки модели г. Нерюнгри с наибольшей вероятностью сосредоточены в диапазоне от -16,74 до 23,78 %. Доля таких ошибок составляет 70,6 %. Тестовая проверка показывает, что ошибки модели при широком разбросе единичных значений от -57,33 до +64,17 % распределены по теоретическому нормальному закону и в соответствии с ним равновероятным образом сосредоточены возле среднего арифметического значения 4,83 %. С вероятностью 95 % это значение находится в границах доверительного интервала от -2,84 до +12,5 %. Положительная граница интервала означает, что в целом, модель г. Нерюнгри имеет склонность занижать лабораторные значения прочности не превышая 13 %. В сопоставимости с допустимой по ГОСТ 21135.2-84 на уровне надёжности 80 % нормативной ошибкой массовых лабораторных определений средних значений R_c по шести образцам скально-полускальных грунтов равной 20 % ошибки модели не превышают ± 25 %. В этой доминирующей группе средний показатель ошибки равен 2,86 %. Если же

оценивать разброс ошибок на меньшем уровне надежности, как это и следует делать для наземных методов геофизики, принимая во внимание геологическую неоднозначность и математическую некорректность решения интерпретационных задач, то ошибки станут меньше. При уровне надёжности 70,6 % ошибки не превысят 20 % опять же при незначительном среднем значении равном 3,13 %.

Высокая точность модели г. Нерюнгри не означает, что в любом месте станции «Кюргеллях» она останется неизменной. Детальный анализ распределения ошибок между скважинами показывает, что их величина зависит от геологической оценки прочности осадочных пород. Динамика этой зависимости показана на рисунке 7.

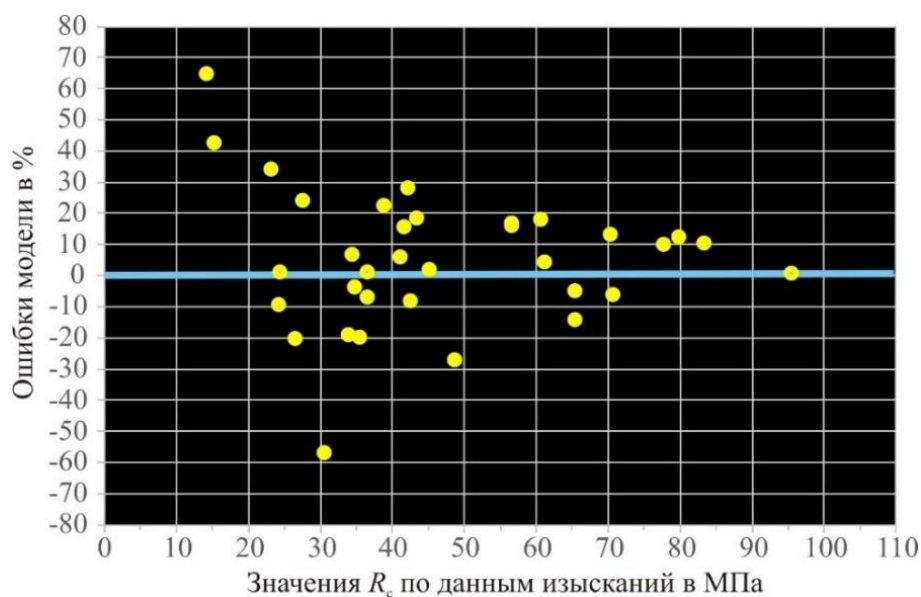


Рисунок 7. Динамика разброса ошибок модели г, Нерюнгри в зависимости от прочности массива осадочных пород. Объём выборки — 34 определения (составлено автором)

Картина разброса ошибок на рисунке 7 со всей очевидностью показывает их рост при уменьшении прочности осадочных пород. Причём, тенденция ширины разброса ошибок отличается нелинейностью и асимметричностью в сторону занижения прочности пород по модели г. Нерюнгри. С некоторой степенью неопределённости критическую черту, за которой ошибки модели становятся недопустимо большими, можно провести по значению прочности равной 31 МПа. При таком разграничении долевой расклад ошибок за критической чертой становится иным. Из восьми определений, попавших в эту область, только 4 определения соответствуют ошибкам, не превышающим $\pm 25\%$. У остальных ошибок значения превышают 30 %, достигая аномальных значений 60–70 %. Получается, что на участках станции «Кюргеллях», где в зонах тектонического дробления и трещиноватости прочность осадочных пород существенно снижена, доля недопустимых ошибок для решения задач инженерно-геологических изысканий составляет 50 %. То есть на таких участках создаётся ситуация полной вероятностной неопределённости, когда в каждом втором случае модель г. Нерюнгри будет сильно ошибаться.

Заключение

Внешняя апробация модели г. Нерюнгри выполнена на станции «Кюргеллях» участка АЯМ «Беркамит-Томмот-Нижний Бестях» в сложных инженерно-геологических условиях. Это и мерзлота, и переслаивание осадочных пород (доломитов, известняков), и тектонические

разрывные нарушения в виде зон дробления и трещиноватости, образовавшиеся по ним глубокие впадины, заполненные глинами древней коры выветривания. Всё вместе взятое образует неоднородное по строению и сильно изменчивое по прочностному и криогенному состоянию массива осадочных пород. Тем не менее, в большинстве случаев (61–65 %) изученный на глубине 6–12 м массив даже в прогнозируемом водонасыщенном состоянии по данным изысканий и метода ДИЗ в целом, соответствует скальному грунтовому основанию средней категории прочности. Прочность массива на этой глубине сильно изменяется изменяется по площади между точками скважин.

Несмотря на сложную природную обстановку результат апробации и верификации модели г. Нерюнгри оказался не только положительным, но и успешным. Относительные ошибки, по которым оценивался показатель точности модели, мало чем отличаются от лабораторных ошибок с допустимым по ГОСТ 21135.2-84 пределом в ± 20 %. При заданном одинаковом уровне надёжности 80 % ошибки модели не превышают ± 25 %. Однако в местах расположения локально-линейных зон тектонических разрывных нарушений с прочностью пород ниже 31 МПа единичные ошибки модели возрастают до 30–40 и 60–70 %. Хорошо, что вероятность появления таких огорчительных событий невелика. В целом, на станции «Кюргеллях» она составляет около 12 %.

Квинтэссенция результатов апробации и верификации модели г. Нерюнгри на станции «Кюргеллях» состоит в очередном частном подтверждении доказательства ранее выдвинутой автором настоящей статьи гипотезы о региональном статусе модели, т. е. о допустимости её применения в разных местах криолитозоны Южной Якутии. Что касается цели применения модели, то она по-прежнему неизменна и состоит в районировании освоенных и осваиваемых территорий Южной Якутии по категории прочности скально-полускальных грунтов.

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. Внутренняя верификация точности вероятностной модели прочности скально-полускального основания инженерных сооружений в одном из жилых кварталов г. Нерюнгри // Вестник Евразийской науки. — 2023. — Том 15. — № 3. — URL: <https://esj.today/PDF/21NZVN323.pdf>.
3. 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>. EDN: KYAIKS.
4. Нерадовский Л.Г. Оценка прочностного состояния скально-полускального основания инженерных сооружений г. Нерюнгри в криолитозоне Южной Якутии по данным геофизики (метода дистанционного индуктивного зондирования) // Недропользование XXI век, 2022, № 4(96), с. 91–97. EDN: GYJQML.
5. Коломенский Н.В. Некоторые проблемы развития инженерной геологии // Пути дальнейшего развития инженерной геологии / Материалы дискуссии 1-го Международного конгресса по инженерной геологии. — Москва: Изд-во МГУ, 1971, с. 36–40.

6. Ground penetrating radar theory and applications / ed, by Harry M. Jol. — Elsevier, 2009. — 523 p.
7. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных. — Москва: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006. — 512 с.
8. Никитин А.А. Статистические методы выделения геофизических аномалий. — Москва: Недра, 1979. — 280 с.

Neradovskii Leonid Georgievich

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

E-mail: L031950N@ya.ru

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

Approbation and verification outside the city of Neryungri of a probabilistic model for predicting the strength of sedimentary rocks

Abstract. The complex problem of external approbation and verification of the probabilistic model of the city of Neryungri beyond its borders, 572 km to the northeast towards the capital of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, has been solved. The model was tested at the Kyurgellakh station located on the Berkakit-Tommot-Yakutsk section of the Amur-Yakutsk railway line. The site is characterized by complex permafrost and ground conditions. These are permafrost, interbedding of sedimentary rocks (dolomites, limestones), and tectonic faults in the form of crushing zones, fractures, and deep depressions formed along them, filled with clays of the ancient weathering crust. Taken together, it forms a non-uniform in structure and highly variable in strength and cryogenic state, the soil foundation of the engineering structures of the Kyurgellakh station. By survey work and remote inductive sounding, the base was studied in a predicted water-saturated state at a depth of 6–12 m. The strength of sedimentary rocks at this depth varies unpredictably over the area between well points. However, in most cases (61–65 %), with random variations in unit strength values from 15.3 to 49.8 MPa, the sedimentary rock mass and in the predicted water-saturated state belongs to rocky soils of the medium strength category. Despite the difficult natural conditions, the result of studying the model of the city of Neryungri was successful. The relative errors used to evaluate the model accuracy index are not much different from the standard laboratory errors with an allowable limit of ± 20 % in mass determinations of the temporal strength limit of rocky-semi-rocky soils for uniaxial compression in the air-dry and water-saturated state. With a given level of reliability identical with laboratory experiments, 80 % of the model errors do not exceed ± 25 %. In the locations of tectonic discontinuities, where the rock strength becomes lower than 31 MPa, single model errors increase to 30–40 and 60–70 %. The likelihood of such events occurring is low. In general, at the station «Kyurgellakh» it is about 12 %. The quintessence of the results of approbation and verification of the Neryungri model lies in another confirmation of the proof of the hypothesis previously put forward by the author of this article about the regional status of the model, i.e. on the admissibility of its use in different places of the permafrost zone of South Yakutia. The purpose of applying the model still remains unchanged and is to zoning the developed and developed territories of South Yakutia according to the category of strength of rocky-semi-rocky soils.

Keywords: station «Kyurgellakh»; sedimentary rocks; strength; depth; exploration; forecast; Neryungri town model; model errors