

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

УДК 550.379

DOI: 10.15372/KZ20220605

**ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗА ПРОЧНОСТИ ПЕСЧАНИКОВ
МЕТОДОМ ДИСТАНЦИОННОГО ИНДУКТИВНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
В КРИОЛИТОЗОНЕ ЮЖНОЙ ЯКУТИИ
(НА ПРИМЕРЕ Г. НЕРЮНГРИ)****Л.Г. Нерадовский***Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; leoner@mpi.ysn.ru*

Рассмотрен результат ретроспективного анализа материалов метода дистанционного индуктивного зондирования. Материал получен в 1990-х гг. в г. Нерюнгри с целью изучения вероятностных отношений между характеристикой временного предела прочности на одноосное сжатие водонасыщенных образцов песчаника и коэффициентом, определяющим меру затухания в мерзлом массиве песчаника гармонического поля высокочастотного вертикального магнитного диполя на частоте 1.125 МГц. Показано, что закономерный рост коэффициента, вызванный снижением прочности массива песчаника, корректно описывается уравнением логистической функции. Обратная регрессионная связь адекватно описывается уравнением степенной функции и рассматривается как вероятностная модель прогноза средних значений временного предела прочности на одноосное сжатие уже не образцов, а водонасыщенного массива песчаника по значениям данного коэффициента. Относительная ошибка прогноза модели с вероятностью 70–80 % составляет $\pm(27.7-32.0)$ %. Она невелика и близка к предельно допустимой ошибке лабораторного определения средней прочности образцов скально-полускальных грунтов (± 20 %). Отсюда следует возможность применения метода дистанционного индуктивного зондирования с целью районирования по категории прочности оснований инженерных сооружений в г. Нерюнгри или других местах островной криолизотроны Южной Якутии со сходными инженерно-геологическими условиями.

Ключевые слова: прочность, массив песчаника, метод дистанционного индуктивного зондирования, поле высокочастотного вертикального магнитного диполя, коэффициент уменьшения амплитуды, статистика, гистограммы и вариограммы, вероятностная модель, ошибки прогноза.

**A PROBABILISTIC MODEL FOR PREDICTING SANDSTONE STRENGTH
USING ELECTROMAGNETIC INDUCTION SOUNDING
IN THE SOUTHERN YAKUTIAN PERMAFROST REGION:
A CASE STUDY IN NERYUNGRI****L.G. Neradovskii***Melnikov Permafrost Institute, SB RAS,
Merzlotnaya str. 36, Yakutsk, 677010, Russia; leoner@mpi.ysn.ru*

This paper presents a retrospective analysis of the geometric electromagnetic induction (EMI) sounding data. The data were acquired in the 1990s in the city of Neryungri to determine probabilistic relationships between unconfined compressive strength of saturated sandstone samples and the attenuation coefficient of the harmonic field induced by a high-frequency vertical magnetic dipole at 1.125 MHz in frozen sandstone rock mass. The results indicate that the consistent increase in the attenuation coefficient with decreasing strength of sandstone rock mass is correctly described by a logistic function equation. The inverse regression relationship is adequately described by a power function equation which can be used as a probabilistic model for predicting mean values of unconfined compressive strength of saturated sandstone rock mass (but not only sandstone rock samples) from the attenuation coefficient. The relative error of model predictions at the 70–80 % confidence level is $\pm(27.7-32)$ %, which is close to the limit of allowable error (± 20.0 %) for laboratory measurements of mean strength of rock samples. This provides favorable conditions for applying the geometric EMI method in rock strength mapping for geotechnical engineering in Neryungri, as well as in areas of similar geology in southern Yakutia with sporadic permafrost.

Key words: strength, sandstone rock mass, geometric electromagnetic induction sounding, field of high-frequency vertical magnetic dipole, amplitude decrease coefficient, statistics, histograms and variograms, probabilistic model, prediction error.

ВВЕДЕНИЕ

Вероятностным моделям большое значение придавал В.С. Якупов, видя большие возможности методов геоэлектрики в решении задач петрофизики в криолитозоне России [Якупов и др., 1998]. Этот класс физико-геологических моделей, в разработку которых первоочередной вклад внес Г.С. Вахромеев, весьма содержателен и необходим для наиболее полного и достоверного решения задач прогноза методами геофизики. Эти модели несут в себе не разрозненные единичные факты, а обобщенные знания о закономерных вероятностных отношениях между геолого-геофизическими характеристиками Земли. На необходимость применения методов геофизики для решения задач прогноза состояния криолитозоны обращал внимание В.П. Мельников [1977]: “Необходимы сведения о том, как параметры электромагнитного поля характеризуют не отдельные элементы интересующей нас части разреза, а в целом, участок, район, тип ландшафта и т. д. Критериями оценок могут выступать типы кривых ВЭЗ” (с. 60).

В настоящей работе рассматривается решение одной из задач геомеханики мерзлых грунтов. А именно, задачи вероятностного прогноза средней прочности мерзлого высокотемпературного массива песчаника по данным метода дистанционного индуктивного зондирования (ДИЗ). Такая задача важна для проектно-исследовательских и горно-геологических работ. В первом случае массив служит основанием инженерных сооружений г. Нерюнгри, во втором – слагает в Южно-Якутском бассейне борта карьеров месторождений.

Задача прогноза решена классическим путем сравнения и увязки между собой значений двух геолого-геофизических характеристик. Со стороны геологии рассматривается лабораторная характеристика R_c – временной предел прочности на одноосное сжатие образцов песчаника в водонасыщенном состоянии (прочностная характеристика R_c). Со стороны геофизики рассматривается характеристика затухания гармонического высокочастотного поля вертикального магнитного диполя (ВВМД) в мерзлом высокотемпературном массиве песчаника. За количественную оценку меры интегрального затухания поля ВВМД в пределах слоя годовых теплооборотов принят коэффициент уменьшения амплитуды вертикальной составляющей поля в зависимости от разноса дипольной установки метода ДИЗ (далее – коэффициент k). О важности слоя годовых теплооборотов для строительства и эксплуатации инженерных сооружений писал А.Т. Акимов [1971, с. 10], образно и точно называя его “фабрикой” криогенных процессов.

Представленный в настоящей статье результат ретроспективного анализа данных метода ДИЗ, полученных в г. Нерюнгри в 90-х гг. прошлого века, вполне оправдал выбор коэффици-

ента k . Впервые между ним и прочностной характеристикой R_c была изучена статистическая связь. На этой основе была построена ранее неизвестная вероятностная модель, предназначенная для прогноза средней прочности массива песчаника в водонасыщенном состоянии. Модель дополняет результаты петрофизических исследований в островной криолитозоне Южной Якутии с помощью каротажа скважин [Гриб, Самохин, 1999] и метода георадиолокации [Нерадовский, Сясько, 2015; Нерадовский, Федорова, 2015].

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Единственной обзорной работой по Южной Якутии с применением обширного фактического материала, а также разноплановой его систематизацией можно без всякого сомнения считать работу, выполненную коллективом сотрудников МГУ под руководством В.А. Кудрявцева [Южная Якутия, 1975]. В ней приведены сведения обо всех сторонах природной обстановки Южной Якутии до начала ее промышленного освоения. В соответствии с ними район исследований, включающий г. Нерюнгри, расположен в зоне складчатости по краевому шву Предстанового прогиба на южной окраине Алданского плоскогорья в пределах Чульманской впадины, выполненной угленосными осадочными породами юры и нижнего мела. В южной части Чульманского плато (в бассейне среднего течения р. Чульман) на отложениях горькитской свиты согласно залегают отложения холдниканской свиты нижнего мела (песчаники с прослоями конгломератов, алевролиты, каменный уголь), выполняющие ядро Нерюнгринской синклинали с разрывными дислокациями. Этот тектонический фактор накладывает особый отпечаток на всю криолитозону Южной Якутии [Булдович и др., 1976]. В целом район исследований отличается сложным инженерно-геокриологическим обликом, главной чертой которого является неоднородность и динамичность мерзлотно-грунтовых условий. Эта природная черта проявляется в значительной глубине сезонного оттаивания–промерзания (порядка 3–6 м) с возможностью многократного перехода мерзлых пород в талое состояние, и наоборот.

Город Нерюнгри является административным центром Южной Якутии и расположен почти в 800 км на юго-запад от г. Якутска. Город занимает вершину и склоны водораздела рек Чульман, Верх. Нерюнгри, Малый Беркакит и Амнуннакта. Абсолютные высоты рельефа водораздела изменяются от 773 до 868 м. Водораздельные поверхности имеют мягкие мерзлотные условия с развитием островной мерзлоты небольшой мощности (20–50 м) и среднегодовой температурой в нижней части слоя годовых теплооборотов, близкой к 0 °С. Естественный температурный режим мерзл-

ты 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.

Изменчивый в пространстве (по латерали и глубине) и неустойчивый во времени природный температурный режим коренных пород в г. Нерюнгри был нарушен в ходе строительства и эксплуатации инженерных сооружений. За всю историю города, начиная с 1975 г., на некоторых его участках произошла полная деградация мерзлоты. По результатам обобщения данных термометрии изыскательских скважин, температура на участках деградации мерзлоты на глубине 10 м изменялась от 0 до 6.5 °С. На участках сохранившейся мерзлоты мощностью 13–18 м среднегодовая температура на глубине 10 м составляла $-(0.4 \pm 0.1)$ °С.

Анализ данных Южно-Якутского треста инженерно-строительных изысканий (ЮжЯкутТИСИЗ) позволяет сделать ряд обобщений относительно геологического строения территории г. Нерюнгри.

Во-первых, мощность делювия–элювия, покрывающего сплошным плащом коренные породы, выдержана по площади и в среднем составляет 2–3 м. Во-вторых, коренные породы осадочного генезиса залегают с небольшим углом падения. В-третьих, до глубины 6–7 м коренные породы сильно разуплотнены физическим выветриванием, а ниже до максимальной глубины проходки скважин (10–20 м), находятся в относительно сохранном прочностном состоянии. В-четвертых, коренные породы сложены преимущественно песчаником, который встречается почти в каждой скважине с вероятностью 97 %. Вероятность встречи других пород – прослоев или слоев алевролита, углистого аргиллита и пластов угля – составляет 18, 8, 29 % соответственно. В-пятых, в массиве относительно сохранного песчаника чаще всего встречаются блоки средней прочности. Вероятность встречи блоков песчаника малой, пониженной или высокой прочности равна 26, 41, 50 %.

Приведенная статистика не противоречит данным по углевмещающим породам Алдано-Чульманского угольного бассейна. Например, по данным В.М. Желинского [1980], во всех свитах Южной Якутии преобладает песчаник (мелко-, средне- и крупнозернистый). Его доля изменяется от 52.6 % в дурайской свите до 86.5 % в юхтинской свите. В нерюнгринской свите, пространственно близкой к территории г. Нерюнгри, доля песчаника мелко- и среднезернистого составляет 78.7 %.

МЕТОД ДИСТАНЦИОННОГО ИНДУКТИВНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Изучение в г. Нерюнгри процесса затухания поля ВВМД в мерзлом высокотемпературном массиве песчаника выполнялось в пределах слоя годовых теплооборотов методом ДИЗ с аппаратурой среднечастотного электромагнитного зондирования (СЭМЗ), изготовленной НПО “Сибцветмет-автоматика” (г. Красноярск). Эта техника измерений давала возможность изучать на четырех фиксированных частотах (0.281, 0.562, 1.225, 2.250 МГц) все составляющие эллипса поляризации суммарного поля ВВМД и по ним определять эффективные значения электрического сопротивления ρ_{ef} и диэлектрической проницаемости ϵ_{ef} [Комплекс..., 1991]. Современным аналогом аппаратуры СЭМЗ является цифровая аппаратура КАВ-ЭММ. До 2016 г. она изготавливалась ООО “Ар Ди Сайнс” в г. Красноярске с участием сотрудников Сибирского федерального университета. В 1990-х гг. аппаратура СЭМЗ считалась уникальной по технико-экономическим параметрам как в трестах инженерно-строительных изысканий, так и в геолого-разведочных предприятиях. Стоит заметить, что антенны аппаратуры СЭМЗ имеют круглую форму с внешним диаметром 32 см. Ток в антенне ПРД регулируется в блоке питания от 0 до 100 мкА. Динамический диапазон микровольтметра 70 дБ (от 0.5 до 1000 мкВ).

В нашей стране метод ДИЗ классифицировался как геометрический вариант методов геоэлектрики на переменном токе. За рубежом результаты работ методом ДИЗ публикуются под названием ЕМІ (electromagnetic induction). Ссылки в них делают чаще всего на аппаратуру ЕМ-31 и ЕМ-38. Общий обзор аппаратуры ЕМІ есть в работе Дж. Боага [Boaga, 2017].

История метода ДИЗ в нашей стране, начиная с 60-х гг. прошлого века, кратко описана в работе В.И. Иголкина и др. [2016]. Кроме того, много интересного и поучительного о развитии индуктивных методов на Урале можно узнать на сайте Института геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН. В этом институте благодаря исследованиям заведующего лабораторией индукционной электроразведки Г.В. Астраханцева и его сотрудника В.С. Титлинова и была создана технология метода ДИЗ. Почти в неизменном виде она много лет применялась с аппаратурой ДЭМП-СЧ, АЧЗ-78 и МЧЗ-8, МЧЗ-10 при поисках месторождений медно-колчеданных руд и для решения других геологических задач.

Подробно метод ДИЗ изложен в работах [Вешев и др., 1978; Журавлева и др., 1994; Титлинов, Журавлева, 1995; Задериголова, 1998] и в Инструкции по электроразведке [1984].

Методика изучения процесса затухания поля ВВМД в слое годовых теплооборотов прошла

многолетнюю успешную апробацию в Республике Саха (Якутия) и частично в Забайкальском крае, Амурской области [Нерадовский, 2018] и состоит в следующем. В точке зондирования на высоте около 1 м неподвижно устанавливается передающая антенна (ПРД) с постоянной частотой излучения поля ВВМД. Плоскость антенны устанавливается параллельно линии дневной поверхности. Приемная антенна (ПРМ) удаляется от антенны ПРД с шагом 2–5 м на расстояние (разнос) от 3–5 до 50–60 м. При горизонтальном положении антенны ПРМ микрольтметром аппаратуры СЭМЗ измеряют амплитуду вертикальной составляющей (H_z) поля ВВМД, а в вертикальном положении – горизонтальной составляющей (H_r). Результат измерений, полученный на высоте, равной высоте расположения антенны ПРД, по правилам Инструкции по электроразведке [1984] относят к точке стояния антенны ПРД. Совокупность измерений значений H_z , H_r или других составляющих эллипса поляризации поля ВВМД в зависимости от разноса принято называть сигналом ДИЗ.

Опыт применения метода ДИЗ в разных инженерно-геологических условиях криолитозоны Якутии показывает, что почти во всех случаях на графиках сигналов ДИЗ наблюдается закономерное нелинейное уменьшение значений амплитуд H_z и H_r , описываемое уравнением степенной функции с высоким коэффициентом множественной детерминации (R^2). Значение показателя степенной функции присваивается коэффициенту k . В этом состоит главное отличие метода ДИЗ от его обычного применения в нашей стране и за рубежом с единственной целью изучения в килогерцовом диапазоне частот эффективного электрического сопротивления ρ_{ef} . Безусловно, изучать нужно и эту важную в геоэлектрике статическую характеристику электрического поля. Однако результат изучения применительно к решению задач геологии станет весомее при дополнении его новыми данными о затухании поля ВВМД в слое годовых теплооборотов. К сожалению, эта важнейшая и слабоизученная сторона энергетического взаимодействия поля ВВМД с неоднородной анизотропной геологической средой неинтересна геофизикам. Начиная с 1970-х гг. за рубежом только тем и занимаются, что, не выходя за пределы килогерцового диапазона частот, расширяют границы научно-практического применения метода ЕМІ с целью изучения ρ_{ef} . Об этом написано в обзорной работе [Doolittle, Brevik, 2014]. Лишь в от-

дельных ранних работах, например, в [Sartorealndi, French, 1982] и отчете департамента транспорта и государственных учреждений штата Аляски со ссылкой на [McNeill, 1980], обращено некоторое внимание на динамическую сторону сигналов ДИЗ, но не более как на индуктивный отклик от слоев нижнего полупространства¹. Однако делается это, опять же, односторонне, в контексте изучения ρ_{ef} без учета затухания поля вертикального магнитного диполя (ВМД). Причина нежелания отечественных и зарубежных коллег исследовать процесс затухания этого поля на низких и тем более высоких частотах в точности неизвестна. Возможно, этому мешает стереотип мышления в отношении математической и физической некорректности решения данной задачи в условиях экранирующего влияния первичного поля ВМД на слабый по величине индуктивный отклик геологической среды во вторичном поле². В ближней зоне источника первичного поля его влияние на вторичное поле настолько сильно, что препятствует получению правильных и достоверных представлений о петрофизике нижнего полупространства. Влияние сохраняется и в переходной зоне источника, но оно ослаблено до такой степени, что уже не мешает достоверно изучать в суммарном поле индукционный эффект в зависимости от внутреннего облика всей геологической среды [Нерадовский, 2018].

В г. Нерюнгри работы методом ДИЗ были выполнены в 90-х гг. XX в. в ходе постановки опытно-методических экспериментов с целью изучения инженерно-геологических возможностей этого нового и перспективного метода. По рекомендациям геофизиков ПО “Якутзолото”, имевших большой практический опыт работ методом ДИЗ, массив песчаника исследовался на частоте 1.125 МГц при разнесе 5–50 м с измерением H_z и H_r с единственной целью определения по их отношению значений ρ_{ef} . При ретроспективном анализе данных метода ДИЗ цель изменилась. Предметом внимания стала только вертикальная составляющая поля ВВМД для определения по ней значений коэффициента k . Причина такой избирательности заключается в более высокой геологической информативности H_z по сравнению с H_r . По данным А.А. Петровского [1971], H_z несет в себе около 70 % информации об аномальных объектах, которые расположены в нижнем полупространстве. Более того, практический опыт показывает, что H_z в меньшей степени зависит от влияния помех (рельефа, инженерных сооружений и пр.).

¹ Так в теоретических исследованиях геофизики называют геологическую среду.

² Автор настоящей статьи был свидетелем аналогичной ситуации, когда в середине 80-х годов прошлого века в Гострое РСФСР начались научно-производственные испытания первых отечественных образцов георадаров. В то время абсолютное большинство геофизиков, работавших не только в инженерно-геологических изысканиях, но и в геологоразведке, категорически отрицали реальные факты глубины зондирования в мерзлых грунтах до 20–30 м на частоте десятков–сотен мегагерц.

Измерения H_r и H_z были сделаны весной, т. е. в то время, когда сезоннотальный слой делювия-элювия полностью промерз. Благодаря этому увеличилась глубина изучения методом ДИЗ массива песчаника. Исчезло и искажающее влияние сезонноталого слоя на результат исследования затухания поля ВВМД в этом массиве.

Эффективная глубина проникновения поля ВВМД в этот слой (h_{ef}) была оценена для всей территории г. Нерюнгри по значениям параметра приведенного расстояния P , равного произведению модуля комплексного волнового числа ζ на значения разноса. Значения ζ вычислялись по формулам электродинамики сплошных сред. Их нетрудно найти в любом из учебников по электро-разведке, поэтому здесь они не приводятся.

Необходимые для вычисления ζ обобщенные оценки средних эффективных значений электрической проводимости, а также вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости (ϵ_{ef}) определялись разными путями. Проводимость оценивалась по $1/\rho_{ef}$. Среднее значение ρ_{ef} вычислялось по совокупности измерений H_z и H_r в точках ДИЗ с переводом отношения H_z/H_r к соответствующему параметру N . В неявном виде параметр учитывает частотное влияние ϵ_{ef} на ρ_{ef} . Значения N в виде таблиц приведены для H_z/H_r в работе В.И. Иголкина и др. [2016, с. 260–266]. Там же приведена формула для вычисления ρ_{ef} в виде

$$\rho_{ef} = Nr^2f, \quad (1)$$

где N – параметр учета диэлектрической проницаемости; r – разнос, м; f – частота, МГц.

Например, для значения $H_z/H_r = 1.5$, измеренного на разноте 15 м и частоте 1/125 МГц, в указанной таблице работы [Иголкин и др., 2016, с. 263] находим значение $N = 1.2$. Подставляя его в формулу (1) вместе со значениями разноса и частоты, получаем, что $\rho_{ef} = 303.8$ Ом·м.

К сожалению, значение ϵ_{ef} в представленной процедуре определения ρ_{ef} остается неизвестным. Если бы в ходе проведения опытно-методических работ были сделаны измерения большой, малой осей эллипса поляризации поля ВВМД и угла наклона к горизонту большой оси, то по специальным палеткам и номограммам [Лебедев и др., 1991] вместе со значениями ρ_{ef} были бы определены ϵ_{ef} . Однако отсутствие должного опыта на начальном этапе освоения аппаратуры СЭМЗ и метода ДИЗ воспрепятствовало осуществлению такой возможности. Недостающие значения ϵ_{ef} были найдены в результатах георадиолокации, полученных в г. Нерюнгри с георадаром ОКО-2 и антенным блоком “Тритон”, работающим на центральной частоте 50 МГц [Нерадовский, 2022].

Значения ϵ_{ef} определены стандартным способом по углу наклона ветвей годографов дифрагированных волн. Результаты определения ϵ_{ef} этим

способом подтверждены независимой контрольной проверкой, которая сделана в Москве Р.Р. Денисовым с помощью разработанной им широко известной компьютерной программы “Георадар-Эксперт”. По данным георадиолокации, послойные значения ϵ_{ef} распределены по глубине следующим образом. В нерасчлененном слое грунтов дорожного покрытия, делювиально-элювиальных отложений и сильно выветренной верхней части песчаника значения ϵ_{ef} до глубины 5–7 м изменяются в узком диапазоне от 4.12 до 4.88. В нижней, относительно сохранной части массива песчаника значения ϵ_{ef} на глубине 7–28 м равны 3.5–4.0. Снижение вызвано сменой генезиса и состава техногенно-геологических образований с закономерным уменьшением по глубине количества глинистого материала. По данным георадиолокации, среднее значение $\epsilon_{ef} = 3.93$. Это недостающее значение, полученное на частоте 50 МГц, примем для расчета модуля ζ на частоте 1.125 МГц. Разница по частоте весьма большая, но ее можно без вреда для существа дела проигнорировать, руководствуясь тем негласным решением, которое принято международным сообществом геофизиков. Речь идет о допуске применения в георадиолокации теоретических представлений о так называемой георадарной платформе, где в широком диапазоне частот от 1 МГц до 1 ГГц значения ϵ_{ef} почти не изменяются [Владов, Судакова, 2017].

Что касается характеристики электрической проводимости $1/\rho_{ef}$, то обобщенная оценка ее среднего значения на частоте 1.125 МГц и в диапазоне разноса 5–50 м равна 1/2800 Ом·м (0.000 357 См). Собственно значения ρ_{ef} определены по палеткам и номограммам [Лебедев и др., 1991] на основе совокупности значений H_z/H_r , определенных во всех точках ДИЗ, в которых изучалось затухание поля ВВМД в г. Нерюнгри. Расчет по средним значениям $1/\rho_{ef} = 0.000 375$ См и $\epsilon_{ef} = 3.93$ показал, что для этого города обобщенное значение модуля $\zeta = 0.062$ м⁻¹. Для предельных значений разноса 5 и 50 м ему соответствуют $P = 0.311$ и 3.11. Удовлетворяют ли эти значения критериям, по которым устанавливаются границы промежуточной зоны источника первичного поля ВВМД, благоприятной для работ методом ДИЗ?

Теоретически, и это хорошо известно, границы промежуточной зоны устанавливаются по критериям $P \ll 1$ (окрестности ближней зоны) и $P \gg 1$ (окрестности дальней волновой зоны). Г.В. Молочнов и М.В. Радионов [1983] считают правильным в практике работ методом ДИЗ обозначать границы промежуточной зоны по значениям P в диапазоне 1–10. В.И. Иголкин с соавт. [2016] увязывают границы промежуточной зоны с точностью измерения составляющих поля ВВМД. При порядке точности до 1 % эти исследователи устанавливают границы переходной зоны по крите-

рию $0.01 \leq P \leq 100$. В полевых условиях обеспечить такую точность невозможно, а значит, и применять предлагаемый критерий, строго говоря, нельзя. Какой же критерий выбрать? Остановимся на общем теоретическом критерии. Он, хотя и нечеткий, но применим во многих случаях. В соответствии с этим критерием определенные выше значения $P = 0.311$ и 3.11 соответствуют границам промежуточной зоны, в которой задача вероятностного прогноза прочности массива песчаника, по данным метода ДИЗ, теоретически решается корректно.

Для определения искомых обобщенных оценок средних значений h_{ef} воспользуемся графиком теоретической зависимости отношения h_{ef}/h_s от параметра P из работы В.С. Титлинова и Р.Б. Журавлевой [1995, с. 13]. Теоретическое значение максимальной мощности скин-слоя h_s (скиновой глубины, или проникновения поля ВВМД на частоте 1.125 МГц) определим по простой формуле, приведенной в этой же работе со ссылкой на учебник по электроразведке М.С. Жданова:

$$h_s = \sqrt{2}/\zeta, \quad (2)$$

где h_s – мощность скин-слоя, м; ζ – модуль волнового числа, м⁻¹.

Задавая в формулу (2) значение $\zeta = 0.062$ м⁻¹, получаем $h_s = 22.8$ м. При $P = 0.311$ по вышеуказанному графику находим $h_{ef}/h_s = 0.26$. Из этого отношения, в свою очередь, вычисляем $h_{ef} = 22.8 \cdot 0.26 = 5.9$ м. Аналогично для $P = 3.11$ и соответствующего ему отношения $h_{ef}/h_s = 0.78$ находим $h_{ef} = 17.8$ м.

Таким образом, для г. Нерюнгри принятые частота (1.125 МГц) и диапазон разноса (5–50 м)

обеспечивают корректное определение затухания поля ВВМД в относительно сохранной нижней части массива песчаника на глубине 5.9–17.8 м. Эта глубина соответствует глубине геологического изучения прочности массива по керну изыскательских скважин.

ПРОЧНОСТЬ ПЕСЧАНИКА

В лабораторных условиях количественная оценка прочности образцов песчаника, отобранных из воздушно-сухих или мерзлых монолитов керна скважин, выполнялась по значениям R_c . Эта прочностная характеристика широко и повсеместно применяется в отечественном грунтоведении. В зарубежных публикациях по геотехнике характеристика R_c применяется вместе с другими геологическими и горно-техническими характеристиками с целью построения вероятностных моделей. Например, для построения нейронной модели множественной регрессии с целью прогноза скорости проходки скважин алмазным долотом на месторождениях Турции [Basarir et al., 2014].

Из тысяч скважин, пробуренных сотрудниками ЮжЯкутГИСИЗ за время строительного освоения территории г. Нерюнгри, значения R_c удалось собрать всего лишь по 218 скважинам, но этого количества фактического материала достаточно для достоверного изучения не столько законов, сколько статистик вероятностных распределений значений R_c с помощью программы “Стадия” [Кулаишев, 2006]. При этом ошибка определения средних значений R_c в грунтовой лаборатории ЮжЯкутГИСИЗ точно неизвестна. Однако при массовых лабораторных определениях в сериях по шесть образцов, отобранных из каждого монолита керна скважин, ошибка не могла быть выше $\pm 20\%$ [ГОСТ 21153.2-84, 1984].

При среднем арифметическом и медианном значениях R_c , равных 39.1 и 40.7 МПа, единичные значения изменялись от 2.5 до 114.6 МПа с коэффициентом вариации 59.6 %. В 70 % случаев значения R_c были распределены возле средних показателей в интервале 15.8–62.4 МПа. В упорядоченном ряду роста R_c [ГОСТ 25100-2020, 2020] в г. Нерюнгри массив песчаника представлен пятью группами прочности. Первая и вторая группы (песчаник низкой и пониженной прочности с $R_c = 1–5$ МПа) встречаются редко с вероятностью 2.7 %. Вероятность встречи третьей группы (малопрочного песчаника с $R_c = 5–15$ МПа) более высокая и равна 19.3 %. С максимальной вероятностью 47.7 % встречается четвертая группа (песчаник средней прочности с $R_c = 15–50$ МПа). За ней следует с небольшим отрывом по встречаемости (вероятность 30.7 %) пятая группа (прочный песчаник с $R_c = 50–120$ МПа).

Статистика по группам значений R_c представлена в табл. 1. При законе ненормального распре-

Таблица 1. Статистика классификации лабораторных значений временного предела прочности на одноосное сжатие образцов песчаника в водонасыщенном состоянии

Показатель	R_c , МПа		
	2–4-я группы	5-я группа	6-я группа
Среднее арифметическое	10.5	34.8	65.5
Среднее медианное	11.5	38.0	58.9
Среднее модальное	18.0	16.2	54.2
Среднее взвешенное	10.5	30.8	65.9
Стандартное отклонение	12.1	11.1	16.4
Коэффициент вариации, %	31.4	32.7	25.1
Минимальное значение	2.5	15.0	50.2
Максимальное значение	14.8	49.0	114.6
Количество определений	46	104	68

Примечание к табл. 1–3. 2–4-я группы – песчаник малой, низкой и пониженной прочности ($R_c < 15$ МПа); 5-я группа – песчаник средней прочности ($R_c = 15–50$ МПа); 6-я группа – песчаник прочный ($R_c = 50–120$ МПа).

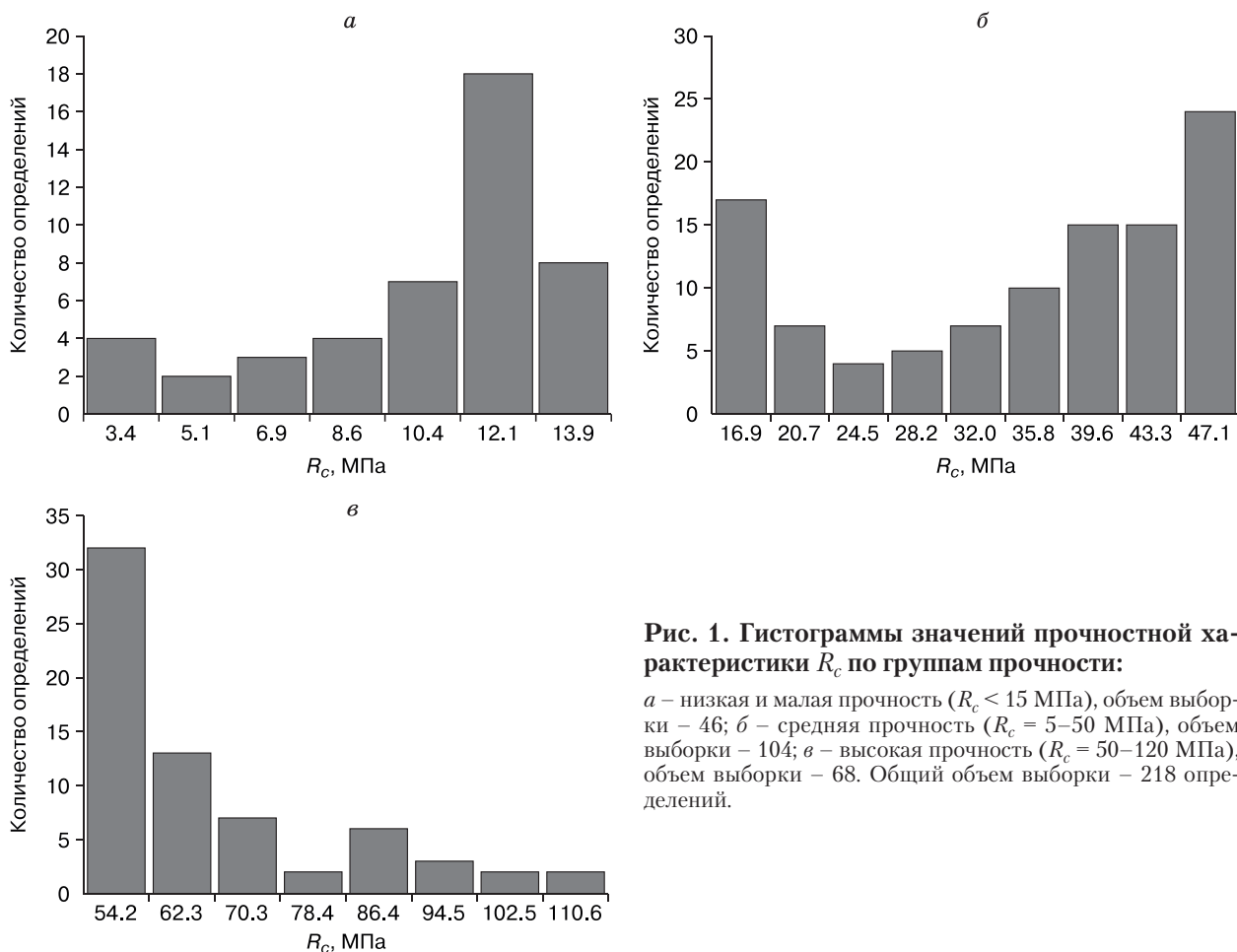


Рис. 1. Гистограммы значений прочностной характеристики R_c по группам прочности:

а – низкая и малая прочность ($R_c < 15$ МПа), объем выборки – 46; *б* – средняя прочность ($R_c = 5-50$ МПа), объем выборки – 104; *в* – высокая прочность ($R_c = 50-120$ МПа), объем выборки – 68. Общий объем выборки – 218 определений.

деления значений R_c корректным теоретическим показателем среднего положения распределения принято считать среднее медианное значение. Близость к нему показателей среднего арифметического и средневзвешенного значений указывает на то, что в г. Нерюнгри фоновое распределение значений прочности массива песчаника подчиняется закону нормального распределения. Однако при небольшом числе определений в групповых выборках (см. табл. 1) фон распределения R_c осложнен наложением на него аномальных компонент. В итоге образуется неоднородная вероятностная структура. Она проявляется в виде обособленных максимумов на концах гистограмм с аномально низкими <10.4 МПа (рис. 1, *а*) или высокими >70.3 МПа (рис. 1, *в*) значениями R_c при небольшой частоте их появления.

Области аномальных значений R_c рассматриваются как редкие события, указывающие на появление в основании инженерных сооружений г. Нерюнгри двух противоположных групп массива песчаника – малой и высокой прочности. Наиболее часто в основании инженерных сооружений

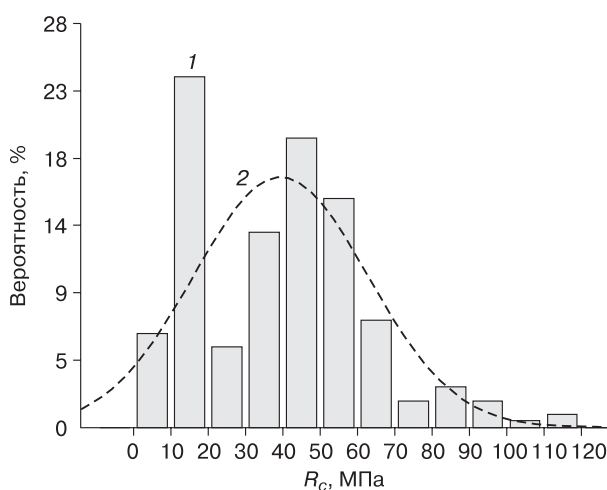


Рис. 2. Сводная фактическая гистограмма (1) и теоретическая вариограмма (2) закона нормального вероятностного распределения значений прочностной характеристики R_c .

Объем выборки – 218 определений.

встречаются участки массива песчаника средней прочности и отчасти малой прочности. Эти события обнаруживаются по максимумам общей гистограммы характеристики R_c (рис. 2). Первый максимум с модой 10–20 МПа идентифицирует совместную группу массива песчаника низкой, пониженной и малой прочности. В строительном отношении они рассматриваются как нерасчлененная категория скально-полускальных грунтов. Второй и третий максимумы с модами 40–50 и 80–90 МПа свидетельствуют о существовании в массиве песчаника двух групп прочности, образующих доминирующую категорию скальных грунтов. Это группы средней прочности и высокой прочности.

ПОЛЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ДИПОЛЯ

Напомним, что за количественную оценку интегральной меры затухания поля ВВМД в массиве песчаника в пределах слоя годовых теплооборотов приняты значения коэффициента k . Ошибка определения коэффициента k оценена по результатам контрольных измерений H_z . При средней отно-

сительной ошибке измерения значений H_z , равной 12.7 %, аналогичная ошибка определения значений k составила 7.6 %.

В г. Нерюнгри коэффициент k изменяется от 1.08 до 4.41 м⁻¹. Ширина интегральной изменчивости по коэффициенту вариации немаленькая и составляет 42.3 %. Средние показатели коэффициента k близки и равны 2.31, 1.88, 1.63 м⁻¹. В 70 % случаев значения k варьируют около средних показателей в интервале 1.33–3.29 м⁻¹.

Гистограммы, построенные с привязкой к границам классов скально-полускальных грунтов, показывают, что значения коэффициента k наследуют от прочности массива песчаника неоднородную вероятностную структуру, которая не описывается ни законом нормального, ни законами ненормального распределения (рис. 3). Статистика значений коэффициента k , полученная по группам разной прочности массива песчаника, представлена в табл. 2. Из данных табл. 2 следует, что с понижением прочности массива песчаника средние значения k растут. Однако эта изменчивость разная, как по средним показателям, так и по коэффициенту вариации. При общем снижении сред-

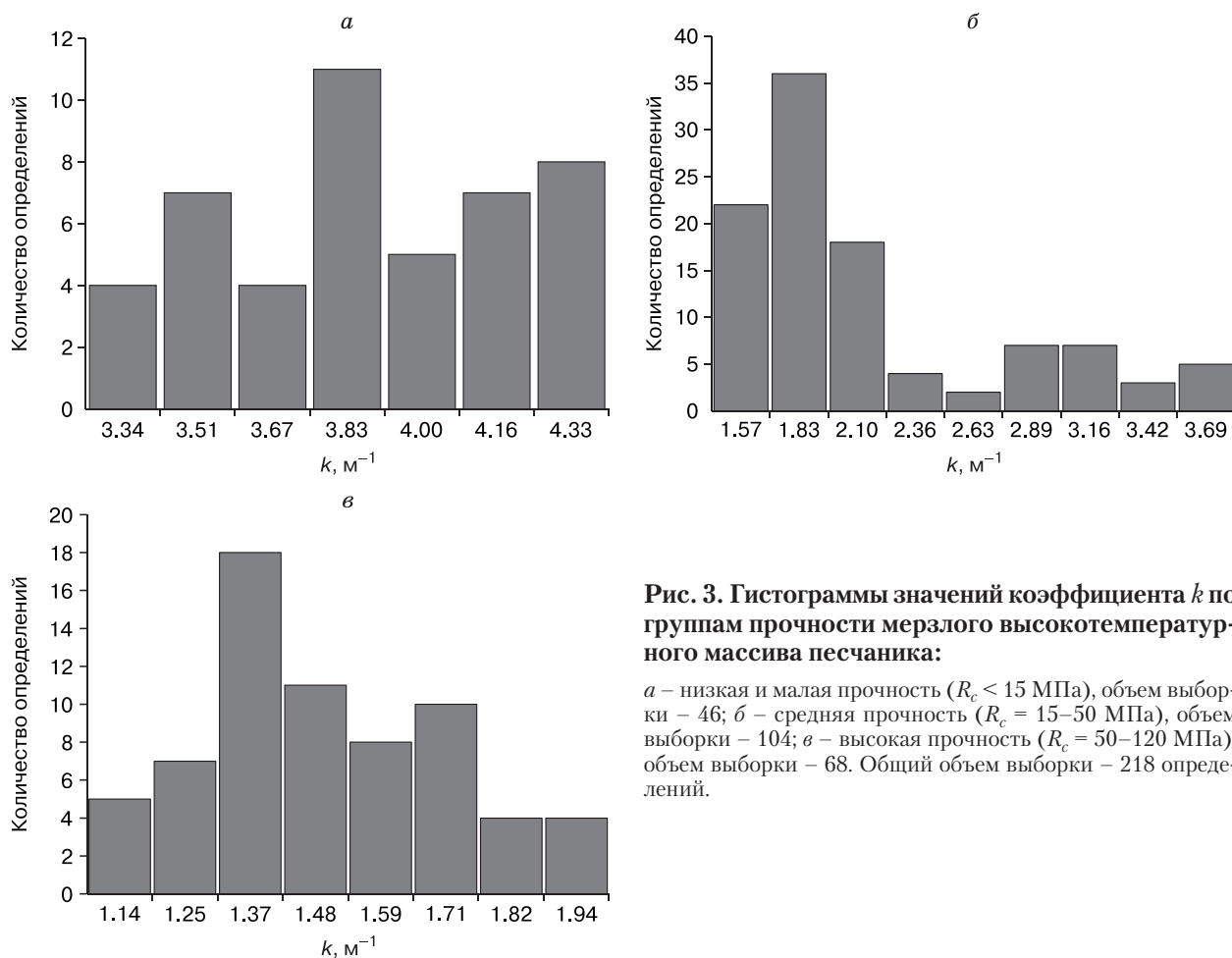


Рис. 3. Гистограммы значений коэффициента k по группам прочности мерзлого высокотемпературного массива песчаника:

а – низкая и малая прочность ($R_c < 15$ МПа), объем выборки – 46; *б* – средняя прочность ($R_c = 15–50$ МПа), объем выборки – 104; *в* – высокая прочность ($R_c = 50–120$ МПа), объем выборки – 68. Общий объем выборки – 218 определений.

Таблица 2. Статистика меры затухания поля ВВМД в мерзлом массиве песчаника по коэффициенту k

Показатель	$k, м^{-1}$		
	2–4-я группы	5-я группа	6-я группа
Среднее арифметическое	3.86	2.14	1.49
Среднее медианное	3.84	1.91	1.44
Среднее модальное	4.26	3.12	1.35
Среднее взвешенное	3.88	2.21	1.49
Стандартное отклонение	0.33	0.62	0.22
Коэффициент вариации, %	8.4	29.0	14.6
Минимальное значение	3.26	1.44	1.08
Максимальное значение	4.41	3.82	1.99
Количество определений	46	104	68

них значений прочностной характеристики R_c в 6.3 раза средние значения коэффициента k возрастают в 2.6 раза. При более ровной интегральной изменчивости (по коэффициенту вариации) значений прочностной характеристики R_c со средним медианным значением 31.4 % у коэффициента k он существенно ниже и равен 14.6 %.

Из вышесказанного следует, что отклик затухания поля ВВМД на изменчивость прочности массива песчаника в г. Нерюнгри ослаблен действием иных мерзлотно-грунтовых факторов: температуры, минерального и гранулометрического состава, типа и вещества цемента, наличия примесей и других петрографических характеристик.

Результат ослабления виден на гистограмме значений k , построенной для г. Нерюнгри (рис. 4). В отличие от такой же гистограммы прочностной характеристики R_c (см. рис. 2), в гистограмме коэффициента k нет четкого разделения мод групп массива песчаника высокой и средней прочности, образующих смешанную группу с вероятными значениями моды в диапазоне 1.36–1.91 м⁻¹. Такая же группа с модой 3.58–3.85 м⁻¹ наблюдается на гистограмме справа, объединяющей массив песчаника малой, пониженной и низкой прочности.

В особенностях вероятностной структуры распределения значений коэффициента k видна слабая и сильная стороны метода ДИЗ в решении задачи прогноза средней прочности песчаников. Слабая сторона – трудность надежного распознавания даже по средним значениям коэффициента k группы прочных песчаников и группы песчаников средней прочности, образующих в строительном отношении одну категорию скальных грунтов [ГОСТ 25100-2020, 2020]. Сильная сторона метода ДИЗ – надежное различение категорий скальных грунтов и полускальных грунтов (группы песчаников малой, пониженной и низкой прочности). Понятно, что сильная сторона метода ДИЗ имеет особое значение для проектно-изыскательских работ. Прежде всего для решения одной из главных задач инженерно-геологического районирования

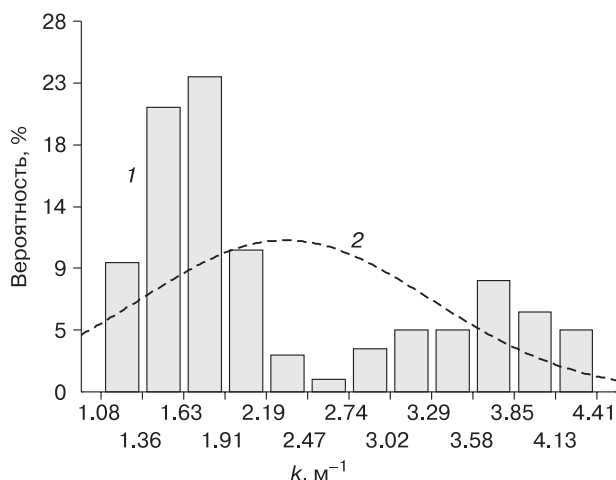


Рис. 4. Сводная фактическая гистограмма (1) и теоретическая вариограмма (2) закона нормального вероятностного распределения значений коэффициента k для мерзлого высокотемпературного массива песчаника.

Объем выборки – 218 определений.

застраиваемых территорий Южной Якутии и г. Нерюнгри по категории прочности оснований инженерных сооружений.

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ

Принципиальным препятствием для применения вероятностных моделей, увязывающих между собой геолого-геофизические характеристики, издавна считался масштабный фактор. Накопленный опыт полевых экспериментов показывает, что несопоставимость точечных геологических характеристик и объемных геофизических характеристик справедлива лишь в пространстве их разрозненных единичных определений. При сравнении же упорядоченных по площади и(или) по времени большого количества значений геолого-геофизических характеристик главенствующая роль масштабного фактора теряет свою значимость и не мешает обнаруживать и изучать статистические закономерности [Пасхавер, 1974].

В рассматриваемой вероятностной модели в научном плане безусловно интересна петрофизическая сторона, описывающая корреляционную связь коэффициента k и прочностной характеристики R_c . В практическом плане большое значение имеет обратная сторона модели, описывающая физически нереальную регрессионную зависимость R_c от k . Именно эта сторона модели дает ценную возможность перейти от лабораторного определения временного предела прочности на одноосное сжатие водонасыщенных образцов песчаника к количественной оценке той же прочности для массива песчаника, т. е. решить иско-

мую задачу прогноза прочности массива песчаника по данным метода ДИЗ.

По правилам и допущениям, применяемым в математической статистике, случайные вариации независимой переменной в вероятностной модели, связанные с ошибками лабораторного определения, должны быть незначительными в сравнении с общим диапазоном изменчивости [Дрейпер, Смит, 2007, с. 41]. Это очень жесткое теоретическое условие, но оно соблюдается для прочностной характеристики R_c , которая рассматривается с корреляционной стороны вероятностной модели как независимая и неслучайная переменная. Действительно, при относительной изменчивости значений R_c , равной 191.5 % (2.5–114.6 МПа), случайные вариации допустимых [ГОСТ 21135.2-84, 1984] ошибок лабораторного определения этой

прочностной характеристики (не выше $\pm 20\%$) составляют 10.4 %.

График корреляционной зависимости k от R_c показан на рис. 5. Из рис. 5 следует, что рост прочности массива песчаника сопровождается закономерным нелинейным снижением средней меры затухания поля ВВМД. На графике наблюдаются три участка с границами групп прочности песчаника [ГОСТ 25100-2020, 2020]. Первый участок со слабым изменением затухания и коэффициентом корреляции -0.70 соответствует группе песчаника малой, пониженной и низкой прочности ($R_c < 15$ МПа). Второй участок с максимальной изменчивостью затухания и коэффициентом корреляции -0.74 соответствует группе песчаника средней прочности с R_c от 15 до 40 МПа. На третьем участке в пределах группы прочного песчаника

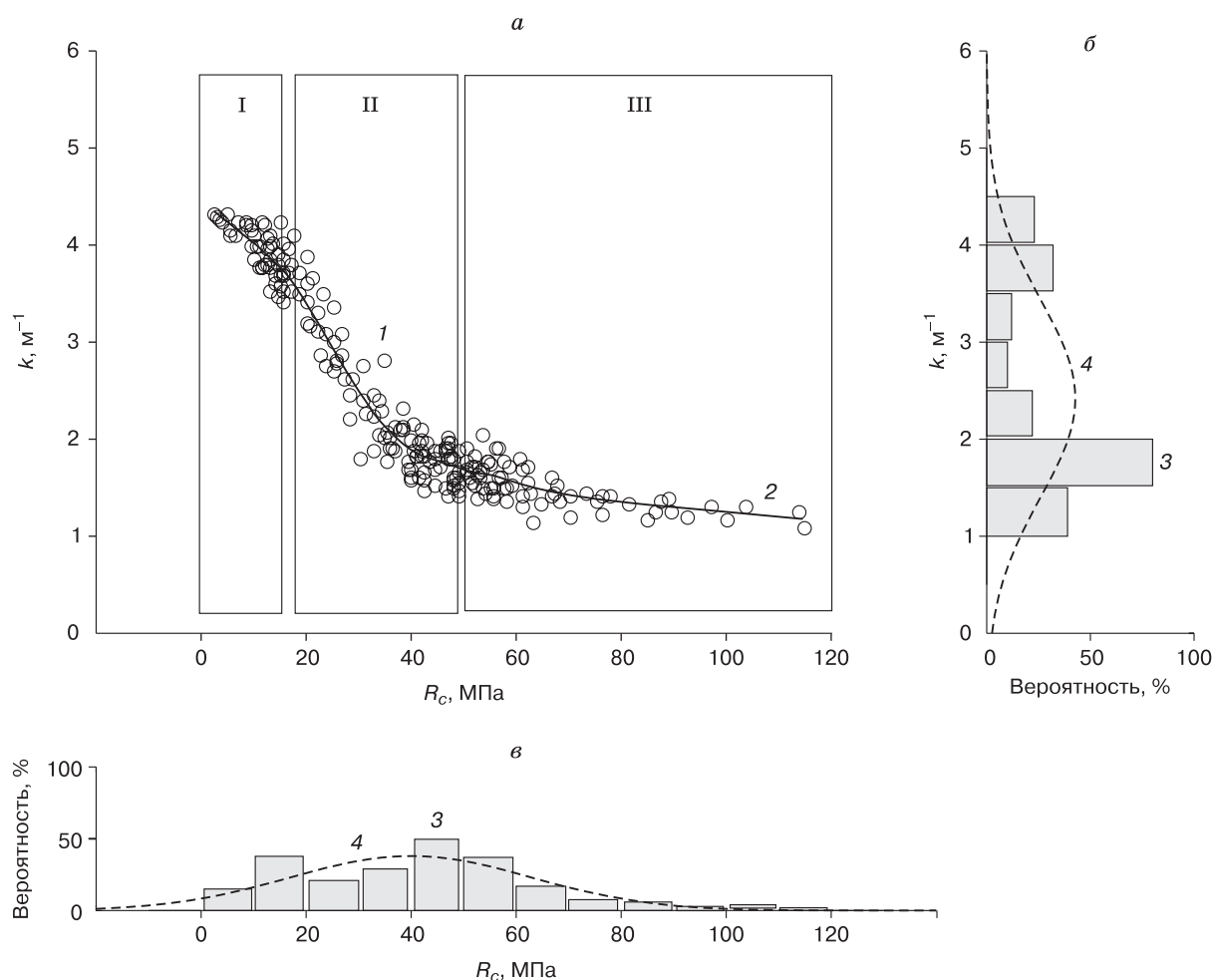


Рис. 5. Вероятностная модель по группам прочности водонасыщенного массива песчаника [ГОСТ 25100-2020, 2020] с графиком корреляционной связи (а) и графиками гистограмм значений коэффициента k (б) и прочностной характеристики R_c (в):

1 – фактические данные; 2 – график уравнения логистической функции; 3 – фактические гистограммы; 4 – теоретические вариограммы закона нормального распределения; I – группа малопрочного песчаника, песчаника пониженной прочности и низкой прочности; II – группа песчаника средней прочности; III – группа прочного песчаника.

с $R_c > 40$ МПа затухание вновь замедляется, но не так сильно, как на первом участке. При этом корреляция не изменяется и составляет -0.79 .

Описанная корреляционная связь близка к причинно-следственным отношениям, которые возникают при изменении прочности массива песчаника и откликом на эту изменчивость меры затухания поля ВВМД. Трудно сказать, какими математическими функциями корректно описываются эти отношения, но с большой долей вероятности одной из них является логистическая функция. Она, как известно, корректно описывает поведение природно-технических систем при их предельных переходах, т. е. из начального состояния в конечное. Применительно к вероятностной модели г. Нерюнгри предельным переходом является смена в скально-полускальном основании инженерных сооружений малопрочного песчаника на прочный песчаник.

График логистической функции, построенный методом наименьших квадратов, показан на фоне поля рассеяния фактического материала – парных значений R_c и k (см. рис. 5). Общее для всех случаев уравнение логистической функции имеет следующий вид:

$$x = \left[(a_0 + a_1) / (1 + a_2 \exp(a_3 y)) \right] + \delta,$$

где y – независимая переменная (характеристика R_c); x – зависимая переменная (коэффициент k); a_0, a_1, a_2, a_3 – параметры, зависящие от условий применения метода ДИЗ; δ – случайная ошибка.

Для инженерно-геологических условий строительства и эксплуатации инженерных сооружений в г. Нерюнгри параметры a_0 – a_3 равны 1.2050, 3.5930, 0.1413, 0.0795. Они связывают вероятностными отношениями прочность массива песчаника и среднюю меру затухания в нем поля ВВМД с коэффициентом множественной детерминации $R^2 = 0.959$. Это означает, что вклад фактора прочности в изменчивость затухания поля ВВМД доминирует среди остальных факторов, составляя почти 96 %.

График уравнения логистической функции дает возможность без вычислений решить прямую задачу геофизики. А именно, на стадии проектирования работ методом ДИЗ оценить меру затухания поля ВВМД по априорным данным о прочности массива песчаника. Кроме того, зная по данным метода ДИЗ значения коэффициента k , легко в полевых условиях оперативно решить две задачи: получить начальную оценку прочности массива песчаника; построить схему предварительного районирования исследуемой территории по группам прочности с разделением на категории скальных и полускальных грунтов.

Обратная задача геофизики – прогноз средней прочности водонасыщенного массива песчаника – решается по вероятностной модели с по-

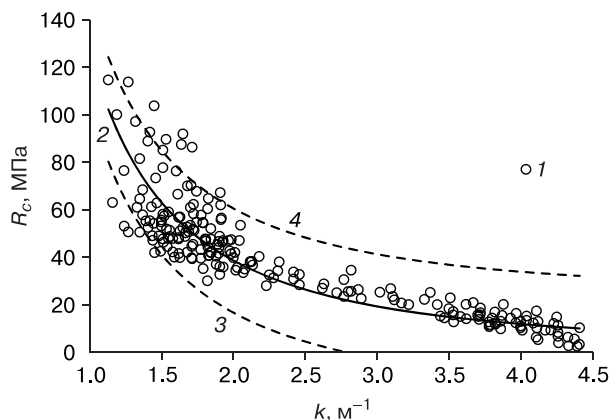


Рис. 6. Вероятностная модель прогноза средней прочности массива песчаника R_c в водонасыщенном состоянии по значениям коэффициента k :

1 – фактический материал; 2 – график уравнения регрессии степенной функции; 3, 4 – нижняя и верхняя границы 95%-го доверительного интервала.

мощью регрессионного уравнения степенной функции. Она лучше других функций аппроксимирует в поле случайного рассеяния фактического материала закономерную изменчивость на территории г. Нерюнгри средних значений прочностной характеристики R_c в зависимости от фактических значений коэффициента k . График уравнения степенной функции приведен на рис. 6. Из рис. 6 следует, что перестановка местами переменных изменила математическую форму, но не суть вероятностных отношений между R_c и k . Такая перестановка не должна удивлять. Она присуща регрессионному анализу и происходит при изменении направления перехода из одного пространства вероятностных отношений переменных в другое пространство.

Регрессионное уравнение степенной функции с коэффициентом множественной детерминации $R^2 = 0.793$ имеет вид

$$R_c = \exp(4.836) k^{-1.707}. \quad (3)$$

Уравнение (3) применимо при производстве работ методом ДИЗ в весенний период при полном промерзании сезонноталого слоя делювия–элювия. Еще одним условием правильного применения уравнения является диапазон изменчивости задаваемых значений $k = 1.08$ – 4.41 м^{-1} . Вне этих границ параметры уравнения (3) могут быть другими.

ОШИБКИ ПРОГНОЗА

Ошибки вероятностной модели прогноза, по данным метода ДИЗ средней прочности водонасыщенного массива песчаника, представляют собой разницу между лабораторными значениями

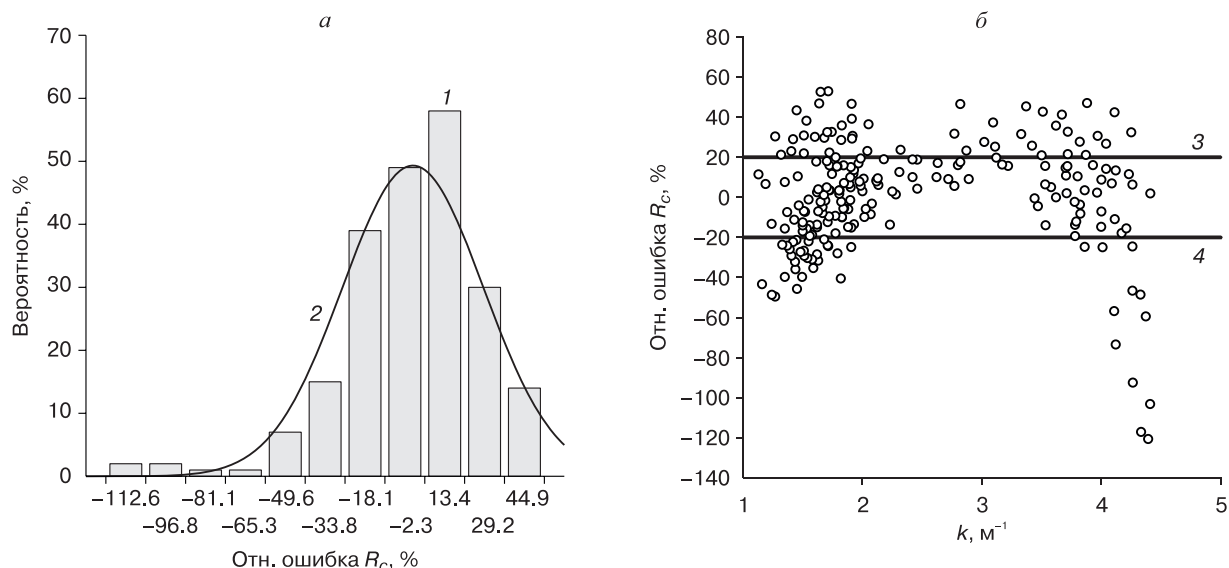


Рис. 7. График распределения ошибок вероятностной модели (а) и поле рассеяния ошибок модели в зависимости от значений коэффициента k (б).

1 – фактическая гистограмма ошибок; 2 – теоретическая вариограмма ошибок по закону нормального вероятностного распределения; 3, 4 – границы предельно допустимой ошибки лабораторного определения значений прочностной характеристики R_c . Объем выборки – 218 определений.

прочностной характеристики R_c и значениями, вычисленными по уравнению (3). Тестовая проверка, сделанная с помощью программы “Стадия” [Кулаицев, 2006] по нескольким независимым критериям, свидетельствует, что вероятностное распределение абсолютных и относительных ошибок не подчиняется нормальному закону. Это подтверждается и графиками гистограмм ошибок (рис. 7). В 122 случаях ошибки имеют положительный знак и в 96 случаях – отрицательный знак. Такая несбалансированность разброса единичных значений около средних показателей является признаком некоторой тенденции заниже-

ния расчетных значений R_c по отношению к лабораторным значениям. Доля ошибок прогноза вероятностной модели, сравнимых по величине с предельно допустимой ошибкой лабораторного определения $\pm 20\%$, значительна. В фактическом материале, состоящем из 218 определений, ошибки 20–30 % составляют 61–78 % (см. рис. 7, а). Снижение чувствительности коэффициента k в области высоких значений (более 4 м^{-1}), приуроченных к нераздельной группе малопрочного песчаника, песчаника пониженной и низкой прочности со средними расчетными значениями прочностной характеристики $R_c < 15 \text{ МПа}$, приводит к аномальному росту ошибок до -120% , т. е. к систематическому превышению лабораторных значений прочностной характеристики R_c (см. рис. 7, б). Доля таких ошибок составляет 8,2–9,6 %. Более благоприятная для метода ДИЗ картина распределения ошибок наблюдается при сравнительно низких значениях коэффициента $k < 1,8 \text{ м}^{-1}$ для группы прочного песчаника с расчетным значением $R_c > 50 \text{ МПа}$. Здесь максимум ошибок не превышает $\pm 55\%$, а их доля по отношению к ошибкам $\pm(20-30)\%$ равна $\pm 34,5$ и $\pm 20,7\%$.

Таким образом, примерно в 7–8 случаях из 10 ожидаемая ошибка прогноза лежит в интервале $\pm(20-30)\%$. При вариации единичных ошибок от 1,75 МПа (3,5 %) до 11,24 МПа (27,8 %) показатели средних ошибок близки к нулевым значениям (табл. 3). Если взять принятый в геологии при поисках и разведке месторождений полезных иско-

Таблица 3. Статистика ошибок вероятностной модели прогноза средней прочности в водонасыщенном состоянии массива песчаника по данным метода ДИЗ

Показатель	Ошибка R_c	
	МПа	%
Среднее арифметическое	0.65	0.21
Стандартная ошибка	0.76	1.88
Медианное среднее	1.04	3.50
Модальное среднее	1.75	3.50
Стандартное отклонение	11.24	27.78
Коэффициент вариации, %	17.3	132.3
Минимальное значение	-34.7	-120.5
Максимальное значение	38.2	52.8
Количество определений	218	218

паемых умеренный уровень доверия³ к результатам геофизики, равный примерно 70 %, то ошибки вычисления средних расчетных значений R_c будут сосредоточены в интервале ± 11.22 МПа (± 27.7 %). При уровне доверия 80 % ошибки становятся немного больше и равны ± 14.07 МПа (± 32.0 %).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Посредством ретроспективного анализа фактического материала, полученного в 90-х гг. XX в. в криолитозоне Южной Якутии в г. Нерюнгри, построена новая вероятностная модель. Она позволяет по данным метода ДИЗ решать важную задачу геомеханики мерзлых грунтов в части прогноза средней прочности мерзлого высокотемпературного массива песчаника, перешедшего в водонасыщенное состояние под влиянием антропогенно-техногенных и климатических факторов. С вероятностью 70–80 % модель позволяет оценивать в этом состоянии прочность массива песчаника с относительной ошибкой $\pm(27.7–32.0)$ %, которая сравнима с предельно допустимой лабораторной ошибкой ± 20 %. Такой уровень точности дает основание применять метод ДИЗ с целью быстрого и экономичного (при опережении дорогостоящих и трудоемких буровых и лабораторных работ) детального районирования территории г. Нерюнгри по категории прочности скально-полускальных оснований инженерных сооружений.

Благодарности. Ушедшему в мир иной заместителю директора ООО “Нерюнгростройизыскания” Н.Л. Зыкову за допуск к материалам изысканий по г. Нерюнгри. Сотруднику лаборатории инженерной геокриологии ИМЗ СО РАН к.г.-м.н. А.Е. Мельникову за поиск материалов по геологии Южной Якутии. Бывшему главному геофизику “ЮжЯкутГИСИЗ” Г.К. Суворовой за участие в опытно-методических работах методом ДИЗ и консультации по вопросам геоэлектрического и сейсмического строения мерзлых грунтов г. Нерюнгри.

Литература

Акимов А.Т. Вопросы теории и практики электроразведки мерзлых пород // Труды ПНИИИС Госстроя РСФСР. Т. VI. Геофизические методы исследований при изысканиях в строительстве. М., Изд-во ПНИИИС, 1971, с. 6–76.

Будлович С.Н., Мелентьев В.С., Наумов М.С., Фурикович О.С. Роль новейших разрывных нарушений в формировании мерзлотно-гидрогеологических условий (на примере Нерюнгринской синклинали Южно-Якутского мезозойского прогиба) // Мерзлотные исследования. М., Изд-во Моск. ун-та, 1976, вып. XV, с. 120–125.

Вешев А.В. Временное руководство по методу электромагнитного зондирования с вертикальным магнитным диполем / А.В. Вешев, Е.Ф. Любцева, В.М. Леончиков, В.М. Алексеев. М., Изд-во Мин-ва цветной металлургии СССР, 1978, 45 с.

Владов М.Л. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений / М.Л. Владов, М.С. Судакова. М., ГЕОС, 2017, 240 с.

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

ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М., Стандартинформ, 2020, 38 с.

Гриб Н.Н. Физико-механические свойства углевещающих пород Южно-Якутского бассейна / Н.Н. Гриб, А.В. Самохин. Новосибирск, Наука, 1999, 240 с.

Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ: пер. с англ. / Н. Дрейпер, Г. Смит. 3-е изд. М., Изд. дом “Вильямс”, 2007, 917 с.

Желинский В.М. Мезозойская угленосная формация Южной Якутии. Новосибирск, Наука, 1980, 119 с.

Журавлева Р.Б., Самоделкина С.А., Бакаев В.П. К выбору интерпретационных параметров при дистанционном зондировании и профилировании с аппаратурой ДЭМП-СЧ // Рос. геофиз. журн., 1994, № 2–4, с. 67–70.

Задриголова М.М. Радиоволновой метод в инженерной геологии и геоэкологии. М., Изд-во Моск. ун-та, 1998, 320 с.

Иголкин В.И. Методы и аппаратура электроразведки на переменном токе / В.И. Иголкин, Г.Я. Шайдунов, О.А. Тронин, М.Ф. Хохлов. Красноярск, Изд-во Сиб. федер. ун-та, 2016, 272 с.

Инструкция по электроразведке / Под ред. Г.С. Франтова. Л., Недра, 1984, 534 с.

Комплекс среднечастотной аппаратуры электромагнитного зондирования (СЭМЗ). Техн. описание. Красноярск, НПО Сибцветметавтоматика СССР, 1991, 30 с.

Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных. М., ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006, 512 с.

Лебедев В.Ф. Комплекс СЭМЗ. Метод. пособие / В.Ф. Лебедев, В.И. Онущенко, Л.М. Литвинцева. Красноярск, НПО Сибцветметавтоматика СССР, 1991, 83 с.

Мельников В.П. Электрофизические исследования мерзлых пород. Новосибирск, Наука, 1977, 108 с.

Молочнов Г.В. Частотные электромагнитные зондирования с вертикальным магнитным диполем / Г.В. Молочнов, М.В. Радионов. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1983, 217 с.

Нерадовский Л.Г. Технология электромагнитного зондирования мерзлых грунтов слоя годовых теплооборотов. М., Изд. дом “Научное обозрение”, 2018, 622 с.

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.

Нерадовский Л.Г., Сясько А.А. Статистические закономерности электромагнитных свойств пород криолитозоны Южной Якутии // Инж. изыскания, 2015, № 10/11, с. 66–73.

Нерадовский Л.Г., Федорова Л.Л. Определение прочностных свойств осадочных и интрузивных пород в криолитозоне Южной Якутии методом георадиолокации // Горный информ.-аналит. бюл., 2015, № 10, с. 201–210.

³ Это сравнительно невысокий уровень доверия, но достаточный для оценки достоверности результатов работ, полученных методами геофизики, принимая во внимание их геологическую неоднозначность и математическую некорректность решения обратных задач.

Пасхавер И.С. Закон больших чисел и статистические закономерности. М., Статистика, 1974, 152 с.

Петровский А.А. Радиоволновые методы в подземной геофизике. М., Недра, 1971, 224 с.

Титлинов В.С. Технология дистанционных индуктивных зондирований / В.С. Титлинов, Р.Б. Журавлева. Екатеринбург, Наука, 1995, 56 с.

Южная Якутия: мерзлотно-гидрогеологические и инженерно-геологические условия Алданского горнопромышленного района / Под ред. В.А. Кудрявцева. М., Изд-во Моск. ун-та, 1975, 444 с.

Якупов В.С., Калинин В.М., Ахметшин А.А. Вероятностная модель геоэлектрического строения мерзлых толщ Средней и Восточной Сибири (принципы и методика построения) // Физика Земли, 1998, № 7, с. 91–94.

Basarir H., Tutluoglu L., Karpuz C. Penetration rate prediction for diamond bit drilling by adaptive neuro-fuzzy inference system and multiple regressions // Eng. Geology, 2014, vol. 173, p. 1–9.

Boaga J. The use of FDEM in hydrogeophysics: A review // J. Appl. Geophys., 2017, vol. 139, p. 36–46.

Doolittle J.A., Brevik E.C. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies // Geoderma, 2014, vol. 223–225, p. 33–45.

McNeill J.D. EM-34-3 survey interpretation techniques // Technical Note TN-8. Geonics Limited Mississauga, Ontario, Canada, 1980, 15 p.

Sartorelli A.N., French R.B. Electro-magnetic induction methods for mapping permafrost along northern pipeline corridors // Proc. of the 4th Can. Permafrost Conf. (Calgary, Alberta, March 2–6, 1981). Ottawa, National Res. Council of Canada, 1982, p. 283–295.

References

Akimov A.T. Theoretical and practical issues of electrical exploration of permafrost. In: Proc. of PNIIS, USSR Gosstroy. Vol. VI. Geophysical Methods in Engineering Investigations. Moscow, The Industrial Research Institute in Construction, 1971, p. 6–73 (in Russian).

Buldovich S.N., Melentiev V.S., Naumov M.S., Furikevich O.S. The role of recent faults in the formation of permafrost-hydrogeological conditions (an example of the Neryungri syncline of the Southern Yakutian Mesozoic trough). In: Permafrost Research. Issue XV. Moscow, Moscow State University Press, 1976, p. 120–125 (in Russian).

Veshev A.V., Lyubceva E.F., Leonchikov V.M., Alekseev V.M. Vremennoe rukovodstvo po metodu elektromagnitnogo zondirovaniya s vertikalnym magnitnym dipolem [Interim guide to the method of electromagnetic sounding with a vertical magnetic dipole]. Moscow, USSR Ministry of Nonferrous Metallurgy, 1978, 45 p. (in Russian).

Vladov M.L., Sudakova M.S. Georadiolokaciya. Ot fizicheskikh osnov do perspektivnykh napravlenij [Ground-penetrating radar. From physical foundations to promising directions]. Moscow, GEOS, 2017, 240 p. (in Russian).

GOST 21135.2-84. Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom szhatii [Rocks. Methods for determining uniaxial compression strength]. Moscow, Izd-vo standartov, 1984, 7 p. (in Russian).

GOST 25100-2020. Grunty. Klassifikaciya [Soils. Classification]. Moscow, Standartinform, 2020, 38 p. (in Russian).

Grib N.N., Samoxin A.V. Fiziko-mekhanicheskoe svojstva uglevmeshayushchikh porod Yuzhno-Yakutskogo bassejna

[Physical and mechanical properties of coal-bearing rocks of the South Yakutsk basin]. Novosibirsk, Nauka, 1999, 240 p. (in Russian).

Drejper N., Smit G. Prikladnoj regressionnyj analiz [Applied Regression Analysis: Translated from English]. Moscow, Williams Publishing House, 2007, 3rd ed. 917 p. (in Russian).

Zhelinskij V.M. Mezozojskaya uglensnaya formaciya Yuzhnoj Yakutii [Mesozoic coal-bearing formation of South Yakutia]. Novosibirsk, Nauka, 1980, 119 p. (in Russian).

Zhuravlyova R.B., Samodelkina S.A., Bakaev V.P. On the choice of interpretation parameters for geometric sounding and profiling using the DEMP-SC system. Rossijskij geofizicheskij zhurnal [Rossiyskij Geofizicheskij Zhurnal], 1994, No. 2–4, p. 67–70 (in Russian).

Zaderigolova M.M. Radiovolnovoj metod v inzhenernoj geologii i geokologii [Radio wave method in engineering geology and geocology]. Moscow, Moscow State University Press, 1998, 320 p. (in Russian).

Igolkin V.I., Shajdurov G.Ya., Tronin O.A., Khokhlov M.F. Metody i apparatura elektrorazvedki na peremennom toke [Methods and instruments for AC electrical exploration]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Press, 2016, 272 p. (in Russian).

Instrukciya po elektrorazvedke [Guidelines on electrical exploration]. G.S. Frantov (Ed.). Leningrad, Nedra, 1984, 534 p. (in Russian).

Kompleks srednechastotnoj apparatury elektromagnitnogo zondirovaniya (SEMZ). Texnicheskoe opisanie [System of medium-frequency equipment for electromagnetic sounding (SEMS). Technical description]. Krasnoyarsk, NPO Sibsvetmetavtomatika USSR, 1991, 30 p. (in Russian).

Kulaichev A.P. Metody i sredstva kompleksnogo analiza dannykh [Methods and means of complex data analysis]. Moscow, FORUM: INFRA–M, 2006, 512 p. (in Russian).

Lebedev V.F., Onushhenko V.I., Litvinceva L.M. Kompleks SEMZ. Metodicheskoe posobie [SEMS complex. Toolkit]. Krasnoyarsk, NPO Sibsvetmetavtomatika SSSR, 1991, 83 p. (in Russian).

Melnikov V.P. Elektrofizicheskie issledovaniya myorzlykh porod [Electrophysical studies of permafrost]. Novosibirsk, Nauka, 1977, 108 p. (in Russian).

Molochnov G.V., Radionov M.V. Chastotnye elektromagnitnye zondirovaniya s vertikalnym magnitnym dipolem [Frequency electromagnetic sounding with a vertical magnetic dipole]. Leningrad, Izd-vo LGU, 1983, 217 p. (in Russian).

Neradovskij L.G. Texnologiya elektromagnitnogo zondirovaniya myorzlykh gruntov sloya godovykh teplooborotov [Technology of electromagnetic sounding of frozen soils of the layer of annual heat exchanges]. Moscow, Izd. dom "Nauchnoe Obozrenie", 2018, 622 p. (in Russian).

Neradovskij L.G. Georadar study of engineering geology features in permafrost sediments of southern Yakutia (on the example of Neryungri site). Razvedka i okhrana nedr [Exploration and Protection of Subsoil], 2022, No. 1, p. 41–54 (in Russian).

Neradovskij L.G., Syas'ko A.A. Statistical patterns of electromagnetic properties of rocks in the permafrost zone of South Yakutia. Inzhenernye izyskaniya [Inzhenernye Izyskaniya], 2015, No. 10 (11), p. 66–73 (in Russian).

Neradovskij L.G., Fyodorova L.L. Determination of the strength properties of sedimentary and intrusive rocks in the permafrost zone of South Yakutia using GPR. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten [Gornyy Informatsionno-Analiticheskij Byulleten], 2015, No. 10, p. 201–210 (in Russian).

- Pasxaver I.S. Zakon bolshikh chisel i statisticheskie zakonomernosti [The law of large numbers and statistical regularities]. Moscow, Statistica, 1974, 152 p. (in Russian).
- Petrovskij A.A. Radiovolnovye metody v podzemnoj geofizike [Radio wave methods in subsurface geophysics]. Moscow, Nedra, 1971, 224 p. (in Russian).
- Titlinov V.S., Zhuravlyova R.B. Tekhnologiya distancionnykh induktivnykh zondirovanij [Technology of geometric inductive soundings]. Ekaterinburg, Nauka, 1995, 56 p. (in Russian).
- Yuzhnaya Yakutiya: merzlotno-gidrogeologicheskie i inzhenerno-geologicheskie 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. (in Russian).
- Yakupov V.S., Kalinin V.M., Axmetshin A.A. A probabilistic model of the geoelectric structure of frozen strata in Central and Eastern Siberia (principles and methods of construction). Fizika Zemli [Fizika Zemli], 1998, No. 7, p. 91–94 (in Russian).
- 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.
- Boaga J. The use of FDEM in hydrogeophysics: A review. J. Appl. Geophys., 2017, vol. 139, p. 36–46.
- Doolittle J.A., Brevik E.C. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. Geoderma, 2014, vol. 223–225, p. 33–45.
- McNeill J.D. EM-34-3 survey interpretation techniques. Technical Note TN-8. Geonics Limited Mississauga, Ontario, Canada, 1980, 15 p.
- Sartorelli A.N., French R.B. Electro-magnetic induction methods for mapping permafrost along northern pipeline corridors. In: Proc. of the 4th Can. Permafrost Conference (Calgary, Alberta, March 2–6, 1981). Ottawa, National Research Council of Canada, 1982, p. 283–295.

*Поступила в редакцию 21 января 2022 г.,
после доработки – 25 мая 2022 г.,
принята к публикации 12 ноября 2022 г.*