



Нерадовский Л. Г.
 д-р техн. наук
 ФГБУН «Институт мерзлотоведения им.
 П.И. Мельникова» СО РАН
 старший научный сотрудник
 лаборатории инженерной геокриологии
 L031950N@ia.ru

ПСЕВДОКАРОТАЖ ПРОЧНОСТИ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД В ЮЖНОЙ ЯКУТИИ НА СТАНЦИИ «КЮРГЕЛЛЯХ» ПО ДАННЫМ МЕТОДА ГЕОФИЗИКИ

По результатам ретроспективного анализа фактического материала инженерно-геологических изысканий, полученного в Южной Якутии на станции «Кюргеллях», методом дистанционного индуктивного зондирования впервые выполнен псевдокаротаж прочности осадочных пород на частоте 0,281 МГц в переходной зоне разноса 5-100 м. Установлен общий рост с глубиной прочности пород. В области выветривания прочность растёт от 27,43-32,43 до 35,27-42,23 МПа одинаково медленно в тектонических зонах дробления, трещиноватости и вне их с градиентом 0,549-0,633 МПа/м. Ниже, в относительно сохранной части пород до глубины 18,4-23,4 м прочность пород в аналогичных зонах растёт, быстро достигая 84,47-100,07 МПа с почти равным аномальным градиентом 14,456 и 11,568 МПа/м. Граница смены градиентов на глубине 16,3 и 19,8 м идентифицируется как нижняя граница слоя годовых теплооборотов с разными тепловыми свойствами пород. Полученные значения градиентов рекомендуются применять в экспериментальном порядке в Южной Якутии для решения задач прогноза проектно-строительными, изыскательскими и горнодобывающими организациями на разных стадиях изучения прочности осадочных пород, слагающих скально-полускальные основания инженерных сооружений.

Ключевые слова: Станция; изыскания; слой годовых теплооборотов; осадочные породы; прочность; водонасыщенное состояние; метод дистанционного индуктивного зондирования; частота 1,125 и 0,281 МГц; эффективная глубина.

Настоящая статья написана с целью дополнения к ещё не опубликованным результатам эксперимента, которые в настоящее время находятся на рецензировании в редакции журнала «Науки о Земле и недропользование». В статье представлен результат ретроспективного анализа фактического материала инженерно-геологических изысканий, полученного в 90-х годах прошлого века на проектируемой в Республике Саха (Якутия) станции «Кюргеллях» Амуро-Якутской железнодорожной магистрали (АЯМ).

Материал получен базовыми по Якутии трестами НПО «Стройизыскания» Госстроя РСФСР. Это – Южно-Якутский трест инженерно-строительных изысканий (ЮжЯкутТИСИЗ) и Якутский трест инженерно-строительных изысканий (ЯкутТИСИЗ). В настоящее время ЯкутТИСИЗ перестал осуществлять свою деятельность по причине финансового банкротства, а ЮжЯкутТИСИЗ успешно продолжает свою деятельность в Южной Якутии, но уже как ООО «Нерюнгри-стройизыскания».

Дополнение к отмеченной статье касается в рассматриваемый период времени обобщённых представлений о характере изменения по глубине в слое годовых теплооборотов прочности будущего основания инженерных сооружений – мёрзлых осадочных пород. То есть того, до сих пор слабо изученного интервала глубины, который охватывает в границах обозначенного слоя сферу теплового и механического взаимодействия мёрзлых пород с инженерными сооружениями. О первостепенной важности слоя годовых теплооборотов для наук о Земле и индустрии строительства писал А.Т. Акимов, называя этот слой «фабрикой криогенных процессов» [1].

В отличие от промысловой геофизики, в которой измерения по стенкам скважин, например, электрического сопротивления называют электрокаротажем, определение этой или иной характеристики грунтово-геологической среды методами наземной геофизики, т.е. с поверхности Земли называется псевдокаротажем.

В качестве метода псевдокаротажа прочности осадочных пород был выбран один из методов геоэлектрики на переменном токе – метод дистанционного индуктивного зондирования (ДИЗ). С его помощью изучалось затухание в слое годовых теплооборотов высокочастотного гармонического поля вертикального магнитного диполя (ВВМД). Значения затухания поля ВВМД служили входными данными для модифицированной модели [19] г. Нерюнгри [18]. По ней определялись средние значения прочности массива осадочных пород в прогнозируемом водонасыщенном состоянии, которое наиболее неблагоприятно для строительства и эксплуатации инженерных сооружений. Графики изменения по глубине этих значений и представляли собой псевдокартаж методом ДИЗ.

Участок и условия проведения эксперимента

Для постановки эксперимента была выбрана площадка жилого посёлка станции «Кюргеллях». Сама станция расположена в 572 км от административного центра Южной Якутии г. Нерюнгри в северо-восточном направлении к г. Якутску – столице Якутии.

В геоморфологическом отношении станция находится на водоразделе ручьёв Орто-Тала и Аччый-Тала на высоте над уровнем моря 513-529 м.

По данным изысканий территория станции отличается сложными условиями строительства и эксплуатации инженерных сооружений. Эти локально-местные условия типичны для всей криолитозоны Южной Якутии [24] и проявляют себя в сочетании деструктивного влияния 3-х процессов, усиливающих естественную изначальную структурно-петрофизическую неоднородность литогенной основы в части изменчивости её прочностного состояния. Это – тектонический процесс [2], экзогенные процессы, включая, мощный по разрушительной силе криогенный метаморфизм [8, 17] и процесс промерзания. По данным М.Н. Железняк [7] мерзлотный фактор проявляет себя в разных типах промерзания пород с образованием сложной по строению и изменчивой во времени вечной, многолетней и сезонной прерывисто-островной мерзлоты. В целом, в пределах Южной Якутии мощность и температура мёрзлых пород закономерно изменяется в зависимости от высоты над уровнем моря поверхности рельефа местности. На обширном водораздельном локально возвышенном пространстве мезозойских впадин мощность мерзлоты уменьшается до 20-50 м с повышением температуры до $-(0,1 \div 0,5)^\circ\text{C}$. В локальных понижениях рельефа, на склонах северной экспозиции и пойме рек возникает обратная закономерность: мощность мерзлоты увеличивается до первых сотен метров, а температура понижается до $-(1 \div 5)^\circ\text{C}$. Этому в существенной мере способствует зимняя температурная инверсия с опусканием в речные впадины плотного и тяжёлого морозного воздуха с температурой до $-(30 \div 50)^\circ\text{C}$.

На площадке жилого посёлка станции «Кюргеллях» по данным одноразовой термометрии изыскательских скважин температура осадочных пород в нижней части слоя годовых теплооборотов на глубине 10 м изменялась от $-0,3$ до $-1,1^\circ\text{C}$ при среднем значении $-0,8^\circ\text{C}$. При такой температуре, заполненные глинистым и льдистым материалом, сильновыветренные и раздробленные породы до состояния «разборной скалы» или «рухляка» находились в твёрдомёрзлом или пластичномёрзлом состоянии. Сильнотрещиноватые породы с небольшим содержанием глинистых частиц и льда находились в состоянии близком к морозному состоянию. Слаботрещиноватые породы с открытыми пустыми или закрытыми трещинами волосяного типа вскрывались бурением скважин в воздушно-сухом морозном состоянии. В этом состоянии, и это хорошо известно, прочность всех пород с кристаллизационной структурной связью почти не зависит от температуры. Более того, породы такого типа и, в частности, очень прочные осадочные породы с $R_c > 120$ МПа [5], практически перестают влиять на затухание поля ВВМД. Такая ограниченность предьявляет жёсткие и не всегда выполнимые в природных условиях и тем более, на застроенных территориях требования к методу ДИЗ в части определения меры или степени затухания поля ВВМД с ошибкой не выше 10 %. Иначе установить достоверные изменения прочности выше 120 МПа невозможно [18].

Скважины на площадке жилого посёлка размером 600 на 600 м² были пробурены ЯкутТИСИЗ осенью 1990 г. При расстоянии между 25 пробуренными скважинами равном 150 м глубина бурения не превышала 10-12 м.

По данным буровых работ основание инженерных сооружений жилого посёлка сложено мёрзлыми нижнекембрийскими карбонатными осадочными породами Олекминской свиты в виде переслаивания доломитов и известняков. Последние имеют подчинённое значение. Сверху породы повсеместно покрыты чехлом наносов – делювиально-элювиальных образований четвертичного возраста (суглинками с примесью дресвы, щебня и гравия осадочных пород). Мощность чехла 0,4-2,1 м. Более древний элювий кайнозойского или палеозойского возраста состоит из ярко-красных и жёлтых хорошо отсортированных плотных песчаных глин. Эти образования распространены в границах тектонических нарушений заполняя их до глубины 4,5-8,6 м и более метров.

Отличительной чертой не только древнего элювия, но и всего массива осадочных пород, является высокое объёмное содержание глинистых частиц. Эта особенность доломитов и известняков на станции «Кюргеллях», как и доломитов на участке АЯМ между станцией «Верхняя Амга» и разъездом «Болотный» [20] приводит к нарушению теоретически обоснованного и подтверждённого практикой геофизики и радиофизики общего правила. В соответствии с ним изменение в условиях *in situ* эффективных значений электрофизических характеристик должно быть согласованным. А именно, рост мнимой части комплексной относительной диэлектрической проницаемости, который регулируется электрической проводимостью пород, должен вызывать рост вещественной части проницаемости. В рассматриваемом случае общее правило нарушается и по данным метода ДИЗ, и по данным метода дискретной георадиолокации, которая выполнялась вместе с методом ДИЗ и методом дипольного электромагнитного профилирования на 3-х разносах с аппаратурой «ЭРА-625М».

Оставим без рассмотрения частные причины нарушения общего правила. Вопрос этот интересней, но излишний для настоящей статьи.

Вернёмся к изыскательским работам и завершим их описание в части методики изучения прочности осадочных пород. Она осуществлялась в грунтовой лаборатории ЯкутТИСИЗ в соответствии с правилами и требованиями, предъявляемых ГОСТ 21135.2-84 [3] к изготовлению и испытанию образцов скально-полускальных грунтов. Образцы готовились из монолитов осадочных пород, отобранных из керна скважин на глубине 0,8-11 м. Схема отбора была также

стандартной и предусматривала неравномерное избирательное изучение или опробование прочности массива осадочных пород. Такая схема была принята в прошлом веке в НПО «Стройизыскания» Госстроя РСФСР из соображений достижения оптимальности основных геолого-экономических показателей. В их число входили показатели качества, информативности, производительности и стоимости инженерно-геологических изысканий [16].

Прочность массива осадочных пород оценивалась по лабораторным данным, опираясь на средние значения, широко применяемой в отечественном грунтоведении и зарубежной геотехнике, характеристики R_c – временного предела прочности на одноосное сжатие в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии.

Методика эксперимента

Эксперимент с ретроспективным анализом данных метода ДИЗ, полученных на станции «Кюргеллях», выполнен в рамках госбюджетного финансирования в лаборатории инженерной геокриологии Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова по проекту СО РАН «Устойчивость природно-технических систем в криолитозоне и разработка технологий использования криогенных ресурсов». Регистрационный номер АААА-А20-120111690011-9.

Полевые работы выполнялись в опытно-производственном порядке летом 1991 г. после получения из НПО «Сибцветметавтоматика» (г. Красноярск) новой и уникальной на тот период времени аппаратуры «СЭМЗ». Вид этой аппаратуры показан на **рис. 1**, где она расположена на бетонной отмостке фундамента строящегося инженерного сооружения на конечной станции АЯМ «Нижний Бестях». К сожалению, сфотографировать аппаратуру при работе с ней на станции «Кюргеллях» не представилась возможность.

Работа методом ДИЗ производилась геофизиками ЯкутТИСИЗ и ЮжЯкутТИСИЗ с учётом рекомендаций геофизиков НПО «Якутзолото» Измерения с аппаратурой «СЭМЗ» выполнены в точках скважин и между ними при расстоянии от 50 до 100 м. Порядок измерений поля ВВМД описан в инструкции к аппаратуре «СЭМЗ» [13] и в обзорной работе красноярских геофизиков В.И. Иголкина и др. [9].

Измерения в точках ДИЗ выполнены в 4-х азимутах (север-юг; восток-запад) на частоте 1,125 и 0,281 МГц с разносом 5-100 м. Термином «разнос» в методе ДИЗ называют расстояние между неподвижно стоящей антенной, излучающей первичное поле ВВМД на заданной неизменяемой частоте и перемещаемой антенной, которая принимает суммарное первичное и вторичное поле ВВМД. Результат приёма поля

передаётся по экранированному соединительному кабелю для измерения в микровольтметр. Заметим, что вторичное поле ВВМД есть результат возникновения в грунтово-геологической среде токов индукции или как их ещё называют «вихревых токов».

В ходе работ методом ДИЗ в 5 точках зондирований, расположенных по углам и центру площадки жилого посёлка станции «Кюргеллях», измерялись все составляющие эллипса поляризации поля ВВМД. Перечислим их по порядку:

- 1) вертикальная составляющая (Hz);
- 2) горизонтальная составляющая (Hr);
- 3) длина большой оси (a);
- 4) длина малой оси (b);
- 5) угол наклона (ψ) большой оси к поверхности Земли или иначе говоря, к дневной поверхности.

Во всех остальных точках ДИЗ измерялись только значения Hz и Hr. Причём, для ретроспективного анализа данных метода ДИЗ в аспекте обозначенной цели натурного эксперимента были отобраны значения Hz, измеренные на частоте 0,281 МГц. Выбор характеристики Hz объясняется более высокой информативностью и устойчивостью к влиянию разного рода помех в сравнении с характеристикой Hr. Что касается частоты 0,281 МГц, то она заведомо обеспечивала изучение прочности массива осадочных пород до максимально возможной глубины.

На стадии ретроспективного анализа данных метода ДИЗ были последовательно решены 4 задачи. Их подробное описание заинтересованные читатели могут найти в журнале «Криосфера Земли» [18].

Во-первых, и это была самая сложная задача, по результатам параметрических измерений на пяти скважинах определены эффективные значения электросопротивления и вещественной части комплексной относительной диэлектрической проницаемости (далее, сопротивление, проницаемость) исследуемых осадочных пород. Решение задачи получено с помощью альбома палеток В.Ф. Лебедева и др. [15], а также таблицы-программы, которая прилагается к монографии В.И. Иголкина и др. [9, с. 260-266].

Во-вторых, по эффективным значениям сопротивления и проницаемости были вычислены эффективные значения глубины проникновения поля ВВМД в исследуемый массив осадочных пород на частоте 1,125 и 0,281 МГц в полосе разноса 5-100 м. Эта задача решена с помощью рекомендаций и подробных разъяснений, сделанных в статье В.С. Титлинова В.С. и Р.Б. Журавлёвой Р.Б. [23].

В-третьих, по графикам зависимости значений Hz от разноса были вычислены значения меры затухания поля ВВМД (коэффициент k). Эти значения получены путём аппроксимации степенной функцией закономерного нелинейного уменьшения значений Hz при увеличении разноса. Во всех случаях ход изменения значений Hz был одинаковым и для общего диапазона разноса 5-100 м, и для частных интервалов разноса по 10 м, которые последовательно перемещались в сторону увеличения с промежутком 5-10 м. Результат общей и локальной аппроксимации состоял в присваивании коэффициенту k показателя уравнения степенной функции.



Рис. 1. Аппаратура «СЭМЗ»: 1 – блок питания и регулировки тока в излучающей антенне; 2 – микровольтметр; 3 – штатив; 4 – приёмная антенна для работы на частоте 1,125 МГц; 5 – излучающая антенна с переключателем частоты 2,250 на 1,125 МГц; 6 – стержень угломерного устройства; 7 и 8 – лимбы для измерения горизонтального и вертикального угла эллипса поляризации поля ВВМД. Фото автора.

В-четвёртых, по значениям коэффициента k , идентифицирующего среднюю меру затухания в 4-х азимутах поля ВВМД в массиве осадочных пород, вычислялись средние значения R_c . Вычисления выполнялись по модифицированному уравнению степенной функции модели г. Нерюнгри [19]. В дальнейшем, в ходе апробации и верификации модель г. Нерюнгри [18] была названа модифицированной моделью. Эта модель в отличие от первоначального варианта подавляет случайные вариации мерзлотных и грунтовых факторов и, тем самым, усиливает вероятностно-статистические отношения между электродинамическим коэффициентом k и прочностной характеристикой R_c до почти функционального статуса. Для цели настоящей статьи достаточно ограничиться замечанием, что в рамках этих отношениях рост-снижение прочности, как главной причины приводит к нелинейному снижению-росту затухания поля ВВМД и описывается уравнением логистической функции [18].

Обсуждение результата эксперимента

Итоговый результат эксперимента заключается в построении по данным метода ДИЗ графиков псевдокаротажа прочности массива осадочных пород в обобщённом представлении для всей площадки жилого посёлка станции «Кюргеллях». Не будем забывать, что этот результат есть прогноз изменения прочности осадочных пород при допущении возможности их перехода из естественного мёрзлого или воздушно-сухого состояния в талое водонасыщенное состояние под совокупным влиянием климатических, и антропогенно-техногенных факторов.

Прежде чем перейти к обсуждению результатов псевдокаротажа на площадке жилого

посёлка остановимся на рассмотрении вероятностных распределений значений R_c водонасыщенных образцов осадочных пород по данным изысканий и значений R_c массива осадочных пород в прогнозируемом водонасыщенном состоянии по данным метода ДИЗ. Статистический анализ геолого-геофизических данных сделан с помощью программы А.П. Кулаичева «Стадия» [14].

Для корректности сравнения использованы данные, полученные в 25 точках скважин. Данные метода ДИЗ, полученные между скважинами, не принимали участия в сравнении с геологическими данными. Однако число лабораторных определений R_c оказалось больше указанного числа скважин. Объясняется это тем, что в некоторых скважинах опробование прочности массива осадочных пород было сделано не на одной глубине, а на 2-х и реже, 3-х срезах глубин.

Для приведения сравниваемых геолого-геофизических данных к одному числу скважин, т.е. 25 определениям R_c и одновременно усилению корректности сравнения объёмных оценок прочности по данным метода ДИЗ с точечными изыскательскими оценками прочности последние дополнительно усреднялись. Делалась эта операция с использованием результатов разделения изученных осадочных пород на инженерно-геологические элементы (ИГЭ). В тех точках скважин, где по разным причинам опробование не было сделано, прочность блоков пород с соответствующими ИГЭ оценивалась приблизительно по нормативным значениям, взятых из лабораторных ведомостей. В остальных случаях для оценки прочности принимались конкретные лабораторные значения.

Итоговый расчёт по каждой скважине средневзвешенных значений прочности выполнен

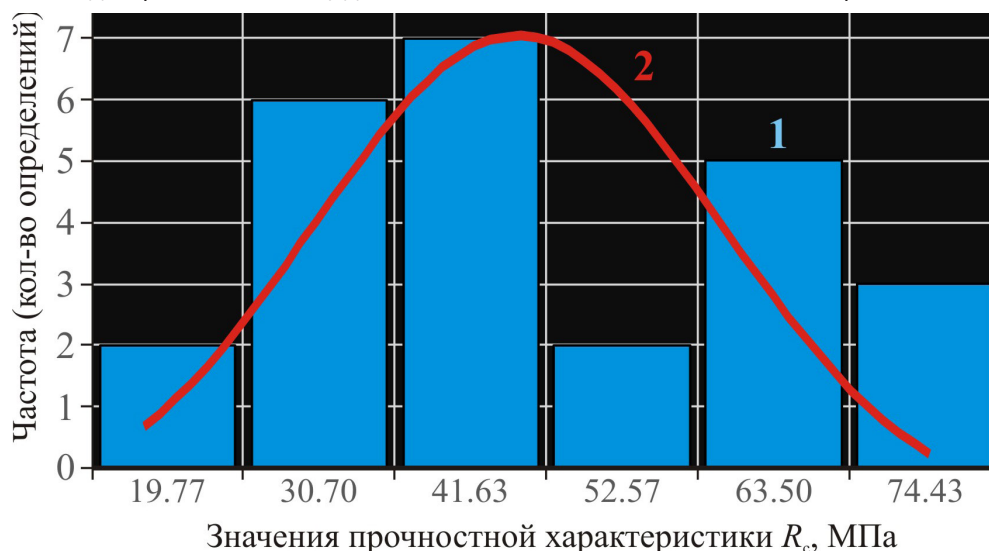


Рис. 2.

Фактическая гистограмма (1) и теоретическая вариограмма нормального закона вероятностного распределения средневзвешенных по стволу скважин лабораторных значений прочности насыщенных водой образцов осадочных пород, отобранных на глубине 6-11 м. Объем выборки – 25 определений.

по совокупности нормативных и единичных значений прочности с учётом мощности опробованных блоков массива осадочных пород.

Попутно следует сделать пояснение по термину «нормативное значение». В инженерной геологии [6] под ним понимают средние значения. В геофизике [21] при цифровой обработке данных с трансформацией физических полей Земли или полей, возбуждаемых от искусственных источников, средние значения называют «фоном» разного порядка (планетарным, региональным и пр.). Общепотребителен термин «фон» и в геохимии.

Подход, использующий ИГЭ как результат статистического обобщения материалов инженерно-геологических изысканий, впервые предложили в 1957 г. Н.В. Коломенский и И.С. Комаров. Об этом редко известном факте свидетельствует учебник по инженерной геологии [10, с. 212, 307], а также другие работы Н.В. Коломенского, в которых он развивал идею применения ИГЭ [11,12]. Благодаря усилиям Н.В. Коломенского и других учёных геологов применение ИГЭ стало узаконенным в инженерно-геологических изысканиях [4], позволяя regularизировать разрозненные в точках проходки горных выработок (шурфах, скважинах и т.д.) геологические данные. И по ним классифицировать грунты, выделяя в них по количественным признакам закономерные изменения нормативных показателей состава, свойств и состояния по латерали и глубине.

Сравнение гистограмм скорректированных по ИГЭ геологических значений средневзвешенной прочности с неизменными значениями

средней прочности по данным метода ДИЗ показывает их несбалансированное вероятностное распределение возле среднего арифметического значения (**рис. 2-4**). Однако строгая тестовая проверка, сделанная по трём независимым критериям (Колмогорова, Хи-квадрат и Омега-квадрат) [14] опровергает ошибочно принятое визуальное решение для распределений на сопоставимой глубине геолого-геофизического опробования равной 6-11 м. Это – распределение лабораторных значений прочности образцов осадочных пород, насыщенных водой (см. **рис. 2**) и распределение значений прочности массива песчаника в прогнозируемом водонасыщенном состоянии по данным метода ДИЗ на частоте 1,125 МГц (см. **рис. 3**).

Принадлежность распределений к нормальному закону дает возможность даже по небольшому числу определений оценить погрешность выборочной (экспериментальной) оценки средней прочности по отношению к теоретической генеральной оценке среднего в подмножестве информационного пространства, принадлежащего территории станции «Кюргеллях» и сопредельной части с аналогичными или близкими инженерно-геологическими условиями строительства и эксплуатации инженерных сооружений в полосе трассы АЯМ. Обозначенная погрешность, определяемая по правилам математической статистики по среднеарифметическому значению для данных изысканий и метода ДИЗ, составляет 15,5 и 17,2 % соответственно. Это означает, что при использовании геологических и геофизических выборочных среднеарифметических оценок прочности равных 45,53 и 44,90

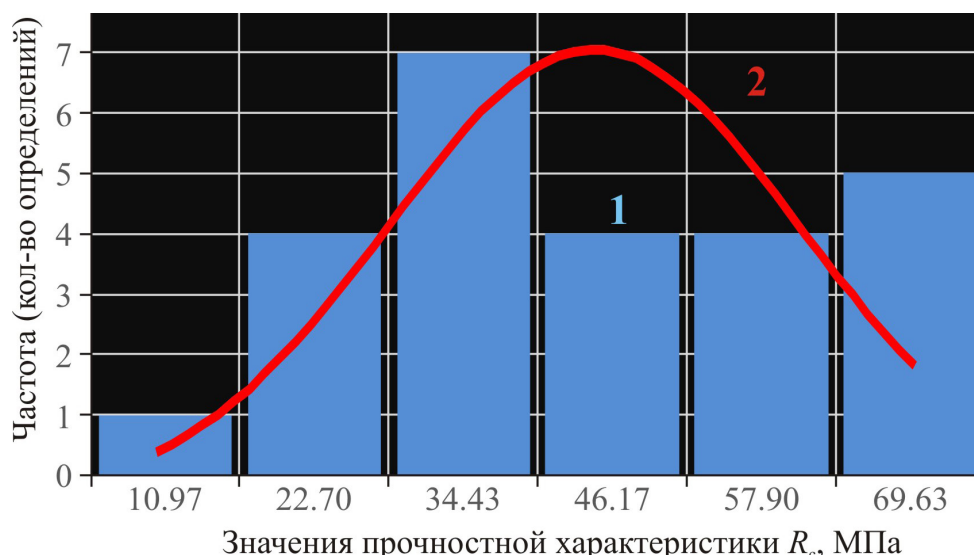


Рис. 3.

Фактическая гистограмма (1) и теоретическая вариограмма нормального закона вероятностного распределения в окрестности точек скважин средних значений прочности в прогнозируемом водонасыщенном состоянии массива осадочных пород по данным метода ДИЗ на глубине 6,5-11,7 м. Объём выборки – 25 определений.

МПа неизвестные истинные значения прочности с вероятностью 95,0 % находятся в границах доверительных интервалов 38,49-52,57 МПа и 37,18-52,62 МПа.

У распределения значений R_c , полученных по данным метода ДИЗ на глубине 7,4-23,4 м, иной вероятностный характер (рис. 4). На этой глубине, соответствующей самой низкой частоте 0,281 МГц, которую предоставляет аппаратура «СЭМЗ», изменение прочности массива осадочных пород и визуально, и по тестированию происходит не по нормальному закону.

При внимательном рассмотрении распределение на рис. 4 состоит из 2-х композиций. Первую композицию с максимумом частоты встречаемости значений прочности в интервале 35,05-49,00 МПа со средним значением 42,03 МПа можно было бы описать в частном порядке нормальным законом. Вторую композиция с монотонным ростом среднеинтервальных значений прочности от 69,93 до 97,83 МПа можно было бы описать в таком же порядке, наиболее применяемом в таких случаях логнормальным законом. При таком допущении появляется логика связи геологической природы композиций распределения прочности массива осадочных пород на глубине от 2,7-7,4 до 18,1-23,4 м с выше рассмотренными распределениями на глубине 6,5-11,7 м. Некоторая часть второго интервала глубины 7,4-23,4 м является продолжением изучения прочности на первом интервале ниже 11,7 м.

Неопределённость перехода с одного интервала на другой интервал глубины исчезает при

рассмотрении графика псевдокаротажа прочности массива осадочных пород (рис. 5). Графики построены для частоты 0,281 МГц по 67 точкам ДИЗ, расположенных в точках скважин и между ними на разном расстоянии. Определение эффективной глубины псевдокаротажа сделано по средневзвешенным послойным эффективным значениям электрофизических характеристик (сопротивления и проницаемости). При локальном росте-снижении единичных значений сопротивления от 678 до 1766 Ом·м средний показатель составил 887 Ом·м. Единичные значения проницаемости варьировали от 4,21 до 9,27 отн. ед. возле среднего показателя 5,52 отн. ед. При таких значениях изменение прочности массива пещаника было прослежено от 5,7-7,4 до 18,4-23,4 м.

Научная ценность рис. 5 состоит в том, что он без затрат материальных ресурсов, финансовых средств и драгоценного в условиях рыночной экономики времени на проведение технически сложного сейсмоакустического или электрического каротажа скважин даёт ранее неизвестное знание в части вероятностного обобщённого образа изменчивости по глубине показателя прочности мёрзлого выветренного и тектонически нарушенного массива осадочных пород для всей площадки жилого посёлка станции «Кюргеллях». По сути дела, отвлекаясь от частного характера этого образа, решение задачи псевдокаротажа прочности методом ДИЗ открывает новое направление в науках о Земле и, прежде всего, в инженерной геологии, мерзлотоведении и грунтоведении. В их число также входят

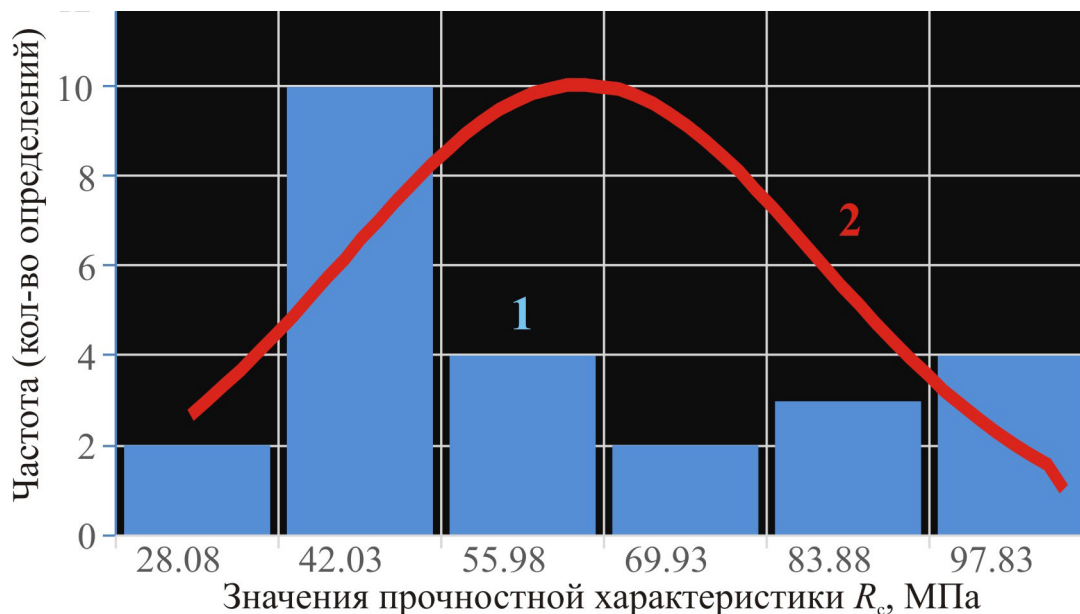


Рис. 4. Фактическая гистограмма (1) и теоретическая вариограмма нормального закона вероятностного распределения в окрестности точек скважин средних значений прочности в прогнозируемом водонасыщенном состоянии массива осадочных пород по данным метода ДИЗ на глубине 7,4-23,4 м. Объем выборки – 25 определений.

такие сопредельные научные области как инженерная геофизика и геофизика криолитозоны.

Рассмотрим особенности псевдокаротажа прочности, сделанного в 2-х вариантах (см. **рис. 5**). Первый вариант – изучение по глубине прочности массива осадочных пород в зонах тектонического дробления, трещиноватости и сопряжённых с ними участками распространения глин древней коры выветривания. Второй вариант – изучение по глубине прочности пород вне зон тектоники на более прочных участках площадки жилого посёлка.

Первая известная общая особенность, например, из книги Л.А. Ярг [25] это – закономерный нелинейный рост прочности пород с увеличением глубины их изучения вне зависимости от заданных вариантов псевдокаротажа.

Вторая особенность, но уже местного плана, состоит в разном градиенте или темпом роста прочности в зависимости от строения и прочностного состояния пород. Эта особенность делит интервал изученных глубин на 2 участка с почти линейным ростом прочности на каждом участке. Первый участок представляет собой область физического и химического выветривания массива осадочных пород. Здесь в зонах разрывной тектоники на глубине 5,7-14,8 м и вне зон на глубине 7,4-18,4 м прочность пород растёт медленно от 27,43-32,43 до 35,27-42,23 МПа с градиентом 0,549-0,633 МПа/м. Второй участок соответствует области относительно сохранного массива осадочных пород. В этой нижней части массива на глубине 14,8-18,4 и 18,4-23,4 м в зонах тектоники и вне их прочность пород растёт

стремительно от 32,43-42,23 до 84,47-100,07 МПа с аномальным градиентом 14,456 и 11,568 МПа/м соответственно.

В области выветривания градиент роста прочности пород почти одинаков в зонах тектоники и вне их. В области относительно сохранных пород градиент роста прочности пород в 1,23 раза больше в зонах тектоники, нежели вне их. Разница небольшая, но существенная для результатов обобщения псевдокаротажа прочности пород. Разница свидетельствует о том, что в относительно сохранных породах, расположенных в зонах тектоники, количество глинистого материала уменьшается с увеличением глубины быстрее, нежели в не затронутых тектоникой более консолидированных породах с закрытыми трещинами.

Большой интерес вызывает разное положение границ смены градиентов между выветренной и относительно сохранной частью массива осадочных пород. В зонах тектоники эта граница в обобщённом виде залегает на глубине 14,8 м, а вне зон тектоники на глубине 18,4 м. Разница почти в четыре метра объясняется разными тепловыми свойствами пород. В зонах тектоники, где очень много глинистого материала, заполняющего промежутки блочно-ячеистой структуры массива осадочных пород их теплоёмкость выше, а теплопроводность и температуропроводность ниже. Вне зон тектоники с доминированием трещиноватой структуры с гораздо меньшим глинистым материалом наблюдается обратный тепловой эффект. Теплоёмкость ста-

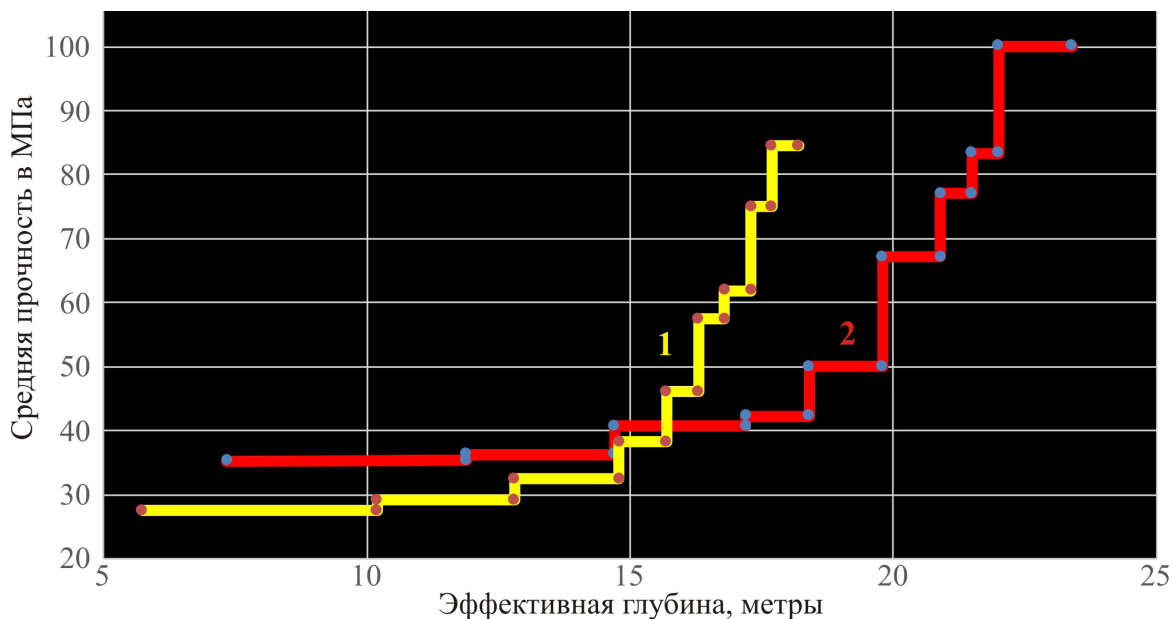


Рис. 5. Дискретные графики псевдокаротажа прочности массива осадочных пород по данным метода ДИЗ на частоте 0,281 МГц; 1 – в зонах тектонического дробления и трещиноватости; 2 – вне зон тектоники. Объем выборки – 67 точек ДИЗ.

новятся меньше, а тепло-температуропроводность увеличиваются. В этом состоит третья особенность псевдокаротажа прочности мёрзлого массива осадочных пород, Она подтверждается данными метода дискретной георадиолокации с новой на период проведения изыскательских работ аппаратурой «17ГРЛ-1».

По данным метода георадиолокации от-носительно высокое удельное затухание (3,33-2,47 дБ/м) электромагнитной волны в полосе частот 30-150 МГц прослеживается в тектонических зонах до глубины 18,3 м, а вне зон тектоники – до 24,7 м. Ниже, затухание уменьшается в 2,6-2,0 раза. При такой радиоконтрастной динамике нет сомнения в том, что положение границы смены затухания есть опорная граница предельной глубины проникновения тепловых потоков в тектонически нарушенный или ненарушенный выветренный массив осадочных пород. Разность глубины залегания этой границы по данным методов ДИЗ и георадиолокации в относительной оценке составляет в зонах тектоники 21 %, а в не зон тектоники – 29 %. Для разных методов электромагнитного возбуждения массива осадочных пород эта разница не такая уж, и большая.

Знание третьей особенности наиболее важно для решения научно-практических задач теплофизики мёрзлых грунтово-геологических сред. В частном рассматриваемом случае речь идёт об оценке ранее неизвестного (без данных режимного термокаротажа изыскательских скважин) положения нижней границы слоя годовых теплооборотов в затронутых и незатронутых тектоникой частях массива осадочных пород. В первом случае разрушительный процесс криометаморфизма [8, 17] с циклической сезонно-межгодовой сменой направления потоков холодного и тёплого воздуха проникает на площадке жилого посёлка станции «Кюргеллях» до глубины 14,8 м, а во втором случае – до 18,4 м.

Таким образом, в зонах тектоники раздроблено-сильнотрещиноватый массив за счёт меньшей глубины проникновения процесса криометаморфизма быстрее набирает свою утраченную первоначальную прочность, нежели вне зон тектоники. Критическое значение 50 МПа, означающее границу между скальными грунтами средней категории прочности (15-50 МПа) и прочной категории (50-120 МПа) [5], породы в зонах тектоники переходят в целом, на глубине 16,3 м, а вне зон – на 19,8 м. Для проектировщиков, геологов-изыскателей и строителей знание мест расположения с такой разницей глубины залегания прочных скальных пород весьма важно.

Впервые полученные по псевдокаротажу прочности массива осадочных пород цифры,

означающие мощность слоя годовых теплооборотов, не противоречат общим оценкам, ранее полученных в криолитозоне Южной Якутии [24].

Итог эксперимента

Псевдокаротаж прочности массива осадочных пород, сделанный на станции «Кюргеллях» по результатам ретроспективного анализа данных инженерно-геологических изысканий и метода ДИЗ, открыл новое научное направление в инженерной геологии, мерзловедении, грунтоведении, инженерной геофизике, геофизике криолитозоны и установил следующие факты.

Во-первых, даже в прогнозируемом водонасыщенном состоянии тектонически нарушенный мёрзлый массив осадочных пород, изученный на сопоставимой геолого-геофизической глубине 6-11 м, относится к всё ещё скальным грунтам средней категории прочности с R_c не ниже 15 МПа.

Во-вторых, впервые методом ДИЗ в отсутствие данных режимной термометрии изыскательских скважин определена глубина залегания нижней границы слоя годовых теплооборотов. В тектонических зонах она залегает на глубине 16,3 м, а вне зон тектоники – на 19,8 м.

В-третьих, в пределах слоя годовых теплооборотов линейный темп роста в зонах тектоники и вне их одинаково медленный и составляет 0,549-0,633 МПа/м. Ниже этого слоя линейный темп роста становится аномально высоким и составляет 14,456 и 11,568 МПа/м.

В-четвёртых, в области выветривания в пределах слоя годовых теплооборотов средняя прочность массива осадочных пород изменяется от 27,43-32,43 в зонах тектоники до 35,27-42,23 МПа вне зон тектоники. Ниже слоя годовых теплооборотов массив осадочных пород быстро восстанавливает свою прочность и на максимальной изученной глубине 18,4 и 23,4 м она составляет 84,47-100,07 МПа, что соответствует категории прочных скальных грунтов. С учётом применения того или иного повышающего коэффициента из СНиП 2.02.01-83 [22] массив осадочных пород в реальном морозном воздушно-сухом состоянии вероятнее всего перейдёт в категорию очень прочных скальных грунтов с R_c более 120 МПа.

Перечисленные факты имеют практическое значение как частные априорные оценки прочностного состояния массивов осадочных пород. Эти оценки рекомендуется принять во внимание проектировщикам, геологам-изыскателям и горнякам в ходе освоения Южной Якутии с решением горнопромышленных и иных задач строительства в полосе трассы АЯМ с инженерно-геологическими условиями близкими к станции «Кюргеллях». ❶

Литература

1. Акимов А.Т. Вопросы теории и практики электроразведки мёрзлых пород // Труды ПНИИИС Госстроя РСФСР, том VI. Геофизические методы исследований при изысканиях в строительстве. – М.: Изд-во Госстроя СССР, 1971, с. 6–73.
2. Булдович С.Н., Мелентьев В.С., Наумов М.С., Фурикевич О.С. Роль новейших разрывных нарушений в формировании мерзлотно-гидрогеологических условий (на примере Нерюнгринской синклинали Южно-Якутского мезозойского прогиба) // Мерзлотные исследования. – М.: Изд-во МГУ, 1976, выпуск XV, с. 120–125.
3. ГОСТ 21135.2–84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 7 с.
4. ГОСТ 20522–2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. – М.: Стандартинформ, 2013. – 16 с.
5. ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация. – М.: Изд-во «Стандартинформ», 2020. – 38 с.
6. Грунтоведение / В.Т. Трофимов, В.А. Королёв, Е.А. Вознесенский [и др.] ; под ред. В. Т. Трофимова. – 6-е изд., пере-раб. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 1024 с.
7. Железняк М.Н. Геотемпературное поле и криолитозона юго-востока Сибирской платформы. – Новосибирск: Наука, 2005. – 227 с.
8. Забелин А.В. Количественная оценка влияния процессов криогенного выветривания на устойчивость откосов бортов угольных карьеров Южной Якутии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2003. № 7. С. 11–13. EDN: KXFGGJ.
9. Игольник В.И., Шайдуров Г.Я., Тронин О.А., Хохлов М.Ф. Методы и аппаратура электроразведки на переменном токе. – Красноярск: Изд-во Сиб. федер. ун-та, 2016. – 272 с.
10. Коломенский Н.В. Инженерная геология. Учебник для геол.-развед. техникумов. Том 2. Часть 2. – М.: Изд-во Госгеолиздат, 1956. – 320 с.
11. Коломенский Н.В. Общая методика инженерно-геологических исследований. – М.: Изд-во «Недра», 1968. – 342 с.
12. Коломенский Н.В. Некоторые проблемы развития инженерной геологии // Пути дальнейшего развития инженерной геологии / Материалы дискуссии 1-го Межд. конгресса по инженерной геологии. – М.: Изд-во МГУ, 1971, с. 36–40.
13. Комплекс среднечастотной аппаратуры электромагнитного зондирования. Техническое описание. Изд-во НПО «Сибцветметавтоматика» СССР. – Красноярск, 1991. – 30 с.
14. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных. – М.: Изд-во «ФОРУМ: ИНФРА», 2006. – 512 с.
15. Лебедев В.Ф., Онущенко В.И., Литвинцева Л.М. Комплекс СЭМЗ. Методическое пособие. – Красноярск: Изд-во НПО Сибцветметавтоматика СССР, 1991. – 83 с.
16. Левкович А.И. Методика обоснования состава и объёмов инженерно-геологических изысканий для строительства различных типов зданий и сооружений промышленного, сельскохозяйственного и жилищно-гражданского назначения в районах распространения вечномёрзлых грунтов с учётом требований проектирования. – М.: Изд-во Госстроя РФСР. НПО Стройизыскания, 1989. – 173 с.
17. Мельников А.Е., Павлов С.С., Колодезников И.И. Разрушение пород насыпи новой железнодорожной линии Томмот-Кердём Амуро-Якутской магистрали под воздействием криогенного выветривания // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2; URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=12945> (дата обращения: 06.02.2022). EDN: SBWMQZ.
18. Нерадовский Л.Г. Вероятностная модель прогноза прочности песчаников методом дистанционного индуктивного зондирования в криолитозоне Южной Якутии (на примере г. Нерюнгри) // Криосфера Земли, 2022, т. XXVI, № 6, с. 43–57. DOI: 10.15372/KZ20220605. EDN: SJTDBR.
19. Нерадовский Л.Г. Оценка прочностного состояния скально-полускального основания инженерных сооружений г. Нерюнгри в криолитозоне Южной Якутии по данным геофизики (метода дистанционного индуктивного зондирования) // Недропользование XXI век. 2022. № 4 (96). С. 91–97. EDN: GYJQML.
20. Нерадовский Л.Г. Ошибки средних значений прочности осадочных пород Южной Якутии по данным метода дистанционного индуктивного зондирования // Геоинформатика, 2023, с. 48–62. EDN: KYAIKS.
21. Никитин, А. А. Статистические методы выделения геофизических аномалий. – М.: Недра, 1979. – 280 с.
22. Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83) / НИИОСП им. Н.М. Герсманова Госстроя СССР – М.: Изд-во «Стройиздат», 1986. – 415 с.
23. Титлинов В.С., Журавлёва Р.Б. Технология дистанционных индуктивных зондирований. – Екатеринбург: Изд-во УИФ Наука, 1995. – 56 с.
24. Южная Якутия: мерзлотно-гидрогеологические и инженерно-геологические условия Алданского горнопромышленного района / под ред. В.А. Кудрявцева. – М.: Изд-во МГУ, 1975. – 444 с.
25. Ярг Л.А. Методы инженерно-геологических исследований процесса и кор выветривания. – М.: Изд-во «Недра», 1991. – 139 с.

UDC: 550.379+550.85

L.G. Neradovskii, Senior Research Scientist, Laboratory of Engineering Geocryology Melnikov Permafrost Institute SB RAS, L031950N@ia.ru

PSEUDO-LOGGING OF THE STRENGTH OF SEDIMENTARY ROCKS IN SOUTH YAKUTIA AT THE STATION «KYURGELLYAKH» ACCORDING TO THE METHOD OF GEOPHYSICS

Abstract: According to the results of a retrospective analysis of the actual material of engineering-geological surveys obtained in South Yakutia at the Kyurgellakh station, the pseudo-logging of the strength of sedimentary rocks at a frequency of 0.281 MHz in the transitional separation zone of 5-100 m was performed for the first time by remote inductive sounding. In the area of weathering, the strength increases from 27.43-32.43 to 35.27-42.23 MPa equally slowly in the tectonic zones of crushing, fracturing and outside them with a gradient of 0.549-0.633 MPa/m. Below, in a relatively intact part of the rocks to a depth of 18.4-23.4 m, the strength of rocks in similar zones increases, quickly reaching 84.47-100.07 MPa with an almost equal anomalous gradient of 14.456 and 11.568 MPa/m. The boundary of the change of gradients at a depth of 16.3 and 19.8 m is identified as the lower boundary of the layer of annual heat exchanges with different thermal properties of rocks. The obtained values of the gradients are recommended to be used experimentally in South Yakutia to solve forecast problems by design, construction, survey and mining organizations at different stages of studying the strength of sedimentary rocks that make up the rocky-semi-rocky foundations of engineering structures.

Keywords: Station; research; layer of annual heat exchanges; sedimentary rocks; strength; water-saturated state; method of remote inductive sensing; frequency 1.125 and 0.281 MHz; effective depth.