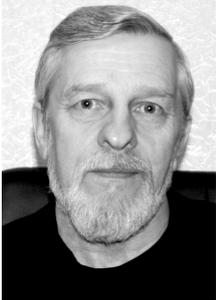


Изучение прочности оснований инженерных сооружений по затуханию электромагнитного поля в г. Нерюнгри

Study of the strength of the foundations of engineering structures for the attenuation of the electromagnetic field in the city of Neryungri

doi 10.26310/2071-3010.2022.282.4.010



Л. Г. Нерадовский,

д. т. н., с. н. с., Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

✉ leoner@mpi.ysn.ru

L.G. Neradovskii,

doctor of engineering, senior researcher, Melnikov permafrost institute, Siberian branch, Russian academy of sciences, Yakutsk, Russia

В Южной Якутии в квартале «М» г. Нерюнгри доказана возможность метода геофизики (дистанционного индуктивного зондирования) оценивать прочность массива песчаника в прогнозируемом водонасыщенном состоянии в пределах сферы его механического и теплового взаимодействия с инженерными сооружениями. Физической основой решения этой задачи служит изучение затухания в слое годовых теплооборотов гармонического высокочастотного поля вертикального магнитного диполя. Установлено, что мера затухания поля сильно зависит от прочности песчаника, определенной в лабораторных условиях. Благодаря этой связи была построена для всего г. Нерюнгри вероятностная модель и по ней сделан прогноз изменения средних значений прочности водонасыщенного массива песчаника с относительной ошибкой $\pm 20,3\%$. Эта ошибка практически равна ошибке лабораторного определения прочности образцов скально-полускальных грунтов. Статистика результатов применения вероятностной модели удостоверяет, что даже в водонасыщенном состоянии массив песчаника остается скальным основанием инженерных сооружений. В таком состоянии с вероятностью около 70% массив классифицируется как категория скальных грунтов средней прочности со значениями 17,55-50,95 МПа.

In South Yakutia, in the «M» quarter of the city of Neryungri, the possibility of the method of remote inductive sensing of geophysics to assess the strength of a sandstone massif in a predicted water-saturated state within the sphere of its mechanical and thermal interaction with engineering structures has been proved. The physical basis for solving this problem is the study of the attenuation in the layer of annual heat exchanges of the harmonic high-frequency field of a vertical magnetic dipole. It has been established that the measure of field attenuation strongly depends on the strength of the sandstone, determined in the laboratory. Thanks to this connection, a probabilistic model was built for the entire city of Neryungri and a forecast was made of the change in the average values of the strength of a water-saturated sandstone massif with a relative error of $\pm 20,3\%$. This error is almost equal to the error of the laboratory determination of the strength of samples of rocky-semi-rocky soils. The statistics of the results of applying the probabilistic model certifies that even in a water-saturated state, the sandstone massif remains the rocky foundation of engineering structures. In this state, with a probability of about 70%, the massif is classified as a category of medium-strength rocky soils with values of 17,55-50,95 MPa.

Ключевые слова: квартал «М», инженерные сооружения, массив песчаника, прочность, слой годовых теплооборотов, метод дистанционного индуктивного зондирования, коэффициент затухания гармонического высокочастотного поля вертикального магнитного диполя.

Keywords: quarter «M», engineering structures, sandstone massif, strength, layer of annual heat exchanges, remote inductive sensing method, attenuation coefficient of the harmonic high-frequency field of a vertical magnetic dipole.

Введение

В прошлой статье, опубликованной в журнале «Инновации» [1], в инновационном аспекте были подробно рассмотрены вопросы технологии наземного применения методов георадиолокации и дистанционного индуктивного зондирования (ДИЗ), разработанной с целью быстрого, экономичного и экологически чистого изучения мерзлых грунтов, слагающих основания инженерных сооружений в криолитозоне России.

В настоящей статье продолжается рассмотрение в инновационном аспекте новых результатов изучения методом ДИЗ мерзлых грунтов, но уже представленных скально-полускальными разновидностями, которые слагают основания инженерных сооружений на застроенной территории криолитозоны Южной Якутии. Ныне этот район Республики Саха (Якутии) находится в стадии интенсивного промышленного освоения с разработкой многочисленных месторождений полезных ископаемых (угля, железа, золота и пр.). В процессе освоения месторождений постоянно и на разных уровнях (проектном, изыскательском, строительном, эксплуатационном) возникают вопросы, ка-

сающиеся количественной оценки прочности мерзлых скально-полускальных грунтов, на которых строятся и эксплуатируются объекты промышленно-гражданской инфраструктуры (обоганительные фабрики, ТЭЦ, аэродромы, жилые дома, больницы, школы и пр.).

Оценки прочности для решения задач геомеханики принимаются по результатам испытаний образцов скально-полускальных грунтов в лабораториях проектно-изыскательских и научно-образовательных организаций, руководствуясь до сих пор действующим ГОСТ 21135.2-84 [2]. К числу серьезных недостатков такого традиционного подхода к количественной оценке прочности с необходимостью бурения скважин и отбора образцов грунта из керна скважин в современный период времени рыночных отношений относятся три экономических показателя. Это — высокая стоимость, большая трудоемкость и низкая производительность лабораторных работ.

Альтернативный подход с применением методов геофизики имеет свои недостатки. Главный из них, который образно говоря, можно назвать «ахиллесовой пятой» методов геофизики, состоит в их принципиальном ограничении в части получения точных и

однозначных данных о геологической среде. Причина заключается в математической некорректности и геологической неоднозначности решения обратных задач геофизики с расшифровкой природы получаемых данных. Именно, поэтому реальные возможности наземных методов геофизики за исключением методов радиометрии и магнитометрии ограничены получением приблизительных оценок о геологической среде. Неоспоримыми инновационными преимуществами методов геофизики служат быстрое, воспроизводимое во времени и пространстве, относительно недорогое, информативное и экологически чистое изучение геологической среды. Эти качества все более и более обретают ценность и становятся востребованными развивающимся технократическим обществом в рамках рыночных отношений. В перечисленном списке преимуществ особую научно-практическую значимость имеет объемное изучение геологической среды. В отличие от точечного изучения среды с помощью горно-буровых выработок и лабораторных опытов объемное изучение многократно увеличивает рост информации о строении, составе, свойствах и состоянии среды. Этот рост важен не сам по себе, а теми познавательными следствиями, которые приносит. А именно, полноту и детальность многостороннего изучения не кусочно-разрозненных участков, а всего массива горных пород и грунтов. Причем, делая это в одноразовом порядке или во временной последовательности, решая задачи диагностики или прогноза в мониторинговых системах наблюдений.

Наибольший вклад среди наземных методов геофизики в решение задач количественной оценки прочностных и деформационных характеристик мерзлых и немерзлых массивов скально-полускальных горных пород и грунтов внесли методы сейсмометрии (сейсморазведки, сейсмоакустики). Большой опыт их применения накоплен в прошлом веке при инженерно-строительных изысканиях гидротехнических сооружений в азиатских и кавказских республиках СССР, а также на Северо-Востоке РСФСР. Такие масштабные работы планомерно проводились по государственным планам развития народного хозяйства СССР институтами Гидропроект им. С. Я. Жука (г. Москва) и НИИ Гидротехники им. Б. Г. Веденеева (ВНИИГ, г. Санкт-Петербург).

Работ по изучению механических свойств массивов скально-полускальных грунтов, выбранных проектировщиками в качестве оснований плотин гидротехнических сооружений много, но в систематизированном обобщении результатов решаемых задач опубликованных в обзорных работах в виде монографий и книг мало. Их можно, что называется, пересчитать «по пальцам». Одной из таких наиболее известных работ в прошлом веке и в настоящее время в интернет-пространстве является работа О. К. Воронкова [3]. Есть и другие весьма важные, но менее известные и доступные для современного читателя работы. Это — монография А. И. Савича и З. Г. Ященко [4], а также рекомендации ВНИИГ [5, 6] и ПНИИИС (г. Москва) [7].

В отличие от сейсмометрии методы электрометрии и, в частности, метод индуктивной гео-

электрики ДИЗ по разным причинам и обстоятельствам не применялись в прошлом веке и не применяются в настоящее время для решения в условиях *in situ* задачи количественной оценки прочности массивов скально-полускальных грунтов. Не исключено, что такие работы есть, но автор не нашел их в доступных ему источниках научно-технической литературы.

Общая краткая характеристика участка работ

Изучение геомеханических возможностей метода ДИЗ в части количественной оценки прочности скально-полускальных грунтов выполнено в рамках научно-исследовательских работ Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова (г. Якутск) по программам СО РАН. Местом для постановки очередного научного эксперимента в 2017-2018 гг. была выбрана площадка жилого квартала «М» в г. Нерюнгри. Причина такого выбора объясняется тем, что территория этого города в течении нескольких десятилетий прошлого века, начиная с 1973 г., основательно изучена инженерно-геологическими изысканиями. Кроме того, в отличие от горно-таежных условий в условиях неплотной застройки территории г. Нерюнгри существенно легче планировать, дешевле организовать и доступнее, удобнее проводить научный эксперимент, внося в него при необходимости дополнения и изменения.

Красивый и небольшой по размерам г. Нерюнгри построен в сложных инженерно-геологических условиях криолитозоны Южной Якутии и представляет собой ее административный центр. Город расположен в окружении гор Алданского нагорья и Станового хребта в 820 км на юг от столицы Республики Саха (Якутия) г. Якутска. Со столицей Якутии г. Нерюнгри связывает федеральная автодорога А360 «Лена» и железная дорога называемая АЯМ (Амуро-Якутская магистраль). Достопримечательностью города служит крупное месторождение коксующегося угля. Карьер этого уникального по запасам и качеству угля месторождения расположен в северо-западной окрестности города и до сих пор разрабатывается с конца 1970-х гг.

Территория г. Нерюнгри занимает водораздел нескольких рек. Большой реки Чульман и двух ее маленьких правых притоков: реки Малый Беркакит и реки Амуннакта. Поверхность водораздела неровная с абсолютными отметками рельефа от 773 до 868 м. По данным единственной обзорной работы МГУ [8] водораздельные поверхности имеют мягкие мерзлотные условия с развитием прерывисто-островной мерзлоты небольшой мощности (20-50 м) и высокой среднегодовой температурой в нижней части слоя годовых теплооборотов, близкой к 0°C. На участках г. Нерюнгри, где строительными работами в слое годовых теплооборотов не был нарушен природный тепловой баланс, температура на максимальной глубине термометрии изыскательских скважин (10-15 м) равна $-(0,3-0,5)^\circ\text{C}$. Естественный высокотемпературный режим мерзлоты находится в сильной зависимости от процессов конвективного теплопереноса. Движение воздуха и воды с поверхности и из глубин земли по

зонам дробления и трещиноватости коренных пород приводит к уменьшению мощности островной мерзлоты вместе с увеличением мощности слоя годовых теплооборотов. По разным оценкам, нижняя граница этого слоя залегает на глубине 15-30 м.

Геологическое строение участка работ методом ДИЗ мало чем отличается от общего геологического строения и криогенного состояния, распространенной в Южной Якутии углевмещающей толщи осадочных пород мезозойского возраста. По обобщенным данным В. М. Желинского [9] преобладающим литотипом пород в этой толще является мелко-среднезернистый песчаник. Он же по неопубликованным в открытом доступе данным, заимствованным из технических отчетов Южно-Якутского треста инженерно-строительных изысканий (ЮжЯкутТИСИЗ), составляет основание инженерных сооружений г. Нерюнгри, представляя собой в строительном отношении воздушно-сухой или высокотемпературный мерзлый массив скально-полускальных грунтов.

Район Южной Якутии, включающий участок работ методом ДИЗ, отличается сложным инженерно-геокриологическим обликом, главной чертой которого является структурно-тектоническая неоднородность вместе с наложенной пространственно-временной динамичностью мерзлотно-грунтовых условий [8, 10]. Эта главная природная черта криолитозоны Южной Якутии проявляется в сильной и трудно предсказуемой изменчивости прочности и температурного режима толщи осадочных пород, а также значительной глубине сезонного оттаивания/промерзания (до 3-6 м) с возможностью многократного перехода мерзлых пород в талое состояние, и наоборот.

Справка по методу ДИЗ

Физическая основа неординарного применения метода ДИЗ для решения широкого спектра научно-производственных задач состоит в изучении процесса затухания гармонического поля высокочастотного вертикального магнитного диполя (ВВМД) в почвенно-грунтовой и горно-геологической среде до глубины не более 30-50 м. Правомерность такого подхода с целью изучения состава, состояния и свойств мерзлых грунтов в слое годовых теплооборотов доказана по результатам многолетних экспериментальных исследований в самом крупном регионе России – Республике Саха (Якутия) и частично, в Забайкальском крае и Амурской области [11].

Изучение динамической стороны поля ВВМД в энергетическом взаимодействии с неоднородными и анизотропными геологическими образованиями отличается новизной и оригинальностью в сравнении с традиционным подходом, который применялся в прошлом веке и продолжает применяться в настоящее время отечественными и зарубежными геофизиками. Цель традиционного подхода, начиная с начала 1960-х гг., как была, так и остается одной единственной на фоне разнообразия все более и более расширяющегося списка и условий решаемых задач, а также аппаратно-технических разработок. Внимание

геофизиков приковано к изучению в сравнительно низкочастотном (килогерцовом) диапазоне электрической проводимости почво-грунтов преимущественно до глубины 0,5-1,5 м или 10-15 м.

Об идейно-физической приверженности интернационального геофизического сообщества к изучению электрической проводимости горно-геологической и грунтовой-почвенной среды удостоверяют объективные свидетельства. Одним из них со стороны отечественной геофизики служит книга В. И. Иголкина и др. [12]. В ней приведен краткий исторический очерк технического развития методов индуктивной геоэлектрики и некоторых результатов их применения в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке. Еще одним источником свидетельства приверженности отечественных геофизиков к изучению электрической проводимости горно-геологической среды служит сайт Института геофизики (ИГФ) им. Ю. П. Булашевича УрО РАН (г. Екатеринбург) [13]. На сайте в хронологическом порядке и по лабораториям института опубликованы сведения по истории развития методов геофизики на Урале. В этих сведениях есть интересный факт. Из него следует, что технология метода ДИЗ была разработана заведующим лабораторией индукционной электроразведки Г. В. Астраханцевым вместе с его сотрудником В. С. Титлиновым. Однако остается неизвестным в каком году произошло это событие и было ли оно пионерным по отношению к достижениям ленинградских и красноярских геофизиков, которые тоже вплотную занимались разработкой теории, методики и техники измерений для метода ДИЗ. Тем не менее, разработанная в ИГФ УрО РАН технология метода ДИЗ с большой результативностью применялась на Урале с разной аппаратурой (ДЭМП-СЧ, АЧЗ-78, МЧЗ-8, МЧЗ-10) для решения исключительно геологических задач в части поиска и разведки месторождений медноколчеданных руд. В последующие годы вектор направленности применения метода ДИЗ на Урале сместился в сторону решения задач для целей промышленно-гражданского строительства и коммунального хозяйства.

Зарубежный опыт применения ДИЗ в числе других методов индуктивной геоэлектрики с общим названием ЕМІ (electromagnetic induction) в целом, по целевому назначению ничем не отличается от отечественного опыта. Начиная с конца 1970-х гг., зарубежные геофизики расширяли и углубляли изучение электрической проводимости почво-грунтов и реже, горных пород с помощью аппаратуры ЕМ-31 и ЕМ-38 и другой техники измерений в килогерцовом диапазоне частот. Об этом пространно пишут в обзорных работах Дж. Боага [14], а также Джеймс А. Дулиттл и Эрик К. Бревик [15]. Лишь в отдельных ранних работах по аппаратуре и результатам применения методов ЕМІ, например, в работе А. Сарторелли, Р. Френч [16] и техническом отчете департамента транспорта и государственных учреждений штата Аляски со ссылкой на работу Дж. Д. Макнейл [17] обращено мимолетное внимание на графики затухания гармонического электромагнитного поля, как на суммарный индуктивный отклик от слоев нижнего полупространства. Однако делается это,

опять же, в контексте изучения электрической проводимости без прямого изучения особенностей затухания низкочастотного поля не выходящего за границы килогерцового диапазона частот (десятки килогерц) в неоднородной анизотропной геологической среде.

В настоящее время метод ДИЗ продолжает эпизодически применяться в разных регионах России заинтересованными бизнес-структурами, которые покупают дорогую эксклюзивную цифровую аппаратуру, выпускаемую сотрудниками Красноярского государственного университета [12]. Однако о широкомасштабном и постоянном применении метода ДИЗ в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке приходится забыть. На Урале, судя по личной переписке с некоторыми геофизиками ИГФ УрО РАН, такая же печальная ситуация. Даже штучное, что называется «на коленках» изготовление приборов и аппаратуры для метода ДИЗ прекращено. Возможно, в связи с этим перестанет применяться и метод ДИЗ, хотя его возможности, судя по статье В. А. Давыдова – сотрудника ИГФ УрО РАН [18], еще не исчерпаны в применении с традиционными методами геофизики и новым методом электротомографии. Однако метод ДИЗ перейдет в разряд бесперспективных и перестанет применяться в России без кардинального обновления техники измерений и дополнительной разработки, сопряженных с этой техникой компьютерных программ математической обработки результатов измерений.

Стадийность технологии

Технология применения метода ДИЗ для решения любой инженерно-геологической задачи, касающейся количественной оценки свойств грунтового массива, слагающего основания инженерных сооружений, состоит из пяти последовательно сменяющих друг друга стадий. Рассмотрим главное содержание каждой стадии применительно к вышеописанным геологическим условиям г. Нерюнгри в аспекте решения прогнозной задачи для квартала «М». А именно, количественной оценки прочности в прогнозируемом водонасыщенном состоянии массива песчаника, который в действительности находится в основании инженерных сооружений квартала «М» в одном из двух состояний: воздушно-сухом или высокотемпературном мерзлом.

На первой стадии аппаратурой «СЭМЗ» измерялись составляющие эллипса поляризации поля ВВМД в соответствии с инструкцией к аппаратуре «СЭМЗ» [19]. Процесс измерений описан также в работе В. И. Иголкина и др. [12, 19]. Измерения выполнены весной 2017-2018 гг. Весенний период измерений был выбран неслучайно. Связано это с необходимостью пусть не в полной, но значительной степени ослабить экранирующее влияние промерзшего за зиму слоя делювия-элювия, которое искажает истинную количественную оценку прочности массива песчаника. В теплое время года этот слой с большим количеством глинистого материала и в разной степени насыщенный водой атмосферных осадков хорошо проводит электрический ток. Если не ослабить влияние слоя элювия-делювия, то в результате по данным метода

ДИЗ получим нереальные более низкие фоновые значения прочности массива песчаника. И на их основе сделаем неправильные выводы о пригодности массива песчаника, как основания эксплуатируемых инженерных сооружений в квартале «М».

Измерения сделаны в 110 точках ДИЗ, более менее равномерно покрывающих застроенную площадь квартала «М». Большая часть измерений (70 точек) сделана в 3-4 азимутах, а меньшая (40 точек) – в 1-2 азимутах. Точки ДИЗ располагались в свободных или слабозастроенных пространствах между жилыми домами и иными инженерными сооружениями. Во всех точках ДИЗ на частоте 1,125 МГц и разnose от 10 до 30-50 м (расстояния между приемно-передающими антеннами) измерялись значения модуля амплитуды напряженности вертикальной составляющей (H_z) поля ВВМД.

В точках, составляющих 15% от общего количества точек ДИЗ, вместе с составляющей H_z измерялись остальные составляющие поля ВВМД. Это – модуль амплитуды напряженности горизонтальной составляющей (H_r), большой и малой оси эллипса поляризации, а также угол наклона большой оси к горизонту (горизонтальной поверхности Земли).

Приоритетность измерения составляющей H_z объясняется ее более высокой информативностью и помехоустойчивостью в сравнении с составляющей H_r . Выбор частоты 1,125 МГц из числа остальных частот (0,281; 0,562; 2,250 МГц), которые предоставляет аппаратура «СЭМЗ», обусловлен следующим. При заданном интервале разноса эта частота в конкретных инженерно-геологических условиях квартала «М» обеспечивает изучение относительно сохранной части массива песчаника в разной мере, ослабленной тектоническими процессами. Именно эта часть с точки зрения строительства и эксплуатации инженерных сооружений важна для получения правильной количественной оценки прочности массива песчаника. В разрушенной экзогенными процессами выветривания верхней части массива песчаника, прилегающей к слою делювия-элювия, практически исчезают закономерные изменения прочности. Поэтому эту часть массива песчаника бессмысленно было изучать методом ДИЗ с целью решения поставленной прогнозной задачи.

На второй стадии выполнялась математическая обработка результатов измерений с аппаратурой «СЭМЗ» по двум направлениям:

- 1) определение меры затухания поля ВВМД в слое годовых теплооборотов в пределах сферы механического и теплового взаимодействия мерзлого массива песчаника с инженерными сооружениями;
- 2) определение эффективных значений двух электрофизических характеристик массива песчаника.

На первом направлении оценка меры затухания поля ВВМД сделана по степени уменьшения значений H_z в зависимости от увеличения разноса между неподвижно установленной передающей антенной и удаляющейся от нее приемной антенны. Попутно добавим, что к этой антенне был присоединен микрольтметр, которым и измерялись значения H_z .

Для описания закономерного процесса уменьшения значений H_z применялась степенная функция. В отличие от экспоненциальной функции, постоянно применяемой в теоретической электродинамике при изучении идеализированных простейших моделей однородной изотропной геологической среды, степенная функция точнее передает интегральный нелинейный характер изменения поля ВВМД в неоднородной анизотропной геологической среде. В частности, массиве песчаника. Значения показателя степенной функции (коэффициент k) принимались за меру затухания поля ВВМД в массиве песчаника в зависимости от совокупного изменения его состава, состояния и свойств.

На втором направлении главная трудность заключалась в определении по значениям всех составляющих эллипса поляризации поля ВВМД эффективных значений электрического сопротивления (далее — сопротивление) и вещественной части диэлектрической проницаемости (далее — проницаемость). Знание этих характеристик необходимо для оценки интервала глубины изучения прочности массива песчаника методом ДИЗ. Определение сопротивления и проницаемости массива песчаника производилось с помощью альбома палеток, составленного В. Ф. Лебедевым и др. [20]. Кроме этого, для определения сопротивления с учетом частотной дисперсии проницаемости применялась таблица из работы В. И. Иголкина и др. [12, с. 260-266].

Процесс определения электрофизических характеристик массива песчаника и глубины его изучения методом ДИЗ подробно описан в журнале «Криосфера Земли» [21]. При использовании частоты 1,125 МГц средние значения проницаемости на разносе 10 м составляли для верхней выветренной части массива песчаника 5,1 отн. ед. В интервале разноса от 10 до 30-50 м, который соответствовал изучению нижней относительно сохранной и более прочной части массива песчаника средние значения проницаемости уменьшались до 4,2 отн. ед. Что касается средних значений сопротивления, то они для верхней и нижней части массива песчаника равны 506 и 1564 Ом·м соответственно.

Остается отметить, что средние значения электрофизических характеристик квартала «М», мало чем отличаются от таковых на всей территории г. Нерюнгри. Однако при таком сравнении интервал глубины изучения массива песчаника изменился от 6-18 м до 7-14 м. В абсолютных единицах изменчивость глубины существенно разная, а в относительном масштабе практически одинакова и равна 15,4-16,0%.

На третьей стадии применялась ранее разработанная для всего г. Нерюнгри вероятностная модель прогноза прочности относительно сохранной части массива песчаника на глубине 6-18 м [21]. В решении этой задачи участвовали 218 парных значений геофизической характеристики — коэффициента k и средневзвешенной по мощности опробованных интервалов массива песчаника геологической характеристики R_c — временного предела прочности на одноосное сжатие в водонасыщенном состоянии образцов скально-полускальных грунтов.

Значения коэффициента k и прочностной характеристики R_c были определены по данным метода ДИЗ и лабораторных опытов в ходе инженерно-геологических изысканий в 1990-х гг. на застраиваемой территории г. Нерюнгри в точках бурения изыскательских скважин. Опыты выполнялись в грунтовой лаборатории ЮжЯкутГИСИЗ по образцам, вырезанных из консолидированных мерзлых или воздушно-сухих монолитов скально-полускальных грунтов, отобранных из керна скважин на разной глубине в относительно сохранной части массива песчаника. Состав и порядок проведения опытов установлены ГОСТ 21135.2-84 [2].

В отличие от коэффициента k прочностная характеристика R_c широко и повсеместно применяется в отечественном грунтоведении и зарубежной геотехнике. Наиболее часто в зарубежных научных публикациях характеристика R_c применяется вместе с другими геологическими и горнотехническими характеристиками с целью построения вероятностных моделей. Например, для построения нейронной модели множественной регрессии с целью прогноза скорости проходки скважин алмазным долотом на месторождениях Турции [22].

Из тысяч скважин, пробуренных ЮжЯкутГИСИЗ за время строительного освоения территории г. Нерюнгри, значения R_c удалось получить всего лишь по 218 скважинам, но и этого количества фактического материала было достаточно для достоверного изучения с помощью программы «Стадия» [23] вероятностных законов и статистик распределений значений R_c вместе с изучением изменчивости меры затухания поля ВВМД (значений коэффициента k) в зависимости от прочности массива песчаника в широком диапазоне репрезентативности от 2,5 до 114,6 МПа. При этом предельно маленькой прочности массива песчаника соответствовало высокое значение коэффициента k равное 4,41 м⁻¹. У максимально прочного массива значения коэффициента k снижались до 1,08 м⁻¹.

Ошибка лабораторного определения средних значений R_c в точности неизвестна. Однако по требованиям ГОСТ 21153.2-84 (пункт 1.3.9) [2, с. 3] при массовом производстве лабораторных опытов в сериях из 6 образцов, приготовленных из каждого монолита грунта, отобранного из керна скважин, относительная ошибка определения средних значений R_c заведомо не могла быть выше ±20%.

Ошибка определения значений коэффициента k оценена косвенным путем по результатам контрольных измерений значений H_z , которые были выполнены по ходу проведения работ методом ДИЗ. При средней относительной ошибке измерений значений H_z , равной 12,7%, аналогичная ошибка определения значений коэффициента k оказалась меньше и составила 7,6%.

Прямое сопоставление значений коэффициента k и прочностной характеристики R_c показало существование между ними сильных причинно-следственных вероятностных отношений в пространстве парных корреляций. В этом пространстве зависимость меры затухания поля ВВМД от прочности массива песчаника, слагающего основание инженерных сооружений г. Нерюнгри, корректно описывается уравнением

логистической функции с приведенным значением коэффициента множественной детерминации $R^2=0,959$. Это означает, что на территории г. Нерюнгри вклад фактора прочности в изменчивость затухания поля ВВМД доминирует среди мерзлотно-грунтовых и остальных факторов, составляя почти 96% [21].

Обратное сопоставление значений прочностной характеристики R_c и коэффициента k также показывает существование между ними вероятностных отношений, но с меньшим значением R^2 (0,793) при использовании регрессионного уравнения степенной функции. Однако эти отношения уже нельзя рассматривать как причинно-следственные из-за их нереальности. Действительно, прочность массива песчаника физически не может зависеть от затухания поля ВВМД. Тем не менее, именно такие отношения с давних пор используются в научно-практических исследованиях для построения разномасштабных и разноплановых прогнозных вероятностных моделей. В частности, модели прогноза по значениям коэффициента k средней прочности мерзлого или воздушно-сухого массива песчаника, который под совокупным влиянием природно-климатических и антропогенно-техногенных факторов может перейти в водонасыщенное состояние в основании инженерных сооружений г. Нерюнгри. Для этого города решение прогнозной задачи выполнялось по уравнению степенной функции [21]. С целью подавления разного рода случайных помех была получена модифицированная версия уравнения степенной функции с существенно большим значением R^2 равным 0,980 [24]. Это уравнение и было использовано при применении вероятностной модели для поквартального решения прогнозной задачи на территории г. Нерюнгри и, в частности, в квартале «М».

На четвертой стадии по модифицированному уравнению степенной функции вероятностной модели вычислялись средние значения прогнозной прочности водонасыщенного массива песчаника в квартале «М» на глубине 7-14 м.

На пятой стадии с помощью программы «Стадия» [23] изучалась изменчивость в квартале «М» значений ошибки вероятностной модели в количественной оценке прогнозной прочности водонасыщенного массива песчаника. Заметим, что главным показателем точности, по которому в геологии принято оценивать эффективность и достоверность результатов применения методов геофизики [25], принят показатель не абсолютной, а относительной ошибки.

Результат применения технологии

Рассмотрим результат решения задачи количественной оценки прочности массива песчаника в квартале «М» по вероятностной модели с применением модифицированного уравнения степенной функции [24]. Это уравнение принципиально важно для решения задач будущего строительства и эксплуатации инженерных сооружений не только в местном масштабе в г. Нерюнгри, но и за пределами города в региональном

масштабе в криолитозоне Южной Якутии в сходных инженерно-геологических условиях.

Уравнение вероятностной модели позволяет с приемлемой точностью сделать переход из реального разряженного пространства точечных разрозненных по площади и глубине определений лабораторных значений R_c водонасыщенных образцов песчаника в виртуальное уплотненное пространство водонасыщенного состояния массива песчаника, объединенного по результатам изучения меры затухания поля ВВМД в окрестности точек ДИЗ. Важность этой задачи геомеханики усиливается тем, что ее решение получено в слое годовых теплооборотов в сфере интенсивного механического и теплового взаимодействия массива песчаника с инженерными сооружениями. Стоит добавить, что слой годовых теплооборотов служит тепловым буфером между атмосферой и криосферой Земли, сохраняя ее природную тепловую инерцию и, тем самым, защищая от разрушения.

Статистика изменчивости весной–летом 2017-2018 гг. в квартале «М» расчетных значений R_c , полученных по модифицированному уравнению степенной функции, приведена в табл. 1. В соответствии с ней единичные значения R_c изменяются от 5,00 до 95,63 МПа при средних показателях (арифметическом, медианном и модальном) равных 28,16-34,25 МПа. Интегральная широта изменчивости прочности массива песчаника, оцененная по коэффициенту вариации, составляет 49,25%. Это не так много, но все же, свидетельствует о прочностной неоднородности массива песчаника в квартале «М». Вероятностное распределение расчетных средних значений R_c показано на рис. 1.

Тестовая проверка, сделанная с помощью программы «Стадия» [23] показывает следующее. По критериям Колмогорова и Омега-квадрат распределение признается соответствующим закону нормального распределения, а по критерию Хи-квадрат — не признается таковым. Принимая для решения вопроса правило большинства будем считать вероятностное распределение значений R_c соответствующим нормальному закону. Это означает, что на площадке квартала «М» с равной вероятностью встречаются участки

Таблица 1
Характеристики вероятностного распределения значений геолого-геофизических характеристик водонасыщенного массива песчаника в квартале «М»

Статистика	R_c , МПа	k , м ⁻¹
Среднее арифметическое (СА)	34,25	2,265
Медианное среднее	34,22	1,982
Модальное среднее	28,16	2,308
Стандартное отклонение	16,7	0,786
Коэффициент вариации, %	49,25	34,70
Минимум	5,00	1,362
Максимум	95,63	4,296
Количество определений	70	70
Уровень надежности СА (95,0%)	4,02	0,187

Примечание: R_c – средние расчетные значения прочности массива песчаника на глубине 7-14 м; k – средние азимутальные значения коэффициента, определяющие меру затухания поля ВВМД на глубине 7-14 м.

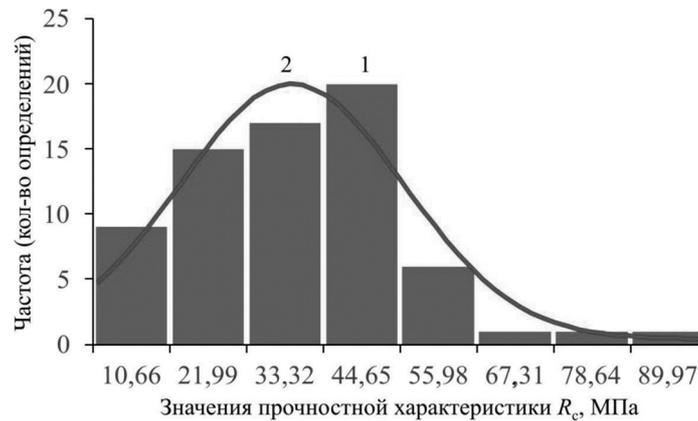


Рис. 1. Фактическая гистограмма (1) и теоретическая вариограмма (2) закона нормального вероятностного распределения прогнозных расчетных средних значений прочности массива песчаника в водонасыщенном состоянии в квартале «М». Объем выборки – 70 определений

разной прочности массива песчаника с общим средним показателем около 30 МПа. В 70% случаев массив песчаника по данным метода ДИЗ характеризуется значениями R_c сосредоточенными в диапазоне 17,55-50,95 МПа. Более высокие (выше 50 МПа) и низкие (ниже 16 МПа) значения прочности встречаются редко с равной вероятностью 12,9%.

По принятой в России инженерно-геологической классификации [26] при значениях R_c равных 15-50 МПа массив песчаника следует считать скальным грунтом средней категории (разновидности) прочности.

Таким образом, даже при прогнозном сценарии допущения перехода из воздушно-сухого или высокотемпературного мерзлого состояния в водонасыщенное состояние массив песчаника сохраняет свою прочность. Значит, и инженерные сооружения при допущении ухудшения в обозримом будущем природно-климатических и антропогенно-техногенных условий не будут разрушены в массовом порядке. Получается, что значимость вероятностной модели, как центральной части геомеханической технологии метода ДИЗ, выходит за рамки инженерных приложений и охватывает социально-общественную сферу в г. Нерюнгри.

Посмотрим, как распределены значения коэффициента k на площадке квартала «М». По статистике (см. табл. 1) единичные значения коэффициента изменяются от 1,362 до 4,296 m^{-1} при средних показателях 1,982-2,308 m^{-1} . Интегральная изменчивость значений коэффициента k равна 34,70%. В сравнении с прочностной характеристикой R_c изменчивость меньше на 34,7%. Это означает, что затухание поля ВВМД не полностью реагирует на изменение прочности массива песчаника, чего и быть не должно, но достаточно чувствительно к этому изменению в относительно сохранной части массива на глубине 7-14 м. Такая неполноценная наследственность усилена влиянием масштабного фактора при сопоставлении геолого-геофизических данных. Со стороны геофизики объемных данных по прочности участков массива песчаника, полученных по результатам азимутальных измерений значений коэффициента k в окрестности точек ДИЗ, а со стороны геологии — точечных лабораторных данных по прочности образцов песчаника, отобранных по неравномерной схеме из керна скважин на разной глубине.

Все вместе взятое приводит к усложнению изучаемой структурной неоднородности массива песчаника и поля ВВМД с иным в отличие от прочностной

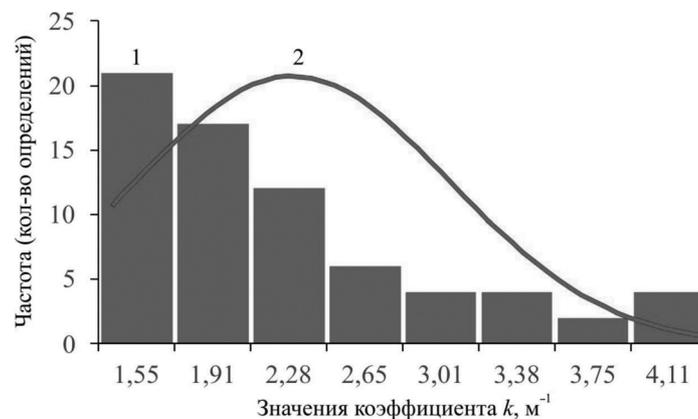


Рис. 2. Фактическая гистограмма (1) и теоретическая вариограмма (2) закона нормального вероятностного распределения средних азимутальных значений коэффициента k (меры затухания поля ВВМД в воздушно-сухом и высокотемпературном мерзлом массиве песчаника) в квартале «М». Объем выборки – 70 определений

характеристики R_c вероятностным распределением значений коэффициента k . Оно имеет упорядоченный асимметричный вид и явно не соответствует теоретическому закону нормального вероятностного распределения (рис. 2). Наиболее часто значения коэффициента k встречаются в интервале 1,362-1,729 м⁻¹. В целом, доминирующая группа значений 1,362-2,462 м⁻¹ встречается в квартале «М» с вероятностью 71,4% и соответствует наиболее прочным частям воздушно-сухого или высокотемпературного мерзлого массива песчаника. Проверка, сделанная с помощью программы «Стадия» [23], показала, что по одному из двух критериев согласия (Омега-квадрат) фактическое распределение значений коэффициента k отчасти соответствует теоретическому закону Эрланга.

Результат применения на площадке жилого квартала «М» (рис. 3) вероятностной модели прогноза прочности массива песчаника в водонасыщенном состоянии

показан в цветовой тональности на рис. 4. На этом рис. 4 серыми и белыми кружками обозначены точки ДИЗ. Белые и серые кружки означают точки ДИЗ с измерениями в 1-2 и 3-4 азимутах, соответственно. Цифры по горизонтальной и вертикальной сторонам рис. 4 определяют географические координаты площадки квартала «М» по долготе и широте, соответственно.

Из рассмотрения рис. 4, построенного с помощью известной и широко распространенной зарубежной программы «Surfer-8», следует вывод о сложной и непредсказуемой изменчивости расчетной прочности массива песчаника в моделируемых неблагоприятных инженерно-геологических условиях строительства и эксплуатации инженерных сооружений. В целом, картина изменчивости в неясном виде выражает известную по геологическим данным блочно-ячеистую и трещинно-жильную структуру массива, порожденные тектоническими процессами сжатия, разрыва и смятия. Фрагменты этой структуры образуют преимущест-

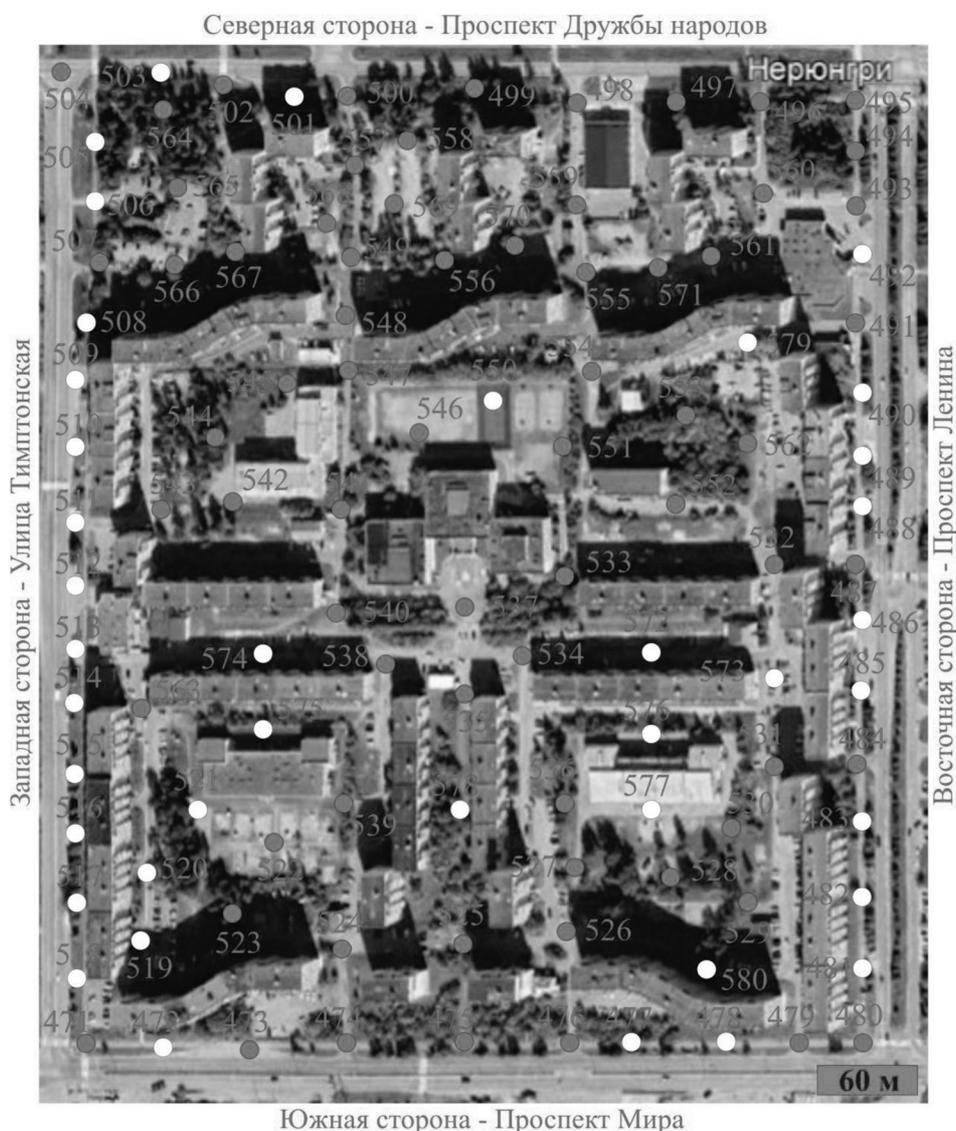


Рис. 3. Карта жилого квартала «М» г. Нерюнгри с расположением точек ДИЗ и их номеров с разным числом азимутальных измерений вертикальной составляющей поля ВВМД. В нижнем правом углу показан прямоугольник масштаба. Белые кружки — точки ДИЗ с 1-2 числом азимутальных измерений. Темные кружки — точки ДИЗ с 3-4 числом азимутальных измерений

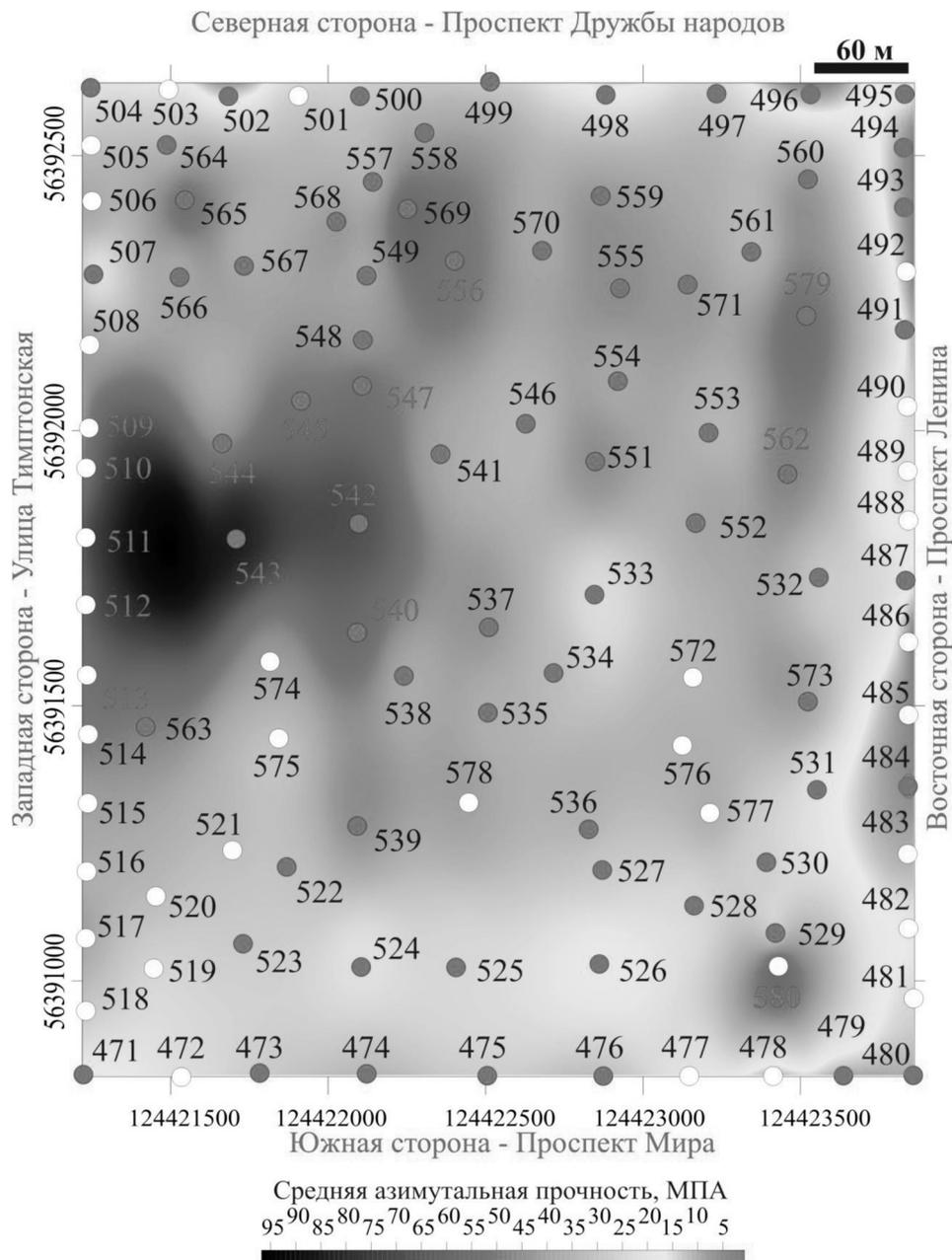


Рис. 4. Интерполяционный план тоновой изменчивости на площадке жилого квартала «М» в г. Нерюнгри прогнозных расчётных средних значений прочностной характеристики R_c водонасыщенного массива песчаника на глубине 7-14 м. Белые кружки — точки ДИЗ с 1-2 числом азимутальных измерений. Темные кружки — точки ДИЗ с 3-4 числом азимутальных измерений

венно взаимно-диагональную полосчатую систему разнонаправленных кусочно-локальных границ, разделяющих массив песчаника на прочные и менее прочные участки. Прочностной контраст на этих границах разный. От слабого (оттенки светло-серого цвета) до высокого (темно-серый цвет). Высокий контраст (темно-серый цвет) наблюдается в виде линейной цепочки фрагментов в восточной части квартала «М» в примыкании к проспекту Ленина. Эти фрагменты длиной примерно от 60 до 180 м соответствуют участкам ослабленного скального массива песчаника малопрочной категории со значениями R_c ниже 15 МПа [26]. Доля таких образований по отношению к

общему количеству точек ДИЗ, в которых изучена площадь квартала «М», составляет 11,4%. Существенно больше (в три раза!) доля участков массива песчаника средней и прочной категории со значениями от 40,05 до 95,63 МПа. Эти участки со светлым и темным цветом в виде чередующихся почти меридиональных полос шириной около 60-120 м и длиной от 60 до 330 м сосредоточены в центральной и северо-западной части квартала «М».

Возникает вопрос: с какой ошибкой определены расчетные значения прочности массива песчаника? Прежде чем ответить на этот вопрос сделаем следующее пояснение.

В практике постановки натуральных экспериментов существуют два способа определения ошибок. Оба способа одинаковы в своей сути. Применительно к конкретным условиям первый способ состоит в сопоставлении расчетных значений прочности с результатами контрольного (заверочного) бурения изыскательских скважин в разных местах квартала «М» с отбором проб грунта из скважин на глубине 7-14 м. Разница между значениями расчетной прочности и контрольными значениями лабораторной прочности принимается за ошибку вероятностной модели.

Первый способ ценен тем, что предоставляет возможность удостовериться в том, насколько и в какую сторону изменится ошибка модели в иных условиях применения в сравнении с теми условиями, при которых модель была построена. Однако из-за организационной сложности и большой стоимости даже минимального контрольного объема буровых и лабораторных работ первый способ редко применяется. По этой причине этот способ не применялся в квартале «М», где в условиях структурной неоднородности массива песчаника для получения корректной оценки точности модели требовалось бурение не менее 10-15% скважин от общего количества точек ДИЗ с детальным, а не редким отбором проб грунта.

В общем случае для решения диагностических и/или прогнозных задач с построением вероятностных моделей такого критериального соотношения не придерживаются. Исходя из экономических соображений, оценку достоверности, качества и точности решения таких задач методами геофизики делают по одной-трем контрольным скважинам. Такой ограниченный подход вполне оправдан в структурной геофизике при поисках нефтегазовых месторождений, где бурение одной глубокой скважины до первых километров сопряжено с очень большими затратами труда, времени и финансов. Для инженерной геофизики с бурением контрольных скважин глубиной в первые десятки метров ограниченный контроль не пригоден. В особенности в криолитозоне из-за повышенной степени изменчивости свойств и состояния верхней части мерзлой геологической среды. В случае применения такого контроля ошибки приобретают неустойчивый случайный характер с непредсказуемым изменением в сторону завышения или занижения. По таким ошибкам уже нельзя принимать взвешенные однозначные инженерно-технические решения о точности вероятностной модели и инженерно-геологических возможностях метода геофизики, по данным которого она построена.

Второй способ более доступен и постоянно применяется экспериментаторами в натуральных (природных) условиях. В квартале «М» применение второго способа состояло в сопоставлении расчетных значений прочности массива песчаника и тех лабораторных значений прочности образцов песчаника, по которым была построена вероятностная модель г. Нерюнгри. Разность между этими значениями, как и в первом способе принималась за ошибку модели, по которой в свою очередь оценивалась степень точности модели. Уместно добавить, что в геофизике степень точности метода или

вероятностной модели принято оценивать по величине не абсолютной, а относительной ошибки.

Подробный анализ ошибок вероятностной модели, построенной для инженерно-геологических условий застроенной территории г. Нерюнгри сделан в журналах «Криосфера Земли» [21] и «Недропользование XX век» [24]. В соответствии с этими источниками при среднем нулевом значении единичные абсолютные ошибки модели, полученные с применением модернизированного уравнения степенной функции, варьирует от $-9,50$ до $+7,63$ МПа. С вероятностью около 70% абсолютные ошибки не превышают $\pm(2-3)$ МПа, а относительные ошибки сосредоточены в диапазоне $\pm 20,3\%$. Это означает, что в случае дальнейшего применения вероятностной модели в остальных жилых кварталах г. Нерюнгри есть основание ожидать, что в 7 из 10 случаев средняя прочность массива песчаника на глубине 7-14 м будет оцениваться по данным метода ДИЗ с ошибкой практически равной ошибке лабораторного определения прочности образцов скально-полускальных грунтов. Напомним, что ГОСТ 21135.2-84 допускает лабораторную ошибку определения прочности этих грунтов равную $\pm 20,0\%$ [2].

Таким образом, картина относительной изменчивости на площадке квартала «М» расчетной прочности массива песчаника в прогнозном водонасыщенном состоянии не только достоверна по сочетанию морфологических признаков (фоновой закономерности и аномальных особенностей), но и вдобавок точно по показателю относительной ошибки.

Заключение

Технологические геомеханические исследования возможностей геофизического метода ДИЗ, выполненные в криолитозоне Южной Якутии на примере жилого квартала «М» г. Нерюнгри, оказались плодотворными. В частном порядке доказана возможность метода ДИЗ решать одну из важнейших задач геомеханики. А именно, в наиболее сложном по изменчивости слое годовых теплооборотов количественно оценивать в прогнозируемом водонасыщенном состоянии прочность массива песчаника в пределах сферы его механического и теплового взаимодействия с инженерными сооружениями. Физической основой ранее неизвестного решения этой прогнозной задачи со стороны метода ДИЗ служит изучение закономерного процесса нелинейного затухания в слое годовых теплооборотов гармонического высокочастотного поля вертикального магнитного диполя. Установлено, что мера затухания этого поля сильно зависит от изменчивости прочностной лабораторной характеристики. Благодаря этому оказалось возможным построить вероятностную модель прогноза и по ее уравнению степенной функции вычислять средние значения прочности водонасыщенного массива песчаника с ошибкой не более $\pm 25\%$. По ГОСТ 21135.2-84 [2] этот уровень ошибки практически соответствует допустимой ошибке лабораторного определения прочности образцов скально-полускальных

грунтов. Статистика результатов применения вероятностной модели удостоверяет, что в прогнозируемых неблагоприятных инженерно-геологических условиях (водонасыщенном состоянии) массив песчаника по ГОСТ 25100-2020 [26] остается скальным основа-

нием оснований инженерных сооружений в квартале «М». В таком состоянии с вероятностью около 70% массив классифицируется как категория скальных грунтов средней прочности со значениями 17,55-50,95 МПа.

Список использованных источников

1. Л. Г. Нерадовский. Технология изучения мерзлых грунтов криолитозоны России по затуханию электромагнитных полей//Инновации, 2018, № 11 (241). С. 122-135.
2. ГОСТ 21135.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. М.: Изд-во стандартов, 1984. 7 с.
3. О. К. Воронков. Инженерная сейсмика в криолитозоне (изучение строения и свойств мерзлых и талых горных пород и массивов). СПб.: Изд-во ОАО ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2009. 401 с.
4. А. И. Савич, З. Г. Яценко. Исследование упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами/Под ред. А. М. Епинатьевой. М.: Изд-во «Недра», 1979. 214 с.
5. Рекомендации по методике составления геофизических схем (моделей) скальных массивов в основаниях бетонных плотин. П 96-81. Ленинград: Изд-во ВНИИГ, 1981. 113 с.
6. Рекомендации по изучению методами инженерной сейсмики статических и динамических характеристик деформируемости скальных оснований гидросооружений в северной строительной-климатической зоне (ССКЗ). П 19-85. Ленинград: Изд-во ВНИИГ, 1985. 102 с.
7. Рекомендации по определению физико-механических свойств мерзлых грунтов геофизическими методами. ПНИИИС. Москва: Стройиздат, 1989. 56 с.
8. Южная Якутия: мерзлотно-гидрогеологические и инженерно-геологические условия Алданского горнопромышленного района/Под ред. В. А. Кудрявцева. Москва: Изд-во МГУ, 1975. 444 с.
9. В. М. Желинский. Мезозойская угленосная формация Южной Якутии. Новосибирск: Наука, 1980. 119 с.
10. С. Н. Булдович, В. С. Мелентьев, М. С. Наумов, О. С. Фурикевич. Роль новейших разрывных нарушений в формировании мерзлотно-гидрогеологических условий (на примере Нерюнгринской синклинали Южно-Якутского мезозойского прогиба)//Мерзлотные исследования. Вып. XV. Москва: Изд-во МГУ, 1976. С. 120-125.
11. Л. Г. Нерадовский. Технология электромагнитного зондирования мерзлых грунтов слоя годовых теплооборотов. Москва: Изд. дом «Научное обозрение», 2018. 622 с.
12. В. И. Иголкин, Г. Я. Шайдулов, О. А. Тронин, М. Ф. Хохлов. Методы и аппаратура электроразведки на переменном токе. Красноярск: СФУ, 2016. 272 с.
13. История — Институт геофизики УрО РАН. Электронные текстовые данные. Официальный сайт Института геофизики УрО РАН. <http://igfuran.ru/struktura/laboratoriya-ekologicheskoy-geofiziki/istoriya>.
14. J. Boaga. The use of FDEM in hydrogeophysics: A review//Journal of Applied Geophysics. 2017. Vol. 139. P. 36-46.
15. J. A. Doolittle, E. C. Brevik. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies//Geoderma. 2014. Vol. 223-225. P. 33-45.
16. A. N. Sartorelndi, R. B. French. Electro-magnetic induction methods for mapping permafrost along northern pipeline corridors//Prog. 4th CAN. Permafrost Conf. Geophysics and Subsea Permafrost, 1982. P. 283-295.
17. J. D. McNeill. EM-34-3 survey interpretation techniques. Technical Note TN-8. Geonics Limited Mississauga. Ontario, Canada, 1980. 15 p.
18. В. А. Давыдов. Двумерная инверсия индукционных зондирований//Вопросы естествознания. № 1 (15). 2018. С. 62-69.
19. Комплекс СЭМЗ (среднечастотного электромагнитного зондирования): техническое описание. Красноярск: НПО «Сибцветметавтоматика», 1991. 30 с.
20. В. Ф. Лебедев, В. И. Онущенко, Л. М. Литвинцева. Комплекс СЭМЗ: методическое пособие. Красноярск: НПО «Сибцветметавтоматика», 1991. 60 с.
21. Л. Г. Нерадовский. 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.
22. H. Basarir, L. Tutluoglu, C. Karpuz. Penetration rate prediction for diamond bit drilling by adaptive neuro-fuzzy inference system and multiple regressions//Eng. Geology. 2014. Vol. 173. P. 1-9.
23. А. П. Кулаичев. Методы и средства комплексного анализа данных. Москва: Изд-во Форум, Инфра-М, 2006. 512 с.
24. Л. Г. Нерадовский. 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.
25. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (Петрофизика): справочник геофизика. Москва: Изд-во «Недра», 1976. 527 с.
26. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. Москва: Изд-во «Стандартинформ», 2020. 38 с.

References

1. L. G. Neradovskij. Tekhnologiya izucheniya merzlykh gruntov kriolitozony Rossii po zatuhaniyu elektromagnitnykh polej//Innovation. 2018. № 11 (241). P. 122-135.
2. GOST 21135.2-84. Porody gornyye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom szhatii [Rocks. Methods for determining uniaxial compression strength]. Moskva: Izdvo standartov, 1984. 7 p.
3. O. K. Voronkov. Inzhenernaya sejsmika v kriolitozone (izucheniye stroeniya i svoystv merzlykh i talykh gornnykh porod i massivov) [Engineering Seismology for Permafrost (Investigations of the Structure and Properties of Frozen and Thawed Rocks and Masses)]. Saint Petersburg: Izdvo OAO VNIIG im. B. E. Vedeneeva, 2009. 401 p.
4. A. I. Savich, Z. G. Yashchenko. Issledovanie uprugih i deformatsionnykh svoystv gornnykh porod sejsmoakusticheskimi metodami/ Pod red. A. M. Epinat'evoy [Study of Elastic and Deformation Properties of Rocks by Seismoacoustic Methods. Ed. A. M. Epinatieva]. Moskva: Izdvo Nedra, 1979, 214 p.
5. Rekomendatsii po metodike sostavljeniya geofizicheskikh skhem (modelej) skal'nykh massivov v osnovaniyakh betonnykh plotin. P 96-81. [Guidelines for the Compilation of Geophysical Schemes (Models) of Rock Masses in the Foundations of Concrete Dams]. Leningrad: Izdvo VNIIG, 1981. 113 p.
6. Rekomendatsii po izucheniyyu metodami inzhenernoj sejsmiki staticheskikh i dinamicheskikh harakteristik deformiruемости skal'nykh osnovanij gidrosooruzhenij v severnoj stroitel'no-klimaticheskoy zone (SSKZ). 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: Izdvo VNIIG, 1985. 102 p.
7. Rekomendatsii po opredeleniyu fiziko-mekhanicheskikh svoystv merzlykh gruntov geofizicheskimi metodami [Recommendations for determining the physical and mechanical properties of frozen soils by geophysical methods]. PNIIS. Moscow: Stroyizdat, 1989. 56 p.
8. Yuzhnaya Yakutiya: merzlotno-gidrogeologicheskije i inzhenerno-geologicheskije usloviya Aldanskogo gornopromyshlennogo rajona [Southern Yakutia. Permafrost hydrogeological and engineering-geological conditions of the Aldan mining region]/V. A. Kudryavtsev (Ed.). Moscow: Moscow State University Press, 1975. 444 p.
9. V. M. Zhelinskij. Mezozoj'skaya uglensnaya formaciya Yuzhnoj Yakutii [Mesozoic coal-bearing formation of South Yakutia]. Novosibirsk: Nauka, 1980. 119 p.
10. S. N. Buldovich, V. S. Melent'ev, M. S. Naumov, O. S. Furikovich. Rol' novjshih razryvnykh narushenij v formirovanii merzlotno-gidrogeologicheskikh uslovij (na primere Neryungrinskoj sinklinali Yuzhno-Yakut'skogo mezozoj'skogo progiba)//Merzlotnyye issledovaniya [Permafrost research]. Issue XV. Moskva: Izd-vo MGU, 1976. P. 120-125.
11. L. G. Neradovskij. Tekhnologiya elektromagnitnogo zondirovaniya myorzlykh gruntov sloya godovykh teplooborotov [Technology of electromagnetic sounding of frozen soils of the layer of annual heat exchanges]. Moskva: Izd. dom Nauchnoe obozrenie, 2018. 622 p.
12. V. I. Igolkin, G. Ya. Shaydurov, O. A. Tronin, M. F. Khokhlov. Metody i apparatura elektrorazvedki na peremennom toke [The Methods and Equipment of Electrical Prospecting with Alternating Current]. Krasnoyarsk: SFU, 2016. 272 p.
13. Istoriya — Institut geofiziki Uro RAN [History — Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences]. Elektronnyye tekstovyye dannyye. Oficial'nyj sayt Instituta geofiziki Uro RAN. <http://igfuran.ru/struktura/laboratoriya-ekologicheskoy-geofiziki/istoriya>.
14. J. Boaga. The use of FDEM in hydrogeophysics: A review//Journal of Applied Geophysics. 2017. Vol. 139. P. 36-46.
15. J. A. Doolittle, E. C. Brevik. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies//Geoderma. 2014. Vol. 223-225. P. 33-45.
16. A. N. Sartorelndi, R. B. French. Electro-magnetic induction methods for mapping permafrost along northern pipeline corridors//Prog. 4th CAN. Permafrost Conf. Geophysics and Subsea Permafrost, 1982. P. 283-295.
17. J. D. McNeill. EM-34-3 survey interpretation techniques. Technical Note TN-8. Geonics Limited Mississauga. Ontario, Canada, 1980. 15 p.
18. V. A. Davydov. Dvumernaya inverziya indukcionnykh zondirovanij//Questions of natural science. Vol 1 (15). 2018. P. 62-69.
19. Kompleks srednечастотnoj apparatury elektromagnitnogo zondirovaniya (SEMZ): texnicheskoe opisanie [System of medium-frequency equipment for electromagnetic sounding (SEMS): technical description]. Krasnoyarsk: NPO Sibsvetmetavtomatika USSR, 1991. 30 p.

20. V. F. Lebedev, V. I. Onushchenko, L. M. Litvintseva. Kompleks SEMZ: metodicheskoe posobie [The MFES Unit: methodical guide]. Krasnoyarsk: NPO Sibsvetmetavtomatika, 1991. 60 p.
21. L. G. Neradovskij. Veroyatnostnaya model' prognoza prochnosti peschanikov metodom distancionnogo induktivnogo zondirovaniya v kriolitozone Yuzhnoj Yakutii (na primere g. Neryungri)//Cryosphere of the Earth. 2022. Vol. XXVI. № 6. P. 43-57. doi: 10.15372/KZ20220605.
22. H. Basarir, L. Tutluoglu, C. Karpuz. Penetration rate prediction for diamond bit drilling by adaptive neuro-fuzzy inference system and multiple regressions//Eng. Geology. 2014. Vol. 173. P. 1-9.
23. A. P. Kulaichev. Metody i sredstva kompleksnogo analiza dannykh [Methods and means of complex data analysis]. Moscow: Forum, Infra-M, 2006. 512 p.
24. L. G. Neradovskij. Ocenka prochnostnogo sostoyaniya skal'no-poluskal'nogo osnovaniya inzhenernykh sooruzhenij g. Neryungri v kriolitozone Yuzhnoj Yakutii po dannym geofiziki (metoda distancionnogo induktivnogo zondirovaniya)//Subsoil use XXI century. 2022. № 4 (96). P. 91-97.
25. Fizicheskie svojstva gornyh porod i poleznyh iskopaemyh (Petrofizika): spravochnik geofizika [Physical properties of rocks and minerals (Petrophysics): handbook of geophysics]. Moscow: Nedra, 1976. 527 p.
26. GOST 25100-2020. Grunty. Klassifikaciya [Soils. Classification]. Moscow: Standartinform, 2020. 38 p.