

Геоинформатика. 2023. № 1. С. 48–62.
Geoinformatika. 2023;(1):48–62.

Моделирование геобъектов и геопроцессов

Научная статья
 УДК 550.370+552.08
<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-1-48-62>

Ошибки средних оценок прочности массивов осадочных пород Южной Якутии по данным метода дистанционного индуктивного зондирования

© 2023 г. — Леонид Георгиевич Нерадовский

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН; г. Якутск, Россия
 leoner@mpi.ysn.ru

Аннотация: Верифицирована вероятностная модель, построенная для инженерно-геологических условий эксплуатации инженерных сооружений г. Нерюнгри. Модель представляет собой уравнение степенной функции, связывающее регрессионными отношениями лабораторную характеристику прочности образцов мёрзлого песчаника, искусственно замоченных водой, и геофизическую характеристику меры затухания в мёрзлом высокотемпературном массиве песчаника гармонического поля высокочастотного вертикального магнитного диполя. Значения меры затухания получены по данным метода дистанционного индуктивного зондирования (ДИЗ) на частоте 1,125 МГц. Верификация модели сделана на неизменной частоте на большом удалении от г. Нерюнгри на участке трассы ж/д АЯМ. Основанием этого протяжённого инженерного сооружения служил низкотемпературный массив доломита. Статистический анализ удостоверяет, что с вероятностью 73,0% относительные ошибки вычисления по уравнению регрессии средних оценок прогнозируемой в водонасыщенном состоянии прочности массива доломита по данным метода ДИЗ не превышают 20%. При такой точности, равной точности лабораторных определений по ГОСТ 25100–2020, появляется основание рассматривать вероятностную модель как региональную с применением её в пределах Южной Якутии для прогноза в водонасыщенном состоянии прочности оснований инженерных сооружений, сложенных песчаником и доломитом. Решение этой задачи крайне важно для индустрии строительства и горного дела в современных рыночных отношениях ввиду реальной возможности перехода массивов скально-полускальных пород из мёрзлого в талое или водонасыщенное состояние под усиливающимся влиянием антропогенно-техногенных и климатических факторов.

Ключевые слова: *песчаник, доломит, прочность, метод дистанционного индуктивного зондирования, поле высокочастотного вертикального магнитного диполя, коэффициент затухания поля, вероятностная модель, ошибки прогноза.*

Для цитирования: 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>.

Modeling of geological objects and geoprocesses

Original article

Errors in average strength estimates of sedimentary rock masses in South Yakutia based on geometric induction sounding data

© 2023 — Leonid G. Neradovskii

Melnikov Permafrost Institute SB RAS; Yakutsk, Russia
 leoner@mpi.ysn.ru

Abstract: The probabilistic model developed to describe the engineering and geological conditions for the operation of buildings and infrastructure in the city of Neryungri has been verified. The model is a power-function equation which correlates, by regression relationships, laboratory-determined compressive strength of saturated frozen sandstone samples with attenuation of the high-frequency harmonic field of a vertical magnetic dipole in warm permafrost composed of sandstone. The attenuation values were obtained by geometric electromagnetic induction sounding at a frequency of 1.125 MHz. The model verification was conducted at a fixed frequency on a section of the Amur-Yakutsk Railway located at a significant distance from Neryungri. The railway here is underlain by low-temperature dolomite masses. The statistical analysis indicates that the relative errors of the dolomite saturated strength estimates from the geometric EM induction data with a 73.0% probability do not exceed 20%. With this level of accuracy close to that of laboratory tests according to GOST 25100–2020, it is reasonable to suggest that the probabilistic model can be used region-wide in southern Yakutia to predict saturated strength of foundation materials composed of sandstone and dolomite. It can provide an effective solution for market-based construction and mining industries, as increasing anthropogenic and climatic impacts are anticipated to cause thawing and saturation of sedimentary rock masses.

Key words: *sandstone, dolomite, strength, geometric EMI sounding, high-frequency vertical magnetic dipole field, attenuation coefficient, probabilistic model, prediction error.*

For citation: Neradovskii L.G. Errors in average strength estimates of sedimentary rock masses in South Yakutia based on geometric induction sounding data. *Geoinformatika*. 2023;(1):48–62. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-1-48-62>. In Russ.

Введение

Ссылаясь в обобщающей работе¹ на своих предшественников, Н.Н. Гриб пишет: «Разработка методов определения прочностных и деформационных свойств массивов — важнейшая задача геомеханики» [7, с. 25]. Думается, что эта частная формулировка имеет общий статус в геологии, горном деле, индустрии строительства и применима к решению задач инженерной геологии, мерзлотоведения, грунтоведения и геофизики криолитозоны — то есть в той обширной по своим масштабам и социально-экономической значимости области, которая содержит научно-производственные знания о механике скально-полускальных горных пород, находящихся в вечномерзлом или многолетнемерзлом состоянии и используемых как грунтовые основания или борты инженерных сооружений, например, карьеров угольных месторождений.

Обозначенный класс петрофизических задач на постоянной основе успешно решался методами сейсмоакустики в прошлом веке и продолжает решаться в настоящее время, но уже эпизодически в условиях рыночных отношений. Для решения задач применялись те же самые методы в расширенном технико-методическом исполнении. Разноплановых публикаций на эту тему много, но обзорных работ системного характера, обобщающих достаточно большой и разнообразный фактический материал, очень и очень мало. В этой почти пустой информационной нише были и, пожалуй, до сего времени остаются единственными обобщающими работами результаты исследований АО Гидропроект им. С.Я. Жука (г. Москва) и ОАО НИИ Гидротехники им. Б.Г. Веденеева (ВНИИГ, г. Санкт-Петербург) в части изучения методами инженерной сейсмики прочности и деформируемости оснований гидротехнических сооружений. Среди этих работ стоит отметить доступную в Интернете работу О.К. Воронкова [3], а также менее известные работы. Это — замечательная в своей многогранности монография А.И. Савича, З.Г. Ященко [24] и весьма ценные для решения практических вопросов рекомендации ВНИИГ [22, 23]. В число этих работ стоит включить и статью М.Л. Владова, В.В. Капустина [2]. Статья важна тем, что в ней обсуждается круг насущных проблем современного периода, тормозящих давно физически обоснованное научно-практическое развитие методов инженерной сейсмики на пути изучения свойств и состояния грунтовых массивов — то есть того пути, который с давних пор интересует автора настоящей статьи, применяющего, однако, не методы сейсмоакустики, а методы геоэлектрики, в частности метод дистанционного индуктивного зондирования (ДИЗ).

К сожалению, и на это надо обратить внимание, метод ДИЗ до сих пор остаётся изгоем среди мето-

дов геоэлектрики на переменном токе, несмотря на многолетний положительный опыт его применения в прошлом веке в разном технико-методическом исполнении преимущественно в двух промышленно развитых регионах РСФСР. Первый регион — Свердловская область. Здесь метод ДИЗ применялся на рудных месторождениях и на объектах проектно-изыскательских работ. Второй регион — Дальний Восток и Магаданская область. В отличие от первого региона, здесь метод ДИЗ применялся на государственных и старательских дражных полигонах с целью поиска и разведки россыпных месторождений золота и других драгоценных и редких металлов. Последней и, скорее всего, завершающей работой настоящего времени, посвящённой продолжению изучения на Урале инженерно-геологических возможностей метода ДИЗ в комплексе с современным методом электротомографии, является интересная статья В.А. Давыдова [8].

Не касаясь вопроса о равнодушии отечественных и зарубежных геофизиков к методу ДИЗ, стоит отметить ошибочность такой позиции [19]. Результаты многолетних исследований автора настоящей статьи, полученные в разных местах криолитозоны Якутии и, отчасти, Забайкальского края и Амурской области, вполне удостоверяют широкие инженерно-геологические возможности метода ДИЗ, применённого самостоятельно или совместно с методом дипольного электромагнитного профилирования (ДЭМП) и методом георадиолокации. В любом случае геолого-экономическая эффективность метода ДИЗ доказывается положительным результатом решения сложных задач петрофизики криолитозоны в части изучения состава и количественной оценки вероятностных средних показателей ряда основных свойств мерзлых грунтов (температуры, влажности (льдистости), засоленности, теплоёмкости и прочности).

В настоящей статье рассмотрен очередной результат ретроспективного статистического анализа фактического материала метода ДИЗ, полученного в прошлом веке в ходе проектно-изыскательских работ на двух крупных и ответственных по своему назначению инженерных сооружениях. Забегая вперёд, укажем, что эти сооружения расположены в криолитозоне Южной Якутии на большом удалении друг от друга и, главное, отличаются совершенно разными инженерно-геологическими условиями строительства и эксплуатации гражданских и промышленных сооружений. Цель анализа состояла в исследовании вероятностной изменчивости значений ошибок применения метода ДИЗ в части решения прогнозной задачи. А именно, требовалось оценить среднюю прочность в водонасыщенном состоянии разных по составу и температуре мерзлых массивов осадочных пород, слагающих основания отмеченных инженерных сооружений, причём в

¹ Работа посвящена скважинным методами геофизики в части изучения физико-механических свойств углевмещающих осадочных пород Южной Якутии.

наиболее динамичном во времени и пространстве (по площади и глубине) слое годовых теплооборотов сопряжённого со сферой механического, теплового и химического взаимодействия массивов пород с инженерными сооружениями.

Характеристика участков исследований

Оба участка геолого-геофизических исследований находятся в пределах Нерюнгринского и Алданского районов Южной Якутии. Первый участок расположен в южной части островной криолитозоны Южной Якутии на территории г. Нерюнгри. Вторым участком является северная часть Южной Якутии на границе со сплошной криолитозоной Центральной Якутии на трассе железнодорожной Амуро-Якутской магистрали (АЯМ) между станцией «Амга» и разъездом «Болотный». Минимальное и максимальное расстояние между первым участком и границами второго участка по линии АЯМ составляет 421 и 473 км.

Первый участок

Город Нерюнгри является административным центром Южно-Якутского территориально-промышленного комплекса, охватывающего множество месторождений каменного угля, железа, золота и других полезных ископаемых. Центральная часть города с абсолютными отметками рельефа 840–870 м при ширине застроенной части 1,1 км и длине 1,7 км расположена на вершине водораздела пяти рек: Чульмана, Верхней и Нижней Нерюнгри, Малого Беркакита и Амнуннакты.

Территория города хорошо изучена в инженерно-геологическом отношении, начиная с 70-х годов прошлого века. Однако результаты исследований, преимущественно хранящиеся в архиве ООО «Нерюнгринстройизыскания» (раньше ЮжЯкутГИСИЗ) в виде технических отчётов, остаются не только не систематизированными, не обобщёнными, но и не опубликованными в статьях и/или монографиях. Более того, что очень огорчительно, ценнейший фактический материал изысканий, накопленный за несколько десятков лет, практически недоступен для систематических долговременных научных исследований. Несмотря на это, по имеющимся изыскательским данным и сведениям общего порядка [26] нетрудно составить в целом правильное представление о геологическом строении территории г. Нерюнгри. В главных чертах это строение характеризуется пологим углом моноклинального залегания пачки углевмещающих осадочных пород верхнеюрского возраста кабактинской свиты, залегающей под дресвяно-щебенистым слоем делювия-элювия с супесчаным и реже глинисто-песчаным заполнителем. Средняя мощность этого слоя равна около 2–3 м. Редко мощность слоя достигает 5–10 м. По результатам обобщения, сделанного В.М. Желинским [9], а также Н.Н. Грибом и А.В. Самохиным [7], доминирующим литотипом в пачке углевмещающих осадочных пород Южной Якутии

является мелко-среднезернистый песчаник юрского возраста.

В целом, островная криолитозона Южной Якутии на фоне активного действия тектонического фактора [1] отличается сложным инженерно-геологическим строением с неоднородностью и динамичностью мерзлотно-грунтовых условий. На территории г. Нерюнгри они проявляют себя в значительной глубине сезонного оттаивания-промерзания, достигающей 3–6 м с возможностью многократного перехода мёрзлых пород в талое состояние и наоборот. Тепловое состояние мёрзлого массива песчаника, слагающего основание инженерных сооружений г. Нерюнгри, характеризуется высокими температурами. По данным термометрии изыскательских скважин температура в слое годовых теплооборотов на глубине от 10–15 до 20–30 м составляет минус 0,1–0,4 °С. Редко она понижается до минус 0,7–1,0 °С. Такие температуры обычно наблюдаются в пойменных частях рек и на склонах северной экспозиции.

Результат воздействия тектонического фактора на некогда консолидированный и прочный в геологическом прошлом массив песчаника проявляется в нарушении его прочности до состояния разной степени трещиноватости и раздробленности. В своей совокупности эти структурно-прочностные особенности имеют разные размеры и ориентации. Однако по данным георадиолокации [16] они распределены по площади не хаотично, а кусочно-упорядочено с периодическим повторением отдельно взятых нарушений массива песчаника в его трещинно-жильной и блочно-ячеистой структуре.

Обозначенная черта периодичности не исчезает полностью в зоне физического и химического выветривания, где, казалось бы, всё должно быть разрушено и до неузнаваемости перемешано. На самом деле в зоне прочностной дезинтеграции в пределах слоя делювия-элювия следы тектонической трещиноватости и дробления массива песчаника сохраняются. И это не случайность, а проявление закономерности как результата действия принципа единства, соединяющего в единое целое, хотя и в разных формах, нижнюю сохранившуюся часть массива песчаника с его верхней разрушенной частью. В геологии и геохимии этот принцип нередко образно называют принципом «вершков» и «корешков». Что касается следов тектонической деятельности, то в слое делювия-элювия они проявляют себя почти вертикально ориентированными неоднородностями с высоким содержанием дисперсного тонкозернистого материала при почти полном отсутствии фракции крупнообломочного глыбово-гравийного и щебенистого материала. Такая редко наблюдаемая в природных условиях (обнажениях рек) картина с линейным квазипериодическим распределением неоднородностей запечатлена на фотографии в юго-западной части г. Нерюнгри (рис. 1).

На фотографии неоднородности жёлто-оранжевого цвета — и есть сохранившиеся на поверхности

Рис. 1. Фотография обнажения верхней части слоя делювия-элювия, вскрытого бульдозерной расчисткой по стенке строительной канавы гаражного кооператива на южной окраине г. Нерюнгри. Горизонтальный масштаб: 1 см–0,75 м. Фото автора

Fig. 1. Surficial residuum and talus exposed by a bulldozer on the foundation pit wall of a garage cooperative project, southern City of Neryungri. Horizontal scale: 1 cm–0.75 m. Photo by the author



Земли следы тектонической трещиноватости и дробления массива песчаника.

Второй участок

Исследования на втором участке длиной 52 км выполнены методом ДИЗ по правому и преимущественно пологому склону долины мелководной и небольшой по размерам р. Модут. Начало участка находится в месте впадения р. Модут в более крупную р. Амга возле села Верхняя Амга. Конец участка находится около разезда «Болотный». В соответствии с проектным заданием буровые и геофизические работы были выполнены в 1993–1995 гг. не по всему участку, а избирательно на 25 местах расположения инженерных строительных сооружений (ИССО). Это — выемки, водопропускные трубы, мостовые переходы, путепроводы, а также земполотно и один карьер строительных материалов. Суммарная протяжённость интервалов проведения буровых и геофизических работ на ИССО составила 4,3 км.

По данным бурения 57 скважин, полученных АО «Москипротранс», геологическое строение второго участка имеет три особенности. Во-первых и во-вторых, в направлении оси трассы АЯМ наблюдается сильная изменчивость мощности и состава слоя делювиально-элювиальных образований. В-третьих, в этом же направлении под этим слоем наблюдается сильная изменчивость прочности мёрзлого низкотемпературного и сильнотрещиноватого массива доломита с повсеместным заполнением трещин глинистым материалом.

Мощность слоя делювия-элювия изменялась по логнормальному вероятностному закону от 2,1

до 23,4 м при среднем медианном значении 8,0 м. В большинстве случаев (72%) мощность делювия-элювия не превышала 10 м. По данным георадиолокации, полученным Якутским трестом инженерно-строительных изысканий (ЯкутТИСИЗ), средняя мощность делювия-элювия близка к данным бурения и составляет 7,5–7,9 м. Судя по удельному затуханию амплитуды сигналов георадиолокации, прочность тектонически нарушенного массива песчаника сильно ослаблена до глубины 26–27 м. Для сравнения отметим, что на первом участке граница нарушенной и относительно сохранной части массива песчаника по данным ЮжЯкутТИСИЗ залегает на глубине около 10 м. Эти данные не только объективно, но и физически независимы, так как получены в разное время, разными методами² и исследователями.

В сравнении с первым участком тепловой режим мёрзлого массива доломита в слое годовых теплооборотов на глубине 10–15 м характеризовался низкими среднегодовыми температурами, которые изменялись от –0,8 до –4,8°С при среднем вероятностном значении равном –3,4°С. Такой режим конечно же, был благоприятным с точки зрения природного (структурно-текстурного) усиления прочности массива доломита, ослабленного тектоникой и процессами выветривания, включая процесс криометаморфизма.

Метод дистанционного индуктивного зондирования

Физические основы и теория метода, а также методические и технические вопросы его примене-

² В г. Нерюнгри глубина залегания границы относительно сохранного массива песчаника была определена методом вертикального электрического зондирования и сейсмическим методом преломленных волн.

ния обстоятельно изложены в коллективной монографии В.И. Иголкина и др. [11] и поэтому в настоящей статье не рассматриваются. Дополнительные и очень полезные для практикующих геофизиков сведения о методе ДИЗ содержатся в следующих работах: монографии М.М. Задериголовы [10], временном руководстве А.В. Вешева и др. [4] таком же по своей сути руководстве В.С. Титлинова и Р.Б. Журавлёвой [25].

На участках исследований метод ДИЗ был выполнен в рамках опытно-производственных работ. В ходе этих работ под кураторством Производственного научно-исследовательского института по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИС, г. Москва) изучались ранее неизвестные инженерно-геологические возможности метода ДИЗ в островной криолитозоне Якутии. На первом участке применялся только метод ДИЗ. На втором участке метод ДИЗ дополнялся методом ДЭМП и методом дискретной георадиолокации в полосе частот 30–150 МГц с одним из первых отечественных образцов георадарной техники — аппаратурой 17ГРЛ-1. На первом участке в работах методом ДИЗ участвовали геофизики ЮжЯкутГИСИЗ и ЯкутГИСИЗ, а на втором участке — только геофизики ЯкутГИСИЗ.

Измерение в методе ДИЗ значений составляющих эллипса поляризации гармонического поля высокочастотного вертикального магнитного диполя (ВВМД) выполнялось также отечественной и инновационной на тот период времени аппаратурой СЭМЗ в соответствии с инструкцией по эксплуатации [13] и общими правилами, установленными в

геологоразведке для методов геофизики, использующих переменный ток [12].

Кратко коснёмся простой до примитивности и производительной методики измерений с аппаратурой СЭМЗ. В собранном виде фото аппаратуры показано на рис. 2.

Методика измерений была одинаковой для двух участков, как для параметрических точек ДИЗ, расположенных в окрестности изыскательских скважин, так и для точек ДИЗ между скважинами. На штативе высотой около метра неподвижно устанавливалась в горизонтальном положении передающая антенна (ПРД) с неизменной частотой излучения первичного поля ВВМД равной 1,125 МГц. От антенны ПРД, начиная с расстояния не менее 5 м, удалялась приёмная антенна (ПРМ). Измерения выполнялись микровольтметром через 2–5 м до расстояния (разноса) равного 50–100 м. На каждом разnose измерялись значения модуля амплитуды вертикальной (H_z) и горизонтальной (H_r) составляющих суммарного первичного и вторичного поля ВВМД, образованного вихревыми токами индукции в нижнем полупроводящем пространстве — мёрзлом скально-полускальном массиве осадочных пород. Значения H_z измерялись при горизонтальном положении антенны ПРМ, а значения H_r — при вертикальном положении.

Интервал разноса и частота излучения первичного поля ВВМД были выбраны по рекомендациям геофизиков ПО «Якутзолото», которые на тот период времени были более опытны в применении метода ДИЗ в сравнении с геофизиками ЮжЯкутГИСИЗ и ЯкутГИСИЗ. При выборе значений разноса и

Рис. 2. Фотография аппаратуры СЭМЗ перед началом работы методом ДИЗ на одной из строительных площадок Якутии

Fig. 2. SEMZ system setup for geometric EMI sounding at a construction site, Yakutia



1 — блок питания и регулировки тока в антенне ПРД; 2 — стрелочный микровольтметр; 3 — штатив; 4 — антенна ПРМ, настроенная для работы на частоте 1,125 МГц; 5 — антенна ПРД с переключателем частоты 2,250–1,125 МГц; 6 — опорный стержень угломерного устройства; 7 и 8 — лимбы для измерения горизонтальных и вертикальных углов. Фото автора.

1 — power and transmitter current control unit; 2 — dial microvoltmeter; 3 — tripod; 4 — receiving antenna set at 1.125 MHz; 5 — transmitting antenna with a 2.250–1.125 MHz frequency selection switch; 6 — support rod of the goniometric instrument; 7 and 8 — horizontal and vertical angle limbs. Photo by the author.

частоты они исходили из соображений необходимости работы методом ДИЗ в границах переходной зоны источника поля ВВМД, которая бы не только создавала благоприятные условия для правильных измерений, но и гарантированно обеспечивала изучение относительно сохранной части массива осадочных пород ниже глубины 7–10 м.

Кроме основных измерений значений H_z и H_r избирательно, но равномерно по площади г. Нерюнгри и трассе АЯМ проводились дополнительные более трудоёмкие измерения всех остальных составляющих эллипса поляризации поля ВВМД. Это — значения большой и малой оси эллипса и угла наклона большой оси к дневной поверхности. В таких случаях, а их число составляло около 5% от общего числа точек ДИЗ, антенна ПРМ, как и антенна ПРД, устанавливалась на штативе с угломерным устройством.

Измерение всех составляющих эллипса поляризации поля ВВМД было продиктовано отсутствием сведений по значениям эффективного электрического сопротивления ($\rho_{эф}$) и вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости ($\epsilon_{эф}$), без которых невозможно правильно оценить глубину проникновения поля ВВМД в мёрзлый массив осадочных пород. Разъяснение решения этой довольно сложной задачи индуктивной геоэлектрики с использованием палеток В.Ф. Лебедева и др. [15], а также таблицы из работы Иголкина и др. [11] подробно описано в журнале «Геофизика» [17].

Вероятностная модель

Комплексный статистический анализ фактического материала при построении вероятностной модели выполнен с помощью лицензионной программы «Стадия» [14].

Как известно, любая вероятностная модель, связывающая те или иные характеристики геологической среды прямыми (корреляционными) и обратными (регрессионными) смешанными стохастическими-детерминированными зависимостями, по своей сути является прогнозной. Такого рода физико-геологические модели (ФГМ) призваны решать по данным геофизики или иным данным некорректные в своей неопределённости³ геологические задачи. То есть те задачи, однозначное решение которых заведомо невозможно получить классическим математическим путём с применением дифференциальных и интегральных уравнений.

Общий результат применения вероятностных моделей тем и отличается от решения обозначенных уравнений, что состоит в получении усреднённых значений геолого-геофизических характери-

стик, распределённых с заданной вероятностью в границах доверительных интервалов. В связи с этим уместно сказать несколько слов о правильном выборе уровня доверия к результатам геофизики.

В отличие от социальных наук (медицины, психологии и др.), где уровень доверия к результатам статистических исследований массовых общественных явлений высок и нередко составляет 99%, в геологии⁴ уровень доверия к результатам геофизики существенно ниже. За редким исключением он не должен превышать 70%. Такая осторожность не случайна. Она объясняется двумя объективными причинами: во-первых, геологической неоднозначностью результатов геофизики; во-вторых, математической некорректностью решения обратных задач геофизики, которая дополнительно усиливает общую некорректность решения задач теории вероятности и математической статистики. По разным причинам не все геологи, проектировщики и другие специалисты учитывают эти принципиальные ограничения методов геофизики и зачастую оценивают их результаты на недопустимо высоком уровне доверия равном (95–99)%. В результате расширяется диапазон изменчивости ошибок и принимаются формально правильные, но по сути опрометчивые, ложные решения о достоверности полученных результатов методами геофизики по показателю точности. А он, как известно, является первенствующим показателем в списке основных показателей, определяющих геолого-экономическую эффективность методов геофизики.

После необходимого экскурса вернёмся к рассмотрению конкретной вероятностной модели, полученной для инженерно-геологических условий строительства и эксплуатации инженерных сооружений г. Нерюнгри. Эта модель важна тем, что предоставляет заинтересованным специалистам ранее неизвестную возможность решать по данным метода ДИЗ задачу прогноза изменения средней прочности мёрзлого массива песчаника при его переходе в талое водонасыщенное состояние под совокупным влиянием антропогенно-техногенных и климатических факторов. Фактическим материалом для построения вероятностной модели служили 218 парных значений геолого-геофизических характеристик. Они были полученные в 90-х годах прошлого века около точек изыскательских скважин ЮжЯкутГИСИЗ. Проходка скважин выполнялась колонковым способом на площадках изысканий жилых и общественных зданий до глубины 10–20 м. Большую помощь в поиске мест расположения ранее пробуренных и несохранившихся скважин, а также в сборе лабораторных данных по прочности

³ В этой черте и состоит их суть.

⁴ С начала применения методов геофизики с целью поиска и разведки месторождений полезных ископаемых. Однако найти официальный ведомственный документ, регламентирующий уровень доверия 70% к результатам геофизики, автору настоящей работы не удалось найти.

массива песчаника оказала Г.К. Суворова — главный геофизик ЮжЯкутГИСИЗ⁵.

Со стороны геологии в построении вероятностной модели участвовали усреднённые по глубине лабораторные значения R_c — временного предела прочности на одноосное сжатие образцов мёрзлого массива песчаника, искусственно переведённых в водонасыщенное состояние⁶. Эта характеристика широко и постоянно применяется в научно-производственных исследованиях в отечественном грунтоведении для количественной оценки прочности скально-полускальных грунтов. В зарубежной геотехнике характеристика R_c применяется главным образом для построения разнообразных вероятностных моделей. Например, модели нейронной множественной регрессии, в которой R_c применялась вместе с другими горнотехническими характеристиками с целью прогноза скорости проходки скважин с алмазным долотом на месторождениях Турции [27].

Значения R_c определялись в грунтовой лаборатории ЮжЯкутГИСИЗ в соответствии с ГОСТ 21135.2–84 [5]. Этот официальный документ в отличие от рекомендательного применения некоторых строительных норм и правил (СНиП) до сих пор является действующим для проектно-изыскательских организаций. Образцы скально-полускального грунта для определения значений R_c формировались из 1–3 и, реже, 5 монолитов проб, отобранных из керна скважин, вскрывших относительно сохранную часть массива песчаника. В этой части пробы

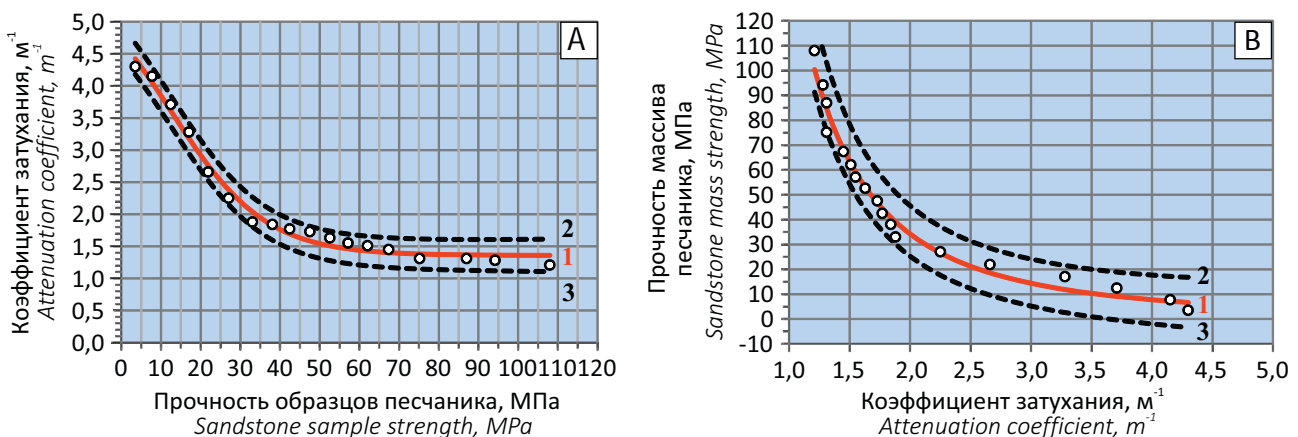
отбирались на разной глубине по неравномерной схеме опробования, принятой в НПО «Стройизыскания» Госстроя РСФСР.

Со стороны геофизики для построения вероятностной модели применялась мера затухания поля ВВМД в относительно сохранной части мёрзлого массива песчаника. Эта не изучаемая геофизиками динамическая характеристика, была определена на частоте 1,125 МГц с разносом от 10 до 50 м. За меру затухания был принят коэффициент уменьшения значений модуля амплитуды H_z (далее, коэффициент k) в зависимости от увеличения разности дипольной установки метода ДИЗ⁷. Закономерное монотонно-нелинейное снижение значений H_z в мёрзлом дроблёном и трещиноватом массиве песчаника как в одном из представителей неоднородной анизотропной геологической среды корректно⁸ и статистически адекватно аппроксимируется степенной функцией, показатель которой и принимается за значение коэффициента k .

В отмеченной геометрической закономерности проявляет себя и петрофизическая закономерность. А именно, снижение прочности мёрзлого массива песчаника приводит к росту значений коэффициента k и наоборот. Картина такой изменчивости в корреляционном и регрессионном отображении показана на рис. 3. На этом рисунке кружками показаны фактические данные после их регуляризации путём группировки в ранжированном ряду возрастающих значений R_c [18]. После регуляризации исходное количество фактических данных уменьшилось от 218

Рис. 3. Корреляционная (А) и регрессионная (В) сторона графического образа регуляризированной вероятностной модели прочности мёрзлого массива песчаника: 1 — линии уравнений логистической (слева) и степенной (справа) функции; 2 и 3 — верхняя и нижняя границы 95-процентного доверительного интервала. Объём преобразованной выборки фактического материала — 18 определений

Fig. 3. Correlation (A) and regression (B) sides of the graph representing the regularized probabilistic model of strength of a frozen sandstone mass: 1 — logistic (left) and power (right) function; 2 and 3 — upper and lower limits of the 95.0% confidence interval. Sample size is 18 determinations



⁵ К настоящему времени не удалось сохранить номера и координаты скважин.

⁶ Наиболее неблагоприятное состояние для строительства и эксплуатации инженерных сооружений.

⁷ Выбор вертикальной составляющей поля ВВМД объясняется её большей информативностью и устойчивостью к влиянию разных помех в сравнении с горизонтальной составляющей H_z [21].

⁸ В теории электродинамики затухание электромагнитного поля в идеальной модели однородной изотропной геологической среды корректно аппроксимируется экспоненциальной функцией. В природной обстановке такая среда встречается редко.

до 18 определений. На такую существенную потерю пришлось пойти, чтобы повысить доминирующую роль фактора прочности на фоне неконтролируемого, а значит, случайного влияния на затухание поля ВВМД других мерзлотно-грунтовых факторов (температуры, льдистости, глинистости, пористости и пр.).

Корреляционная сторона вероятностной модели (см. рис. 3А) важна в научном аспекте, так как описывает уравнением логистической функции зависимость коэффициента k от независимой переменной — прочностной характеристики R_c . С точки зрения теории природных систем эту связь нужно рассматривать и оценивать как итоговый отклик мёрзлого массива песчаника на его возбуждение гармоническим электромагнитным полем. Отклик со всей очевидностью показывает, что затухание суммарного поля ВВМД практически перестаёт изменяться в тех случаях, когда мёрзлый массив песчаника находится в 2-х крайних противоположных прочностных состояниях. С одной стороны в минимальном ослабленном состоянии с низкими значениями $R_c < 10$ МПа и высокими значениями $k > 4,0$ м⁻¹. С другой стороны в максимальном упрочнённом состоянии с высокими значениями $R_c > 70$ МПа и низкими значениями $k < 1,5$ м⁻¹.

Резкое снижение чувствительности коэффициента k к изменению прочности мёрзлого массива песчаника в обозначенных областях не препятствует методу ДИЗ достоверно решать задачу классификации скально-полускальных оснований инженерных сооружений по категории прочности в соответствии с ГОСТ 25100–2020 [6]. Согласно этому документу, основание инженерных сооружений г.Нерюнгри в целом сложено скальным мёрзлым массивом песчаника, но разной категории прочности. В ряду категории прочности преобладает песчаник средней прочности со средним значением R_c равным 37,18 МПа [20].

Регрессионная сторона вероятностной модели (см. рис. 3В) с перестановкой мест переменных имеет сугубо практическое значение. Сама зависимость прочностной характеристики R_c от коэффициента k , описываемая уравнением степенной функции, не имеет физического смысла, но её график полезен для рассмотрения, так как показывает математически формальные вероятностные отношения между исследуемыми переменными. В этом рассмотрении обращает на себя стремительный рост средних значений R_c при значениях $k < 2,0$ м⁻¹. Такая особенность налагает жёсткое требование к относительной погрешности определения значений коэффициента k , которая не должна превышать 10% во избежание больших ошибок в оценке средних значений прочностной характеристики R_c . Надо признать, что такое требование зачастую невыполнимо на застроенных территориях и в промышленных зонах с высоким уровнем индустриальных помех.

В целом, графический образ вероятностной модели удобен для быстрого решения прямой и обратной задачи геофизики на территории г. Нерюнгри. Решение прямой задачи обычно выполняется на стадии проектирования работ методом ДИЗ и состоит в предварительной оценке по графику уравнения логистической функции (см. рис. 3А) меры затухания суммарного поля ВВМД по известным данным о прочности массива песчаника. Решение обратной задачи целесообразно выполнять в полевых условиях на детальных стадиях проектно-исследовательских работ с определением по графику уравнения степенной функции (см. рис. 3В) приблизительных экспресс-оценок средних значений R_c по известным значениям k . Роль таких оценок возрастает на мониторинговых стадиях геотехнических исследований, где главной целью выступает временная динамика прочности скально-полускального массива горных пород, служащего основанием особо ответственных крупных инженерных сооружений (ГЭС, АЭС, ТЭЦ, подземных сооружений, карьеров, обогатительных фабрик и пр.).

Ошибки вероятностной модели

Наиболее точным и одновременно простым уравнением, по которому проверялись ошибки вероятностной модели г. Нерюнгри, оказалось регрессионное уравнение степенной функции. Оно было выбрано в библиотеке нелинейных функций программы «Стадия» [14]. Уравнение имеет следующий вид с очень высоким значением скорректированного коэффициента множественной детерминации ($R^2=0,980$):

$$R_c = \exp(5,017) \cdot k^{-2,141},$$

где R_c — среднее значение прочности массива песчаника или доломита в прогнозируемом водонасыщенном состоянии в МПа; k — среднее значение меры затухания в мёрзлом массиве песчаника или доломита суммарного поля ВВМД в м⁻¹ по его вертикальной составляющей.

Среднее значение коэффициента k предлагается определять по результатам работ методом ДИЗ в 2-х вариантах.

Первый вариант предусматривает определение средних значений k по пяти точкам ДИЗ. Точки располагаются в углах и центре разрозненных или совмещённых между собой участков площади размером до 100 м². Предполагается, что в пределах границ участков вряд ли возможна сильная изменчивость прочности массива песчаника или доломита более 5 МПа. Конечно, исключить возможность такого события нельзя, так как массивы осадочных пород, тем более, находящиеся в мёрзлом состоянии, всегда неоднородны. А это означает, что событие резкой изменчивости прочности массивов осадочных пород может непредсказуемым образом возникнуть в любом месте исследуемой территории. Например, при нахождении точек ДИЗ в зонах

разрывной тектоники на границе прочного и разрушенного массива осадочных пород, а также в обособленных местах их природного или техногенно-антропогенного растепления на границе мёрзлого и талого состояния. В таких предполагаемых случаях сильную изменчивость массива осадочных пород рекомендуется обнаруживать по результатам работ методом ДИЗ в 4-х противоположных азимутах с максимальным радиусом охвата массива электромагнитным полем до 50–100 м. Такой азимутальный подход более выгоден по производительности, экономичности и допускается как второй вариант определения средних значений коэффициента k .

Первоначальная проверка точности прогноза вероятностной модели была сделана для высокотемпературного массива песчаника г. Нерюнгри путём сравнения с лабораторными значениями R_c расчётных средних значений R_c , полученных по вышеприведённому уравнению степенной функции. Такая общеупотребительная в практике натуральных экспериментов внутренняя верификация показала, что при почти нулевых средних показателях (арифметическом, медианном) единичные абсолютные ошибки расчётных средних значений R_c изменяются от –9,50 до 7,63 МПа. В относительном измерении такие ошибки равны –62,02 и 35,67%. Доля небольших абсолютных ошибок не более $\pm(2\div3)$ МПа составляет 72,2%. Почти такая же доля (66,7%) и у относительных ошибок, равных $\pm 10,0\%$. Это означает, что почти в 7 из 10 случаев средняя прочность массива песчаника в прогнозируемом водонасыщенном состоянии на глубине 6–18 м⁹ будет оцениваться по данным метода ДИЗ с высокой точностью. Она и в самом деле высока, так как относительная ошибка лабораторных определений средних значений R_c в серии из шести образцов при доверительной вероятности 80% [5, с. 4] не должна превышать $\pm 20\%$. При таком допуске доля равнозначных ошибок вероятностной модели увеличивается до 83,3%. Получается, что по статистике значений относительных ошибок точность модели г. Нерюнгри не уступает точности лабораторных определений R_c , но при этом имеет важнейшее физическое и не менее важное экономическое преимущество. Речь идёт о том, что в отличие от длительных, трудоёмких и дорогостоящих лабораторных определений прочности, получаемых по данным бурения в точках скважин, вероятностная модель г. Нерюнгри позволяет по данным метода ДИЗ быстро и недорого получать объёмную информацию о прочности мёрзлого высокотемпературного массива песчаника, причём при прогнозируемом его переходе в наиболее неблагоприятное для строительства и эксплуатации инженерных сооружений водонасыщенное состояние под влияни-

ем антропогенно-техногенных и климатических факторов. Стоит также подчеркнуть, что геометрия строения массива песчаника как и других консолидированных геологических образований (осадочных, интрузивных и других пород), не играет значимой роли в получении достоверной количественной оценки прочности скально-полускального массива. Породы могут залегать как угодно: горизонтально, моноклиально или в виде складок.

Зададимся вопросом: изменится ли точность вероятностной модели г. Нерюнгри при решении обозначенной прогнозной задачи на далеко расположенном втором участке – трассе ж/д АЯМ? То есть в том месте, где основание линейного инженерного сооружения сложено мёрзлым низкотемпературным и заглинизированным трещиноватым массивом доломита. В этом случае уже выполняется внешняя верификация модели за пределами границ её построения на другом фактическом материале и в совершенно иных ландшафтно-геоморфологических и инженерно-геологических условиях¹⁰.

Рассмотрим ошибки вероятностной модели по уравнению степенной функции, о котором уже не раз говорилось. Входными данными для уравнения служили средние оценки коэффициента k , определённые в точках изыскательских скважин по второму варианту применения метода ДИЗ, то есть с частичным или полным измерением всех составляющих эллипса поляризации суммарного поля ВВМД в четырёх не всегда строго противоположных азимутах. Из всех пробуренных АО «Мосгипротранс» 57 колонковых скважин азимутальные измерения методом ДИЗ были сделаны в окрестности 37 скважин, где мощность слоя делювия-элювия не превышала 7–10 м. Такая избирательность позволяла если не исключить, то существенно ослабить сильное экранирующее влияние глинистого слоя делювия-элювия, искажающее результат определения прочности нижезалегающего массива доломита в его относительно сохранной части.

Небольшой объём опытных работ, выполненных перед основным объёмом работ методом ДИЗ, показал, что при необходимости сохранения неизменной, как в г. Нерюнгри, частоты 1,125 МГц для изучения прочности относительно сохранной части массива доломита максимальный разнос нужно увеличить до 100 м. При заданных параметрах индуктивного зондирования (частоте и разноте) значения эффективных электрофизических характеристик ρ_{ef} и ε_{ef} массива доломита мало чем отличались от таковых для массива песчаника г. Нерюнгри. На начальном разноте 30 м значения ρ_{ef} изменялись от 260 до 380 Ом·м при среднем значении 310 Ом·м. На разноте 30–100 м изменчивость ρ_{ef} сконцентри-

⁹ Это усреднённое значение глубины для всей изученной территории г. Нерюнгри. Глубина определена по средним значениям ρ_{ef} и ε_{ef} равных соответственно 2800 Ом·м и 3,93 отн.ед.

¹⁰ В отличие от г. Нерюнгри они не были частично изменены или полностью нарушены строительными работами.

ровалась в диапазоне 2400–3500 Ом·м при среднем значении 3000 Ом·м. Характеристика ε_{ef} также малоизменчива. На разnose 30 м она изменялась от 3,4 до 4,8 отн. ед., а на разnose 30–100 м — от 3,3 до 4,3 отн. ед. при средних значениях соответственно равных 4,2 и 3,6 отн. ед. При таких значениях электрофизических характеристик глубина изучения методом ДИЗ массива доломита в целом составляла 6,1–19,8 м.

Вместе взятые электрофизические характеристики удостоверяют, что низкотемпературный мёрзлый массив доломита, находясь по данным буровых работ в сильнотрещиноватом состоянии с повсеместным заполнением трещин глинистым материалом, не потерял свою прочность, несмотря на долговременное влияние тектонических процессов и последующих процессов выветривания. Этот вывод подтверждают результаты статистического анализа лабораторных определений в грунтовой лаборатории ЯкутГИСИЗ 37 средних значений R_c , которые были получены по 55 монолитам доломита, отобранным из керна скважин АО «Мостипротранс». По данным статистического анализа, эти значения изменяются от 4,42 до 138,10 МПа при средних показателях (арифметическом и медианном) 57,34 и 51,062 МПа. Модальное среднее (наиболее вероятностное значение) равно 33,07 МПа. Неравенство этого показателя с остальными средними показателями служит одним из признаков нарушения нормального закона в вероятностном ряду распределений значений R_c . Об этом же говорит и тестовая проверка нулевых гипотез, сделанная по независимым критериям Колмогорова, омега-квадрат и хи-квадрат [14].

Почти в 70% случаев от общего числа лабораторных данных значения R_c распределены с коэффициентом вариации 57,4% в интервале 24,41–90,27 МПа. Несмотря на значительную изменчивость проч-

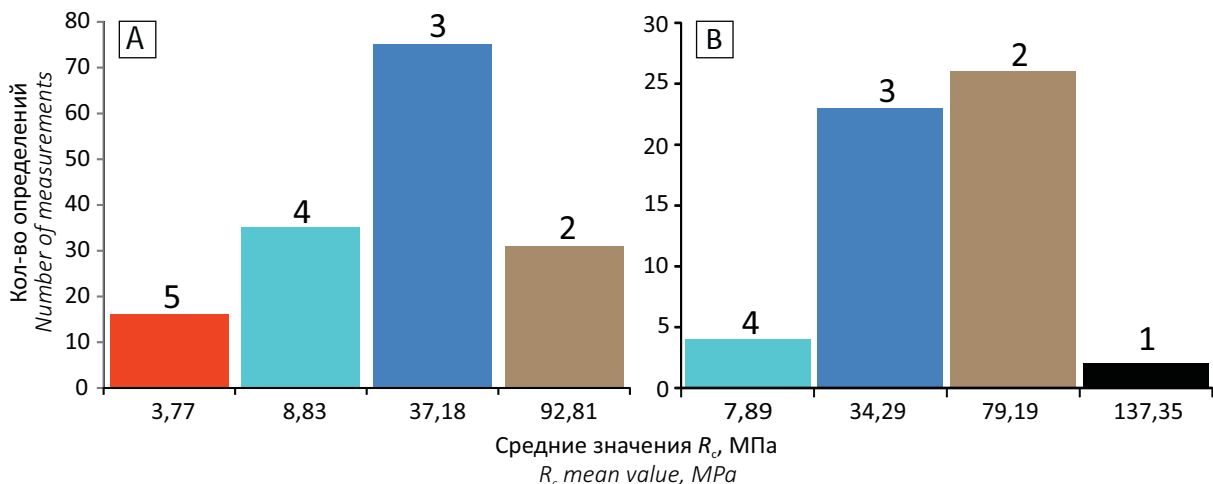
ности, массив доломита по ГОСТ 25100–2020 [6] с вероятностью 85,1% классифицируется как скальное основание участка ж/д АЯМ. Такая же вероятность классификации (88,4%) и скального массива песчаника г. Нерюнгри. Однако при сравнении гистограмм прочности этих массивов осадочных пород обнаруживается существенная разница в вероятностном распределении средних значений R_c (рис. 4).

В массиве песчаника (см. рис. 4А) есть категория пониженной прочности, классифицирующая полускальные грунты, но нет очень прочной категории. В массиве доломита картина противоположная: пониженной категории прочности нет, а очень прочная категория есть, хотя и встречается в небольшом количестве определений (см. рис. 4В). Главная же черта вероятностного распределения значений R_c в другом. А именно, в том, что в массиве доломита по средним значениям R_c прочная категория превышает аналогичную категорию в массиве песчаника в 2,13 раз. При этом вероятность встречаемости этих категорий в массивах доломита и песчаника примерно одинакова и равна 44,1 и 30,7%. Почти равная вероятность встречаемости в этих массивах и у категорий средней прочности (41,0 и 47,7%).

Таким образом, хотя влияние фактора заглинизированности тектонических трещин и не может не снижать прочности массива доломита, теоретически делая его ненадёжным полускальным основанием для ж/д АЯМ, но фактически прочность этого основания даже в прогнозируемом водонасыщенном состоянии сохраняется высокой. В общей средней оценке по доминирующим категориям (средней и прочной) она составляет 58,12 МПа.

Вернёмся к ошибкам вероятностной модели по трассе ж/д АЯМ.

Рис. 4. Гистограммы массивов песчаника (А) и доломита (В) в ранжированном ряду по категории прочности
Fig. 4. Histograms of sandstone (A) and dolomite (B) rock masses ranked by strength



1 — очень прочные; 2 — прочные; 3 — средней прочности; 4 — малой прочности; 5 — пониженной прочности
1 — very strong; 2 — strong; 3 — medium strong; 4 — weak; 5 — very weak

Статистика абсолютных и относительных ошибок (таблица) свидетельствует о большой изменчивости ошибок. По коэффициенту вариации мера интегральной изменчивости ошибок очень большая и составляет 640 и 427%. Значения абсолютных ошибок распределены по классическому нормальному вероятностному закону¹² с почти равновероятным отклонением около почти нулевой средней ошибки в сторону завышения (значения ошибок со знаком минус) или занижения (значения ошибок со знаком плюс) лабораторных данных.

В отличие от абсолютных ошибок, вероятностное распределение значений относительных ошибок не подчиняется нормальному закону. Оно имеет более сложный вид с двумя модами: -17,33 и +12,43%. Гистограммы относительных ошибок показаны на рис. 5.

Графический вид вероятностного распределения значений ошибок обнаруживает их систем-

ность, но носит она разный характер. Так, в целом, в ряду равновероятностного распределения значений абсолютных ошибок, о чём было сказано выше, наблюдаются ошибки с систематическим превышением лабораторных значений R_c в среднем на 11,63 МПа (см. рис. 5А). Доля таких ошибок невелика и равна 24,3%. У относительных ошибок, а их, заметим, принято рассматривать, как главный показатель точности методов геофизики, системность носит более благоприятный для решения задачи прогноза прочности массива доломита сбалансированный противоположный характер (см. рис. 5В). В одних случаях по данным метода ДИЗ уравнение регрессии вероятностной модели в среднем завышает прочность на 17,33%, а в других случаях занижает на 12,43%. Доли таких разнонаправленных систематических ошибок близки между собой и составляет соответственно 27,0 и 24,3%.

Относительные ошибки, не превышающие ±20-процентный уровень лабораторных опреде-

Табл. 1. Статистика ошибок вероятностной модели г. Нерюнгри

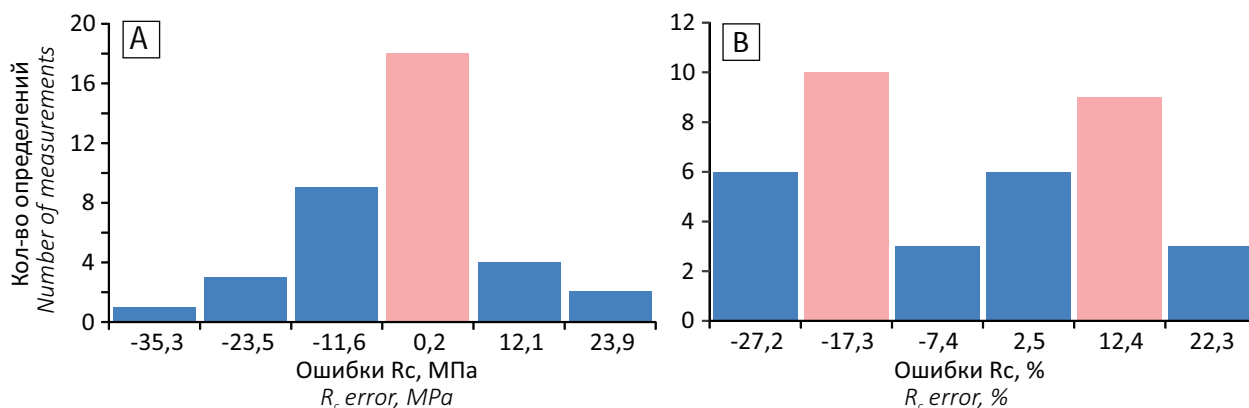
Tab. 1. Error statistics of the probabilistic model for Neryungri

Описательная статистика	1	2
Среднее арифметическое значение (САР)	-2,04	-3,92
Среднее медианное значение	+0,14	-3,30
Среднее модальное значение	+0,23	-17,33 и +12,43
Стандартное отклонение	±13,06	±16,76
Коэффициент вариации,%	640	427
Минимальное значение	-41,26	-32,2
Максимальное значение	+29,87	+27,3
Количество определений по скважинам	37	37
Уровень надежности САР (95,0%)	±4,36	±5,59

Примечания: 1 и 2 — абсолютная и относительная ошибка в МПа и процентах

Рис. 5. Гистограммы значений абсолютных (А) и относительных (В) ошибок прогноза прочности массива доломита в водонасыщенном состоянии по данным метода ДИЗ. Объём выборки — 37 скважин

Fig. 5. Histograms of absolute (A) and relative (B) errors of dolomite saturated strength prediction based on geometric EMI sounding. Sample size is 37 boreholes



¹² В теории ошибок он называется законом Гаусса.

лений средних значений R_c [6], составляют 73,0% от общего числа определений (см. таблицу). В этой совокупности определений максимальные ошибки равные $-32,2$ и $+27,3\%$ наблюдаются лишь в двух случаях, т.е. их доля незначительна и равна $5,4\%$.

Детальный анализ ошибок обнаружил их скрытую зависимость от влияния фактора прочности. Зависимость слабая, но статистически значимая в форме линейной тенденции. В ней в случаях занижения лабораторных значений R_c доля влияния¹³ фактора прочности среди других мерзлотно-грунтовых факторов равна $33,3\%$. В случаях завышения лабораторных значений R_c доля влияния этого фактора снижается до $15,7\%$. В трендовом отображении рост прочности от $8-18$ до $112-128$ МПа приводит к росту значений относительных ошибок от $5-13$ до $21-25\%$. Природа образования такой интересной тенденции пока в точности не известна, но, скорее всего, обусловлена сильным снижением изменчивости значений коэффициента k (меры затухания суммарного поля ВВМД) на участках залегания прочного массива доломита со средними значениями $R_c > 80-100$ МПа. Объясняется это тем, что в таком плотном массиве остаётся мало трещин, пустот и других микронеоднородностей, в которых могут находиться в том или ином количестве глинистые частицы, органические и растительные вещества, а также содержащаяся в них незамёрзшая вода. Именно в этих проводящих электрический ток образованиях под влиянием первичного поля ВВМД

образуются вихревые токи с индукционным эффектом, наблюдаемым в суммарном первичном и вторичном поле ВВМД.

Остаётся добавить, что в упорядоченных¹⁴ рядах изменчивости прочности массива доломита по оси трассы ж/д АЯМ наблюдается высокая степень согласованности геолого-геофизических данных (рис. 6). В этой согласованности рост лабораторных значений R_c в подавляющем большинстве случаев сопровождается ростом расчётных значений R_c , полученных по вероятностной модели. По показателям параметрической и непараметрической корреляции (критериям Кендала и Спирмена) мера статистической зависимости по показателю прочности данных метода ДИЗ от лабораторных данных высокая и равна соответственно $0,916$ и $0,793-0,934$.

Итак, в сравнении с г. Нерюнгри доля равнозначных с лабораторными данными относительных ошибок вероятностной модели в определении средних значений прочности массива доломита по трассе ж/д АЯМ снижается, но не существенно — всего навсего на $13,2\%$. Из этого следует вывод, что по показателю точности вероятностная модель г. Нерюнгри применима для решения задачи прогноза прочности в водонасыщенном состоянии не только массива песчаника, но и массива доломита. Такая общность делает вероятностную модель региональной, расширяя границы её практического применения предположительно для всего класса осадочных пород в островной криолитозоне Южной Якутии.

Рис. 6. Изменчивость средней прочности массива доломита по оси трассы ж/д АЯМ

Fig. 6. Variation in average dolomite strength along the Amur-Yakutsk Railway route centerline derived



1 — по лабораторным данным; 2 — по данным метода ДИЗ на глубине 6–20 м

1 — laboratory data; 2 — geometric EMI sounding data at depths of 6–20 m

¹³ Она оценивается по значению множественного коэффициента детерминации, которое всегда приводится вместе с регрессионным уравнением регрессии.

¹⁴ По глубине залегания под слоем элювия-делювия выветренной части массива доломита.

Заключение

Положительный результат внутренней и внешней верификации ошибок вероятностной модели г. Нерюнгри на трассе ж/д АЯМ даёт основание присвоить ей региональный статус с возможностью практического применения в границах островной криолитозоны Южной Якутии. Главное целевое назначение вероятностной модели такого уровня общности состоит в решении по данным метода ДИЗ задачи количественной оценки средней прочности разнотемпературных мёрзлых массивов осадочных пород (песчаника и доломита), перешедших под влиянием антропогенно-техногенных и климатических факторов в прогнозируемое водонасыщенное состояние. Быстрое, экономичное и экологически чистое решение такой важнейшей задачи геомеханики одним из методов наземной геофизики¹⁵ приобретает в настоящее сложное время рыночных отношений и санкционной политики враждебных России иностранных государств особую значимость, и прежде всего — для индустрии строительства, причём как на начальных, так и на детальных стадиях проектно-изыскательских работ.

Относительная ошибка невелика и приемлема для решения обозначенной задачи прогноза. И, что немаловажно, эта задача решается не по сложному многофакторному уравнению регрессии, которое

трудно получить, а по простому однофакторному уравнению степенной функции. В большинстве случаев ошибка не превышает $\pm 20\%$ и по порядку значений сопоставима с аналогичной ошибкой лабораторных определений средних значений прочности, установленных ГОСТ 21135.2–84 [5]. Доля таких допустимых относительных ошибок или, иначе говоря, выборочная вероятность их появления в фактическом геофизическом материале, достаточно высока и составляет при изучении массивов песчаника и доломита соответственно 83,3% и 75,7%.

Удовлетворительная статистика ошибок объективно делает метод ДИЗ соответствующим требованиям и стандартам отечественного грунтоведения по показателю точности определения в полевых условиях средних значений R_c мёрзлых массивов осадочных пород, слагающих скально-полускальные основания инженерных сооружений в островной криолитозоне Южной Якутии. При дальнейшей внешней верификации вероятностной модели г. Нерюнгри в самостоятельном варианте или в варианте последовательного дополнения ранее полученным архивным материалом или новым фактическим материалом по инженерно-геологическим объектам не исключена возможность, что модель приобретёт более высокий статус общности для всей криолитозоны Якутии.

Список источников

1. Булдович С.Н., Мелентьев В.С., Наумов М.С., Фурикевич О.С. Роль новейших разрывных нарушений в формировании мерзлотно-гидрогеологических условий (на примере Нерюнградской синклинали Южно-Якутского мезозойского прогиба) // Мерзлотные исследования. – Вып. 15. – М. : МГУ, 1976. – С. 120–125.
2. Владов М.Л., Капустин В.В. О проблемах инженерной сейсморазведки // Технологии сейсморазведки. – 2014. – № 2. – С. 104–112.
3. Воронков О.К. Инженерная сейсмика в криолитозоне (изучение строения и свойств мерзлых и талых горных пород и массивов). – СПб. : ВНИИГ, 2009. – 401 с.
4. Временное руководство по методу электромагнитного зондирования с вертикальным магнитным диполем / Министерство цветной металлургии СССР; сост. А. В. Вешев, Е. Ф. Любцева, В. М. Леончиков, В. М. Алексеев. – М. : Министерство цветной металлургии СССР, 1978. – 45 с.
5. ГОСТ 21135.2–84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. – М. : Изд-во стандартов, 1984. – 7 с.
6. ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация. – М. : Стандартинформ, 2020. – 38 с.
7. Гриб Н.Н., Самохин А.В. Физико-механические свойства углевмещающих пород Южно-Якутского бассейна. – Новосибирск : Наука, 1999. – 240 с.
8. Давыдов В.А. Двухмерная инверсия дистанционных индукционных зондирований // Вопросы естествознания. – 2018. – № 1 (15). – С. 62–69.
9. Желинский В.М. Мезозойская угленосная формация Южной Якутии. – Новосибирск : Наука, 1980. – 119 с.
10. Задегидолова М.М. Радиоволновой метод в инженерной геологии и геоэкологии. – М. : МГУ, 1998. – 320 с.
11. Иголкин В.И., Шайдунов Г.Я., Тронин О.А., Хохлов М.Ф. Методы и аппаратура электроразведки на переменном токе. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2016. – 272 с.
12. Инструкция по электроразведке / под ред. Г.С. Франтова. – Ленинград : Недра, 1984. – 534 с.
13. Комплекс среднечастотной аппаратуры электромагнитного зондирования (СЭМЗ). Техническое описание. – Красноярск : Сибцветметавтоматика, 1991. – 30 с.

¹⁵ Она оценивается по значению множественного коэффициента детерминации, которое всегда приводится вместе с регрессионным уравнением регрессии.

14. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных / 4-е изд. – М. : Форум; ИНФРА-М, 2006. – 512 с.
15. Лебедев В.Ф., Онущенко В.И., Литвинцева Л.М. Комплекс СЭМЗ. Методическое пособие. – Красноярск: Сибцветметавтоматика, 1991. – 83 с.
16. Нерадовский Л.Г. Изучение методом георадиолокации инженерно-геологических особенностей криогенных осадочных толщ Южной Якутии (на примере участка в г. Нерюнгри) // Разведка и охрана недр. – 2022. – № 1. – С. 41–54.
17. Нерадовский Л.Г. Опыт применения метода дистанционного индуктивного зондирования в криолитозоне Южной Якутии // Геофизика. – 2022. – № 2. – С. 44–54.
18. 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.
19. Нерадовский Л.Г. Технология электромагнитного зондирования мерзлых грунтов слоя годовых теплооборотов. – М. : Научное обозрение, 2018. – 622 с.
20. Нерадовский Л.Г. Прочность скального основания инженерных сооружений в криолитозоне Южной Якутии (г. Нерюнгри) [Электронный ресурс] // Вестник евразийской науки. – 2022. – Т. 14. – № 2. – 01NZVN222. Режим доступа: <https://esj.today/PDF/01NZVN222.pdf> DOI: 10.15862/01NZVN222 (дата обращения: 09.02.2023 г.). DOI: 10.15862/01NZVN222.
21. Петровский А.Д. Радиоволновые методы в подземной геофизике. – М. : Недра, 1971. – 224 с.
22. Рекомендации по изучению методами инженерной сейсмологии статических и динамических характеристик деформируемости скальных оснований гидросооружений в северной строительной-климатической зоне (ССКЗ). П 19–85. – Ленинград : ВНИИГ, 1985. – 102 с.
23. Рекомендации по методике составления геофизических схем (моделей) скальных массивов в основаниях бетонных плотин. П 96–81. – Ленинград : ВНИИГ, 1981. – 113 с.
24. Савич А.И., Яценко З.Г. Исследование упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами. – М. : Недра, 1979. – 214 с.
25. Титлинов В.С., Журавлёва Р.Б. Технология дистанционных индуктивных зондирований. – Екатеринбург : Наука, 1995. – 56 с.
26. Южная Якутия: мерзлотно-геологические и инженерно-геологические условия Алданского горнопромышленного района / Под ред. В.А. Кудрявцева. – М. : МГУ, 1975. – 444 с.
27. Basarir H., Tutluoglu L., Karpuz C. Penetration rate prediction for diamond bit drilling by adaptive neuro-fuzzy inference system and multiple regressions // Engineering Geology. 2014. – Vol. 173. – P. 1–9. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.02.006.

References

1. Buldovich S.N., Melent'ev V.S., Naumov M.S., Furikevich O.S. Rol' noveishikh razryvnykh narushenii v formirovani merzlotno-gidrogeologicheskikh uslovii (na primere Neryungrinskoi sinklinali Yuzhno-Yakutskogo mezozoiskogo progiba) [The role of recent faults in the formation of permafrost and hydrogeological conditions (case study of the Neryungri syncline, South-Yakutian Mesozoic trough)]. In: Merzlotnye issledovaniya. Iss. 15. Moscow: MGU; 1976. p. 120–125.
2. Vladov M.L., Kapustin V.V. Problems of engineering seismic. *Tekhnologii seismorazvedki*. 2014;(2):104–112.
3. Voronkov O.K. Inzhenernaya seismika v kriolitozone (izuchenie stroeniya i svoistv merzlykh i talykh gornyykh porod i massivov) [Engineering seismology for permafrost (investigations of the structure and properties of frozen and thawed rocks and masses)]. St. Petersburg: VNIIG; 2009. 401 p.
4. Veshev A.V., Lyubtseva E.F., Leonchikov V.M., Alekseev V.M. [comp.] Vremennoe rukovodstvo po metodu ehlektromagnitnogo zondirovaniya s vertikal'nym magnitnym dipolem [Interim guide for using the electromagnetic sounding method with a vertical magnetic dipole]. Moscow: Ministerstvo tsvetnoi metallurgii SSSR; 1978. 45 p.
5. GOST 21135.2–84. Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom szhatii [National Standard 21135.2–84. Rocks. Methods for determination of axial compression strength]. Moscow: Izd-vo standartov; 1984. 7 p.
6. GOST 25100–2020. Grunty. Klassifikatsiya [National Standard 25100–2020. Soils. Classification]. Moscow: Standartinform; 2020. 38 p.
7. Grib N.N., Samokhin A.V. Fiziko-mekhanicheskie svoistva uglevmeshchayushchikh porod Yuzhno-Yakutskogo basseina [Physico-mechanical properties of coal-bearing rocks in the South Yakutian basin]. Novosibirsk: Nauka; 1999. 240 p.
8. Davydov V.A. Two-dimensional inversion of remote induction sounding. *Voprosy Estestvoznaniya*. 2018;15:62–69.
9. Zhelinskii V.M. Mezozoiskaya uglenosnaya formatsiya Yuzhnoi Yakutii [The mesozoic coal-bearing formation in Southern Yakutia]. Novosibirsk: Nauka; 1980. 119 p.
10. Zaderigolova M.M. Radiovolnovoi metod v inzhenernoi geologii i geoekologii [The radiowave method in engineering geology and environmental geology]. Moscow: MGU; 1998. 320 p.
11. Igolkin V.I., Shaidurov G.Ya., Tronin O.A., Khokhlov M.F. Metody i apparatura ehlektorazvedki na peremennom toke [Methods and equipment for AC electrical resistivity surveying]. Krasnoyarsk: Sibirskii federal'nyi universitet; 2016. 272 p.
12. Frantov G.S. (ed.). Instruksiya po ehlektorazvedke [Tutorial on resistivity methods]. Leningrad: Nedra; 1984. 534 p.
13. Kompleks srednechastotnoi apparatury ehlektromagnitnogo zondirovaniya (SEHMZ). Tekhnicheskoe opisanie [SEMZ system for medium-frequency electromagnetic sounding. Specifications]. Krasnoyarsk: Sibsvetmetavtomatika; 1991. 30 p.
14. Kulachev A.P. Metody i sredstva kompleksnogo analiza dannykh [Methods and tools for integrated data analysis]. 4th edn. – Moscow: Forum; INFRA-M; 2006. 512 p.
15. Lebedev V.F., Onushchenko V.I., Litvintseva L.M. Kompleks SEHMZ. Metodicheskoe posobie [SEMZ system. A methodological guideline]. Krasnoyarsk: Sibsvetmetavtomatika; 1991. 83 p.

16. Neradovskiy L.G. Engineering characterization of geological features in frozen sedimentary rocks using ground penetrating radar, Neryungri, southern Yakutia. *Prospect and protection of mineral resources*. 2022;(1):41–54.
17. Neradovskii L.G. Application of geometric electromagnetic induction sounding in a permafrost area, Southern Yakutia. *Journal of geophysics*. 2022;(2):44–54.
18. Neradovskii L.G. Assessment of the strength state of the rocky-semi-rocky foundation of engineering structures in the city of Neryungri in the permafrost zone of South Yakutia according to geophysics data (remote inductive sensing method). *Nedropolzovanie XXI vek*. 2022;96:91–97.
19. Neradovskii L.G. Tekhnologiya ehlektromagnitnogo zondirovaniya merzlykh gruntov sloya godovykh teplooborotov [Technology of electromagnetic sounding of upper permafrost]. Moscow: Nauchnoe obozrenie; 2018. 622 p.
20. Neradovsky L.G. Strength of hard foundation rocks in the Southern Yakutian permafrost region (city of Neryungri). *The Eurasian Scientific Journal*. 2022;14(2):01NZVN222. Available at: <https://esj.today/PDF/01NZVN222.pdf> (accessed 09.02.2023). DOI: 10.15862/01NZVN222
21. Petrovskii A.D. Radiovolnovye metody v podzemnoi geofizike [Radiowave methods in subsurface geophysics]. Moscow: Nedra; 1971. 224 p.
22. Rekomendatsii po izucheniyu metodami inzhenernoi seismiki staticheskikh i dinamicheskikh kharakteristik deformiruемости skal'nykh osnovanii gidrosooruzhenii v severnoi stroitel'no-klimaticheskoi zone (SSKZ). P 19–85 [VNIIG. P 19–85, Guidelines for the investigation of static and dynamic deformation characteristics of rock foundations using seismic methods for hydraulic projects in the northern climatic zone]. Leningrad : VNIIG; 1985. 102 p.
23. Rekomendatsii po metodike sostavleniya geofizicheskikh skhem (modelei) skal'nykh massivov v osnovaniyakh betonnykh plotin [VNIIG. P 96–81, Guidelines for the compilation of geophysical schemes (models) of rock masses in the foundations of concrete dams]. Leningrad: VNIIG; 1981. 113 p.
24. Savich A.I., Yashchenko Z.G. Issledovanie uprugikh i deformatsionnykh svoystv gornyykh porod seismoakusticheskimi metodami [Study of elastic and deformation properties of rocks by seismoacoustic methods]. Moscow: Nedra; 1979. 214 p.
25. Titlinov V.S., Zhuravleva R.B. Tekhnologiya distantsionnykh induktivnykh zondirovaniy [The technology of distance inductive sounding]. Yekaterinburg: Nauka; 1995. 56 p.
26. Kudryavtsev V.A. (ed.). Yuzhnaya Yakutiya: merzlotno-gidrogeologicheskie i inzhenerno-geologicheskie usloviya Aldanskogo gornopromyshlennogo raiona [Southern Yakutia: permafrost, hydrology and geotechnical conditions in the Aldan mining district]. Moscow: MGU; 1975. 444 p.
27. Basarir H., Tutluoglu L., Karpuz C. Penetration rate prediction for diamond bit drilling by adaptive neuro-fuzzy inference system and multiple regressions. *Engineering Geology*. 2014;173:1–9. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.02.006.

Статья поступила в редакцию 07.11.2022, одобрена после рецензирования 20.01.2023, принята к публикации 14.02.2023.
The article was submitted 07.11.2022; approved after reviewing 20.01.2023; accepted for publication 14.02.2023.

Информация об авторах

Нерадовский Леонид Георгиевич

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

Information about authors

Leonid G. Neradovskii

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