

УДК 550.37

© Л.Г. Нерадовский

*Л.Г. Нерадовский*

# СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕРЗЛЫХ ПОРОД В ЯКУТСКЕ

## Введение

В учебниках В.Н. Кобрановой, В.М. Добрынина, Г.С. Вахромеева и др., при некоторой разнице в формулировках, главное предназначение науки петрофизики определено в изучении закономерностей изменения физических свойств горных пород и связей между ними.

Этим фундаментальным вопросам петрофизики в промысловой геологоразведке традиционно уделяется первостепенное внимание при изучении в скважинах коллекторов нефти и газа. В общем и инженерном мерзлотоведении объектом петрофизических исследований выступают породы и грунты (мерзлые породы, слагающие основания инженерных сооружений), находящиеся в вечномерзлом или многолетнемерзлом состоянии. Петрофизика таких геологических образований, образующих криолитозону Земли, активно развивалась в нашей стране в XX веке благодаря усилиям таких выдающихся ученых, как А.А. Петровский, Л.Я. Нестеров, Б.Н. Достовалов, А.Т. Акимов, А.А. Ананян, И.Н. Вотяков, В.С. Якупов, А.Д. Фролов, Ю.Д. Зыков и др. К сожалению, в начале XXI века, после распада СССР, планомерное развитие петрофизики криолитозоны остановилось и стало эпизодичным из-за пришедшей на смену плановому хозяйству рыночной экономики, живущей по принципу сиюминутной сверхприбыли любой ценой. Руководствуясь этим принципом, заказчики в лице государственных и частных инвесторов проектно-изыскательских и строительно-монтажных работ не хотят обременять себя расходами на получение ненужных им петрофизических знаний, получаемых в натуральных экспериментах и требующих, кроме применения методов геофизики, выполнения дополнительного объема буровых, лабораторных и иных сопутствующих работ. Кроме этого, натурные эксперименты трудно организовать и выполнить, но именно они, в отличие от лабораторных экспериментов, являются наиболее ценным источником петрофизических знаний.

В свете обозначенных трудностей в постановке натуральных экспериментов и проистекающего из этого дефицита петрофизических знаний

представленные в настоящей статье результаты натурного эксперимента, выполненного в г. Якутске в конце 80-х годов XX века, несмотря на его давность, не теряют своей актуальности не только для мерзлотоведения, но и геологии. Например, при определении глубины залегания и изучении конфигурации плотика коренных пород при разведке россыпных месторождений драгоценных металлов и камней (золота, платины, алмазов).

Научная цель эксперимента состояла в изучении вероятностных отношений между петрофизическими характеристиками мерзлых отложений озерно-болотного и аллювиального генезиса, залегающих на коренном основании долины р. Лены. Со стороны электрофизики петрофизической характеристикой предстает удельное электрическое сопротивление (УЭС), а со стороны радиофизики – скорость распространения и удельное затухание электромагнитных волн мегагерцевого диапазона частот (далее – скорость и затухание).

Производственная цель эксперимента, выполненного Якутским трестом инженерно-строительных изысканий (ЯкутГИСИЗ) с непосредственным участием автора настоящей статьи, заключалась в изучении вопросов комплексного использования или взаимозаменяемости традиционного (в системе инженерно-строительных изысканий в XX веке повсеместно применялся метод вертикального электрического зондирования на постоянном токе (ВЭЗ) и нового (в рассматриваемый период времени в ЯкутГИСИЗ и других трестах НПО «Стройизыскания» Госстроя РСФСР начал внедряться метод дискретной георадиолокации с аппаратурой «17ГРЛ-1») метода геоэлектрики при решении инженерно-геологических задач на застроенных территориях и в малообжитой труднодоступной, труднопроходимой горно-таежной или заболоченной местности.

## Общие сведения по району работ

Район работ, где расположен г. Якутск, находится в левобережной части долины р. Лена (местное якутское население издревле называет эту часть долины р. Лена «Туймаада») протяженностью около 70 км,

между Кангаласским (на севере) и Табагинским мысом (на юге). Данные по геоморфологическому строению долины «Туймаада», являющейся частью обширной и интенсивно застраиваемой Центрально-Якутской низменности, противоречивы. По схемам В.С. Гриненко и др. [1], построенным на представлениях П.А. Соловьева [2] и принятым к повсеместному научно-практическому употреблению, а также по результатам исследований С.С. Коржуева [3], долина «Туймаада» состоит из вложенных друг в друга речных террас. Это террасы голоценового возраста низкой и высокой поймы с протоками и старицами и две надпойменные террасы со сложным строением микрорельефа. Первая надпойменная терраса голоценового возраста называется «Якутской», а более высокая, вторая терраса голоценового или позднего неоплейстоценового возраста, называется «Сергелляхской».

В современных представлениях [4], построенных на детальном исследовании стратиграфии аллювиальных отложений, долина «Туймаада» представлена одной надпойменной террасой дриас-голоценового возраста с разными абсолютными отметками денудационно-аккумулятивной поверхности. Несмотря на разные геоморфологические представления, мощность озерно-болотных и аллювиальных отложений в целом закономерно возрастает от русла р. Лены к выходу на дневную поверхность ее скального основания – осадочных пород юрского возраста (алеuritов, песчаников, алевролитов). Сверху вниз общий разрез отложений закономерно сменяется по литологии от глинистых разностей (суглинков, супесей) на песчаные разности (пылеватые, мелкие, средние, крупные). Выход основания долины наблюдается в виде эрозионной поверхности Приленского плато высотой 100-120 м. В пойме и на надпойменных террасах осадочные породы преимущественно залегают на глубине 12-15 и 17-23 м.

В наиболее изученной части долины «Туймаада» (г. Якутске) высотные отметки рельефа поймы в среднем равны 88,3 м при вариациях 85,6-92,2 м. Высотные отметки рельефа надпойменной Якутской и Сергелляхской террас изменяются в диапазоне 92,8-100,4 м при среднем значении 96,3 м.

По данным ртутной (визуальное измерение температуры по шкале вытяжных ртутных термометров) и полупроводниковой термометрии скважин температура мерзлых пород в нижней части слоя годовых теплооборотов на глубине 10-15 м изменялась от  $-1,4$  до  $-7,2$  °С при среднем значении  $-3,4$  °С. При таких температурах мерзлые породы преимущественно песчаного состава находятся в твердомерзлом состоянии, представляя собой прочную

литогенную основу для оснований свайных фундаментов инженерных сооружений.

### Методика эксперимента

Методика эксперимента базировалась на известном общем подходе, который применялся и продолжает применяться в геологии. В соответствии с этим подходом проектирование основного объема работ методами геофизики предусматривает опережающую постановку опытно-методических работ на участках с известным геологическим строением. В прошлом веке эти работы проводились специализированными партиями в составе геологоразведочных экспедиций. Геологическая и экономическая эффективность отмеченного подхода, проверенная в течение нескольких десятилетий в разных регионах России, послужила основанием принять его в несколько измененном виде для обязательного использования в системе инженерно-строительных изысканий Госстроя РСФСР. К сожалению, по причине, о которой говорилось выше, рассматриваемый подход в изысканиях и, возможно, в геологии перестал применяться. Вместе с ним практически иссяк источник поступления ценнейших сведений о петрофизических характеристиках пород и грунтов и статистических зависимостях между ними.

Применительно к рассматриваемому натурному эксперименту участком с хорошо известным геологическим строением являлся г. Якутск. Из тысяч инженерно-геологических скважин (скважины бурились до глубины 10-15 м и реже – до 20-30 м), пробуренных разными государственными организациями, удалось найти всего лишь 167 скважин, вскрывших всю мерзлую толщу дисперсных (песчано-глинистых) и крупнообломочных (гравийно-галечниковых) отложений до коренного основания долины р. Лены. Причем из этих скважин только 56 скважин оказались пригодными для того, чтобы в их окрестности, свободной от зданий, сооружений и влияния электрических помех, можно было выполнить методами ВЭЗ и георадиолокации параметрические измерения характеристик электрических полей на постоянном и переменном токе. Такие измерения были выполнены одновременно в летний период 1989 г.

Работы методом ВЭЗ выполнялись симметричной 4-электродной установкой Шлюмберже с длиной питающей линии от 0,6-3,2 до 440-940 м и двумя приемными линиями с длиной 0,2 и 6,0 м. Методика работ методом ВЭЗ изложена в республиканских строительных нормах [5] и в инструкции по электроразведке [6]. Измерение напряжения и силы тока в приемной и питающей цепи выполнялось прибором АЭ-72. В прошлом веке этот прибор вместе

с прибором ЭСК-1 был чуть ли не единственным техническим инструментом измерения электрического поля на постоянном токе в трестах инженерно-строительных изысканий.

Источником тока служил комплект из 4 последовательно соединенных сухих анодных батарей «100-АМЦГ-У-190». Такой источник создавал в питающей цепи напряжение до 400 вольт, которого при необходимости хватало для изучения мерзлой толщи рыхлых отложений и коренных пород до нескольких сотен метров.

Работы методом георадиолокации проводились аппаратурой 17ГРЛ-1 с аналого-цифровой регистрацией радиоимпульсов, отраженных от границ мерзлых пород. Аппаратура сконструирована Всесоюзным научно-исследовательским институтом радиотехники (ВНИИРТ, г. Москва) (макетным образцом для конструирования являлась аппаратура «РАДАР-1П», созданная А.В. Омеляненко и В.В. Цариевым в ИГДС – Институте горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск) по заказу Госстроя РСФСР для трестов инженерно-строительных изысканий, работающих в криолитозоне на территории населенных пунктов и промышленных зон.

Для излучения зондирующего моноимпульса длительностью 8-11 наносекунд и приема радиоотражений от границ мерзлых пород применялись экранированные (от воздействия электрических помех и помех со стороны зданий и сооружений) антенны, настроенные на работу в полосе частот 30-150 МГц. Анализ волновой картины выполнялся в реальном режиме времени оператором визуальным путем на экране осциллографа 17ГРЛ-1. Цифровая регистрация времени задержки и амплитуды радиоотражений осуществлялась автоматически с высокой точностью (по времени задержки с погрешностью  $\pm 1$  наносекунда (нс), а по амплитуде с погрешностью  $\pm 1$  децибел (дБ)) по цифровому индикатору осциллографа до двойного времени задержки 500 наносекунд, обеспечивая изучение мерзлых пород до глубины залегания осадочных пород (скального основания долины р. Лены). Техничко-эксплуатационные характеристики 17ГРЛ-1, как и методика измерений, математической обработки и геологической интерпретации радиоимпульсов, подробно описаны в методическом руководстве [7].

Параметры слоев геоэлектрического разреза (УЭС, мощность, глубина залегания границ) изначально (в период постановки эксперимента) определялись по кривым ВЭЗ с использованием 3-слойных и вспомогательных палеток А.М. Пылаева [8]. В дальнейшем (в ходе написания настоящей статьи) параметры геоэлектрического разреза были уточнены с помощью компьютерной программы «IPI2Win», в которой ее

автор А.А. Бобачев реализовал алгоритм стратегии автоматического распознавания типа геоэлектрического разреза с начальным заданием оптимального минимального числа слоев [9]. При использовании программы «IPI2Win» применялись не разрозненные единичные кривые ВЭЗ, а вся их совокупность, собранная в ходе проведения эксперимента. Благодаря этому были установлены общие черты строения геоэлектрического разреза и удалены из него ранее выделенные ложные слои, не имеющие отношения к инженерно-геологическому разрезу г. Якутска.

Параметры георадиолокационного разреза (глубина залегания радиоотражающих границ, скорость и затухание волн в слоях мерзлых пород) определялись по методике многоазимутных измерений времени задержки и амплитуды радиоотражений в окрестности скважин с изменением местоположения и азимутального угла приемно-передающих антенн 17ГРЛ-1 [7]. Методика была разработана для изучения в природных условиях и на застроенных территориях анизотропных мерзлых пород с неоднородностями сложной конфигурации (льда, карста, таликов, криопэгов и др.). Из-за отсутствия технической возможности непрерывно записывать сигналы георадиолокации не представлялось возможным для их цифровой обработки применить программу «Geoscan-32» и др. Тем не менее анализ пространственной структуры общего георадиолокационного разреза был сделан с помощью программы «R9-M». Эта программа была разработана Л.Л. Никифоровой и др. в ИГДС СО РАН и адаптирована О.Ю. Евсеевой на язык TURBO PASCAL 5 [10]. В отличие от современных компьютерных программ обработки данных георадиолокации, во многом заимствующих алгоритмы обработки данных сейсморазведки, программа «R9-M» решала задачи распознавания образов и классифицировала сигналы георадиолокации по особенностям затухания электромагнитных волн с целью обнаружения неоднородностей (льдов, криопэгов – минерализованных рассолов с отрицательной температурой), имеющих первостепенное значение для строительства и безопасной эксплуатации инженерных сооружений на мерзлых породах.

Геологическая интерпретация данных ВЭЗ и георадиолокации выполнялась путем привязки к материалам колонкового бурения скважин, термометрии скважин и лабораторного анализа физико-механических и химических свойств, отобранных из скважин проб мерзлых пород.

### Статистический анализ

Статистический анализ полученных на 56 изыскательских скважинах, 281 значения трех

петрофизических характеристик слоев мерзлых пород выполнялся лицензионной программой «STADIA» [11] и включал в себя решение трех задач: 1) проверку нулевых гипотез; 2) вычисление описательных статистик; 3) изучение типа и силы корреляционной связи. Дополнительно изучались ошибки вычисления по уравнениям регрессии средних значений характеристик.

Рассмотрим по порядку решение перечисленных задач.

#### *Проверка нулевых гипотез*

Решение этой задачи должно всегда главенствовать при проведении статистического анализа фактического материала эксперимента, однако в настоящее время со стремительным ритмом деятельности человеческого общества это условие зачастую становится необязательным для прагматичных исследователей, желающих побыстрее получить интересующий результат в виде графиков корреляционных зависимостей и уравнений регрессии.

Что касается названия задачи, то в общем случае оно традиционно формулируется как отсутствие различий между эмпирическими данными и теоретическими представлениями. В рассматриваемом случае проверка нулевых гипотез означает изучение соответствия пространственного распределения ограниченного числа в собранном фактическом материале значений УЭС, скорости и затухания волн теоретическому закону нормального, или Гауссова вероятностного распределения в генеральной совокупности г. Якутска бесконечно большого числа значений этих же характеристик.

Тестовая проверка нулевых гипотез выполнялась по трем критериям: Колмогорова, омега-квадрат и хи-квадрат. По этим критериям вероятностное распределение всех исследуемых петрофизических характеристик удовлетворяет нулевым гипотезам с ошибкой 1-го рода 5%, т.е. подчиняется нормальному закону с уровнем значимости нулевых гипотез 95%. Такое, редко наблюдаемое в натуральных экспериментах единство вероятностных распределений имеет важные следствия. Во-первых, идентифицирует репрезентативность собранного фактического материала, обеспечивающего его корректный статистический анализ. Во-вторых, позволяет пользоваться наиболее теоретически изученными описательными параметрическими статистиками. В-третьих, свидетельствует, что, несмотря на неравномерный сбор в разных частях г. Якутска сравнительно небольшого по объему материала, в нем с равной вероятностью встречаются как низкие, так и высокие значения УЭС, скорости и затухания волн. Ну и наконец, в-четвертых, указывает на механизм равновероятностного распределения

этих характеристик – действие закона больших чисел [12]. Не обязательно очень большого количества чисел (более 1000), но таких, последовательное увеличение количества которых в каждом конкретном случае приводит к балансу или уравниванию действия множества разнонаправленных мерзлотно-грунтовых факторов, не поддающихся ни контролю, ни тем более управлению.

Понимание закона больших чисел, по которому происходит саморегуляризация природных процессов и видение результата этого действия в проявлении упорядоченных устойчивых общих черт вероятностных закономерностей, чрезвычайно важно. Потому, что помогает составить не искаженные, а правильные представления о тех многофакторных закономерностях, которые непостижимым для человеческого ума образом образуются в ходе процессов изначального формирования пород и дальнейшего изменения всего их внутреннего облика. В рассматриваемом случае, понимания (в текущем режиме времени проведения петрофизического эксперимента на территории г. Якутска) частного результата в виде закономерных вероятностных распределений и взаимоотношений петрофизических характеристик мерзлых пород, прошедших длительную климатическую и геологическую эпоху осадконакопления с экзогенным, криогенным метаморфизмом и испытывающих в настоящее время нарастающее техногенно-антропогенное воздействие со стороны технократического человеческого общества.

#### *Вычисление описательных статистик*

Результат вычисления описательных параметрических статистик приведен в таблице 1.

Из таблицы следует, что при доверительной вероятности 70% (такой уровень доверия к результатам работ наземными методами геофизики принят в структурной и поисково-разведочной геологии из-за геологической неоднозначности и математической некорректности решения обратных задач геофизики) значения УЭС, скорости и затухания волн сосредоточены в интервалах: 619-1499 Ом·м; 0,116-0,132 м/нс; 1,53-2,23 дБ/м. Интервалы узкие, но мера изменчивости в них характеристик, оцененная по коэффициенту вариации, разная. Как и следовало ожидать (из общего опыта работ методом ВЭЗ), лидирует УЭС с небольшой, но максимальной для г. Якутска изменчивостью 23,9%. За ней следуют затухание и скорость волн с изменчивостью 18,8 и 6,3%.

При равновероятном нормальном распределении значений физических величин их статистическую дисперсию (квадрат стандартного отклонения) и коэффициент вариации в геолого-геофизических исследованиях принято рассматривать как косвенные

Таблица 1

**Статистика петрофизических характеристик мерзлой толщи озерно-болотных и аллювиальных отложений долины р. Лены «Туймаада» на территории г. Якутска**

*Statistics of Petrophysical Characteristics of Frozen Strata of Lake-and-Marsh and Alluvial Deposits of the Lena River valley «Tuimaada» in Yakutsk*

Статистика	УЭС	Скорость	Затухание
Среднее арифметическое (AP)	792	0,124	1,88
Медианное среднее	809	0,124	1,88
Модальное среднее	нет	нет	2,02
Стандартное отклонение	190	0,008	0,35
Дисперсия	36100	0,00064	0,1225
Коэффициент вариации, %	23,9	6,4	18,8
Минимальное значение	128	0,103	0,97
Максимальное значение	2184	0,144	2,76
Количество значений	281	281	281
Уровень надежности AP (95%)	30	0,001	0,04

*Примечание:* УЭС – в Ом·м, скорость – в м/нс, затухание – в дБ/м

количественные признаки энергетической и информативной емкости, заключающие в себе чувствительность величин к изменению состава, состояния и свойств горных пород. В конкретном случае это чувствительность УЭС, скорости и затухания волн к пространственному изменению по площади и глубине минералогического и гранулометрического состава, теплового состояния и физико-механических, химических свойств мерзлых пород, слагающих основания инженерных сооружений г. Якутска и нижележащую часть геологического разреза долины р. Лены до ее скального основания. С учетом выказанного замечания наиболее информативными для изучения мерзлых пород на территории г. Якутска являются УЭС и затухание волн.

При изменчивости УЭС от 128 до 2184 Ом·м среднее арифметическое и медианное значение УЭС всей мерзлой толщи пород, лежащей на коренном основании долины р. Лены, равно около  $800 \pm 30$  Ом·м. Это значение близко к среднему значению УЭС (1200 Ом·м) этой же толщи, изученной по всей долине «Туймаада» [13]. Однако в относительном масштабе разница УЭС существенна (в г. Якутске среднее значение УЭС ниже на 40%). Причина снижения – рост температуры и засоления мерзлых пород из-за более сильного влияния антропогенно-техногенных факторов в центре г. Якутска с плотной застройкой жилыми домами и зданиями социально-

общественного назначения. В менее застроенной окрестности города (домами дачных кооперативов и инженерными сооружениями вспомогательной инфраструктуры г. Якутска) или в незастроенной долине «Туймаада» процессы антропогенно-техногенного растепления и засоления мерзлых пород действуют слабее или совсем не действуют.

При площадной вариации 0,103-0,144 м/нс и 0,97-2,76 дБ/м средние значения скорости и затухания волн равны  $0,124 \pm 0,001$  м/нс и  $1,88 \pm 0,04$  дБ/м.

При доверительной вероятности 95% неизвестные истинные средние арифметические значения, которые можно было бы теоретически оценить в генеральной совокупности г. Якутска по бесконечно большому количеству единичных определений УЭС, скорости и затухания волн, находятся в интервалах: 762-822 Ом·м; 0,123-0,125 м/нс; 1,84-1,92 дБ/м. При этом выборочные оценки отличаются от теоретических оценок средних не более чем на 4%.

*Изучение типа и силы корреляционной связи*

По аналогии с механикой, средние значения физических величин в математической статистике рассматривают как центры тяжести вероятностных распределений, обеспечивающие в пространстве вероятностных состояний надежную устойчивую координатную привязку исследуемых физических величин.

Таковыми же центрами тяжести, но меньшего порядка выступают групповые средние значения. Поэтому, прежде чем решать задачу изучения типа и силы статистической связи, собранный фактический материал был разбит методом кластеризации на статистически однородные группы значений петрофизических характеристик. Средние групповые значения характеристик служили исходным материалом для построения графиков статистической связи и поиска по ним адекватных уравнений регрессии, количественно описывающих корреляцию значений петрофизических характеристик.

Выбранный способ регуляризации или упорядочивания экспериментальных данных в существенной мере снизил действие неконтролируемых в натурном эксперименте мерзлотно-грунтовых факторов, ослабляющих истинную меру парной корреляции и тем самым затрудняющих обнаружение закономерных вероятностных отношений между исследуемыми петрофизическими характеристиками.

### Обсуждение результатов статистического анализа

Наиболее важна для решения прикладных задач статистическая зависимость, в которой в форме вероятностной закономерности в условиях *in situ* выражена известная в теории электродинамики сплошных сред причинно-следственная связь между зависимой радиофизической характеристикой

(затуханием волн) и независимой базовой электрофизической характеристикой (УЭС).

На графике этой зависимости (рис. 1) видно, что рост УЭС мерзлых пород разного генезиса и литологического состава сопровождается нелинейным спадом затухания волн.

Потери электромагнитной энергии, косвенно характеризующиеся ростом затухания волн при уменьшении УЭС, обусловлены смешанным механизмом поляризационной и ионной проводимости (движением в поровом пространстве минерального скелета свободных зарядов и смещением связанных зарядов). Такой механизм проводимости носит общий характер для всего класса мерзлых дисперсных и крупнообломочных пород. Напомним, что в рассматриваемом случае ими являются озерно-болотные и аллювиальные отложения долины р. Лены. Будучи полупроводниками, они все же тяготеют к несовершенным диэлектрикам. Эта особенность видна на рис. 2. На нем фактический материал эксперимента (см. рис. 1) показан кружками зеленого цвета. График степенной функции, аппроксимирующий статистическую зависимость затухания волн от УЭС, обозначен линией черного цвета. Пунктирные черные линии означают верхнюю и нижнюю границы доверительного интервала, в котором с вероятностью 95% распределены расчетные значения затухания волн при заданных значениях УЭС. Участки розового и голубого цвета с кружками

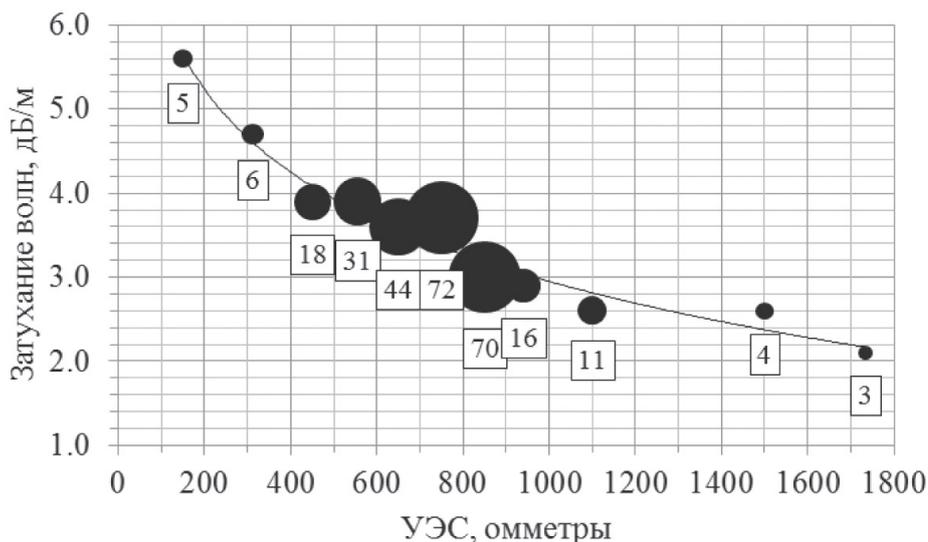


Рис. 1. Пузырьковая диаграмма обобщенной статистической зависимости затухания волн от УЭС мерзлых пород в г. Якутске. Цифры на диаграмме означают количество значений исследуемых характеристик в группах. Объем выборки – 281 определение

*Fig.1. Bubble diagram of generalized statistical dependence of wave attenuation on SER of frozen rocks in Yakutsk. The numbers on the chart indicate the number of values of the studied characteristics in the groups. The sample size is 281 definitions*

белого цвета обозначают области мерзлых грунтов и пород, классифицируемых как несовершенные проводники (индекс П) и диэлектрики (индекс Д) с прогнозируемыми значениями затухания волн (экстраполяция в сторону увеличения-уменьшения УЭС) по уравнению степенной функции.

В собранном фактическом материале к области несовершенных проводников со значениями  $УЭС < 100$  Ом·м и затуханием волн выше 6,0 дБ/м примыкают в разной степени засоленные немногочисленные разности мерзлых грунтов глинистого состава (суглинков, супесей), слагающие верхнюю часть инженерно-геологического разреза в целом до глубины 3-5 м и реже – до 7-10 м. Присутствие в мерзлых грунтах глинистых частиц, солей и незамерзшей связанной воды приводит к тому, что они при высоких температурах (выше минус 1,0 °С) находятся в неблагоприятном для строительства пластичномерзлом состоянии со сравнительно низкими  $УЭС$  (ниже 300-400 Ом·м) и высоким затуханием волн (более 4,0-4,5 дБ/м). Типичными представителями полупроводников с комплексной диэлектрической проницаемостью и проводимостью предстают на рис. 2 незасоленные пески разной зернистости с включением растительных отставков и детритов. Пески слагают среднюю часть разреза, где на глубине

10-12 м преимущественно установлен торец свайных фундаментов инженерных сооружений. Находясь в благоприятном для строительства твердомерзлом состоянии, близком к прочности бетона, мерзлые пески имеют  $УЭС = (450-1100)$  Ом·м и затухание волн 3,9-2,6 дБ/м.

К прогнозируемой области несовершенных диэлектриков с  $УЭС > 2000$  Ом·м и затуханием волн ниже 2,0 дБ/м в средней части инженерно-геологического разреза примыкают льдистые разности мерзлых песков с массивной криогенной текстурой и породы крупнообломочного состава (гравий, галька) (по данным ЯкутГИСИЗ гравийно-галечниковые грунты в среднем залегают на глубине 17-20 м), слагающие нижнюю часть разреза на границе со скальным основанием долины р. Лены. В собранном фактическом материале такие образования также немногочисленны.

Прогнозные области несовершенных проводников и диэлектриков (см. рис. 2) характеризуют диапазон локальной и региональной изменчивости затухания волн в оставшихся неизученных местах г. Якутска и за пределами. В таких случаях, как показывает опыт совместного применения методов ВЭЗ и георадиолокации, аномальные значения  $УЭС$  (до 10-1 Ом·м) и затухания волн (до 20-50 дБ/м)

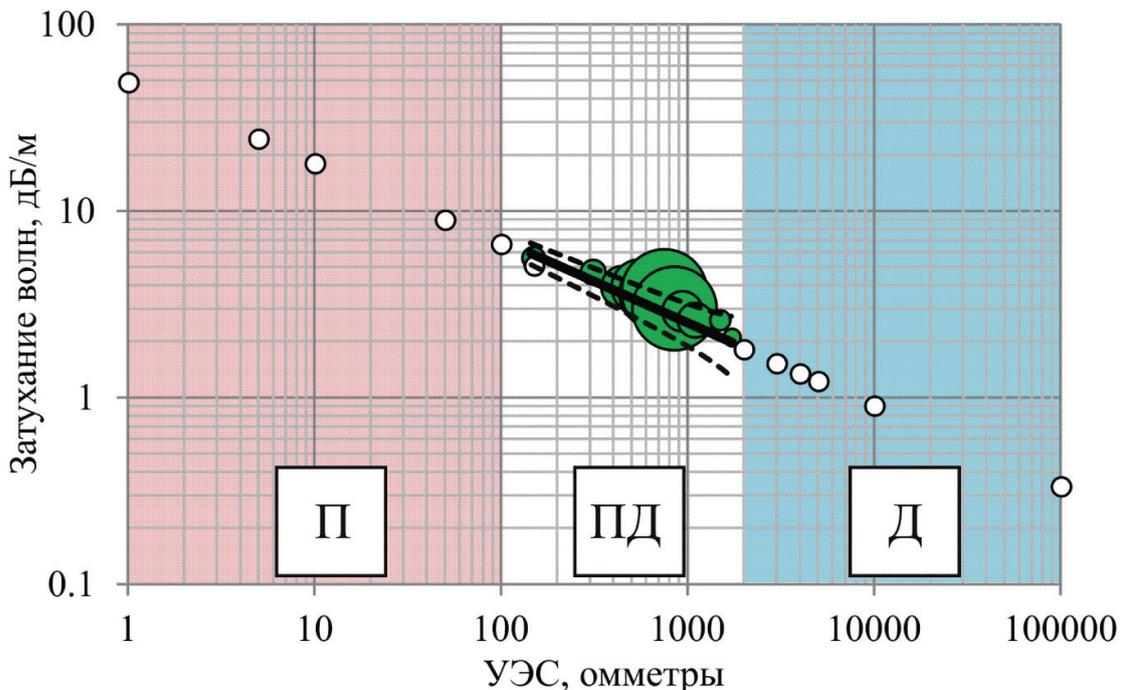


Рис. 2. Сводный график фактической и прогнозируемой обобщенной статистической зависимости затухания волн от УЭС мерзлых пород в г. Якутске и за его пределами. Пояснения в тексте

Fig. 2. Summary graph of the actual and projected generalized statistical dependence of wave attenuation on the UES of frozen rocks in Yakutsk and beyond. Explanations are in the text

наблюдаются в г. Якутске в техногенных таликах – оттаявших в основании инженерных сооружений мерзлых грунтов, насыщенных пресной или соленой водой из систем тепловодоснабжения или фекалиями из систем канализации. Кроме этого, отмеченные аномальные значения УЭС и затухания волн наблюдаются в криопэгах с минерализацией от 1-10 до 50-200 г/л, которые образуются в мерзлых грунтах при затрудненном поверхностном стоке атмосферных осадков и надмерзлотных вод в сезонноталом слое [14].

Аномально высокие значения УЭС (до  $10^4$ – $10^5$  Ом·м) и соответствующие им аномально низкие значения затухания волн (до 1,0 дБ/м и ниже) имеют сильнольдистые разности пород песчано-глинистого состава, а также повторно-жильные льды, в разной мере загрязненные глинистыми частицами и детритами вмещающей материнской среды. Такие образования редко встречаются в г. Якутске, но за его пределами распространены в ледовом комплексе аласной провинции Центрально-Якутской низменности [2], а также на Северо-Востоке Якутии [15].

В г. Якутске корреляция затухания волн с УЭС (см. рис. 1) в метрическом пространстве обобщенных (групповых) средних значений описывается уравнением степенной функции с высокой степенью статистической значимости (скорректированный коэффициент множественной детерминации  $R^2=0,944$ ):

$$G = EXP(3,767) УЭС^{-0,391}, \quad (1)$$

где  $G$  и  $УЭС$  – групповые средние значения затухания волн и удельного электрического сопротивления в дБ/м и Ом·м.

Верификация, сделанная на фактическом материале эксперимента в диапазоне средних (групповых) значений УЭС от 150 до 1734 Ом·м, показала, что значения затухания волн, вычисленные по уравнению (1), в среднем незначительно занижены – на 0,07 дБ/м и 0,91%. Единичные значения ошибок с равной вероятностью варьируют в диапазоне от –0,21 до 0,34 дБ/м. В целом, при доверительной вероятности 70% абсолютные и относительные ошибки равны  $\pm 0,21$  дБ/м и  $\pm 6,56\%$ . По двум критериям из трех (Колмогорова, омега-квадрат) вероятностное распределение ошибок подчинено нормальному (Гауссову) закону. График относительных ошибок показан на рис. 3. Ошибки вычисления по уравнению (1) затухания волн за пределами диапазона изменчивости УЭС неизвестны. Однако их можно узнать, сравнивая расчетные значения с известными значениями затухания волн.

К сожалению, из-за отсутствия фактических данных по УЭС и затуханию волн, полученных при совместном изучении методами ВЭЗ и георадио-

локации мерзлых высокоомных пород, эту задачу удастся решить лишь в единичных случаях.

Рассмотрим эти случаи.

Для области несовершенных проводников примем значения УЭС и затухания волн по ранее полученным в г. Якутске на территории Национального центра медицины [16]. Здесь на месте бурения одной из режимных гидрогеологических скважин был вскрыт криопэг с минерализацией порового раствора 6-18 г/л. По данным метода ВЭЗ, УЭС криопэга было равным 7-17 Ом·м. По данным георадиолокации, полученным с аппаратурой 17ГРЛ-1, затухание волн в слоях неоднородного по минерализации криопэга принимало три значения: 5,45; 16,7 и 11,3 дБ/м. С учетом мощности слоев криопэга среднее весовое значение затухания волн составило 12,6 дБ/м. Задав в уравнение (1) среднее значение УЭС криопэга 15,7 Ом·м, получим расчетное значение затухания волн около 15 дБ/м. В сравнении с фактическим средним значением 12,6 дБ/м относительная ошибка прогноза затухания волн в почти проводниковой среде (криопэгах) по уравнению (1) не так уж и велика и составляет 17,4%.

Для области несовершенных диэлектриков примем значения УЭС и затухания волн, полученные в ледниковом комплексе Лено-Амгинского междуречья, являющегося существенной (по площади) частью южной окраины Центрально-Якутской низменности. На этом участке бурением и термометрией скважин, лабораторным анализом, а также комплексом геофизических работ было детально изучено строение, состояние и свойства мерзлых грунтов, слагающих основание проектируемой железной дороги, до глубины 10-15 м. По данным георадиолокации [17], в ледовом комплексе, представленном до этой глубины глинистыми отложениями (лессовидными супесями и суглинками) и телами повторно-жильных льдов с общей по всему изученному разрезу средневзвешенной объемной льдистостью 60,7%, среднее модальное, т.е. чаще всего встречаемое значение затухания волн, составляет 1,02-1,31 дБ/м. По данным метода ВЭЗ, среднее значение УЭС грунтов и льдов до глубины 8-15 м было равным 4324 Ом·м [18]. Подставляя это значение в уравнение (1), получим 1,633 дБ/м. В сравнении с фактическим значением 1,31 дБ/м относительная ошибка прогноза и в области несовершенных диэлектриков невелика и составляет 22%.

При таких небольших ошибках уравнение (1) вполне пригодно для вычисления по данным ВЭЗ или электротомографии средних значений затухания волн в широком диапазоне изменчивости УЭС мерзлых дисперсных грунтов песчано-глинистого состава как в г. Якутске и его ближайшей окрестности

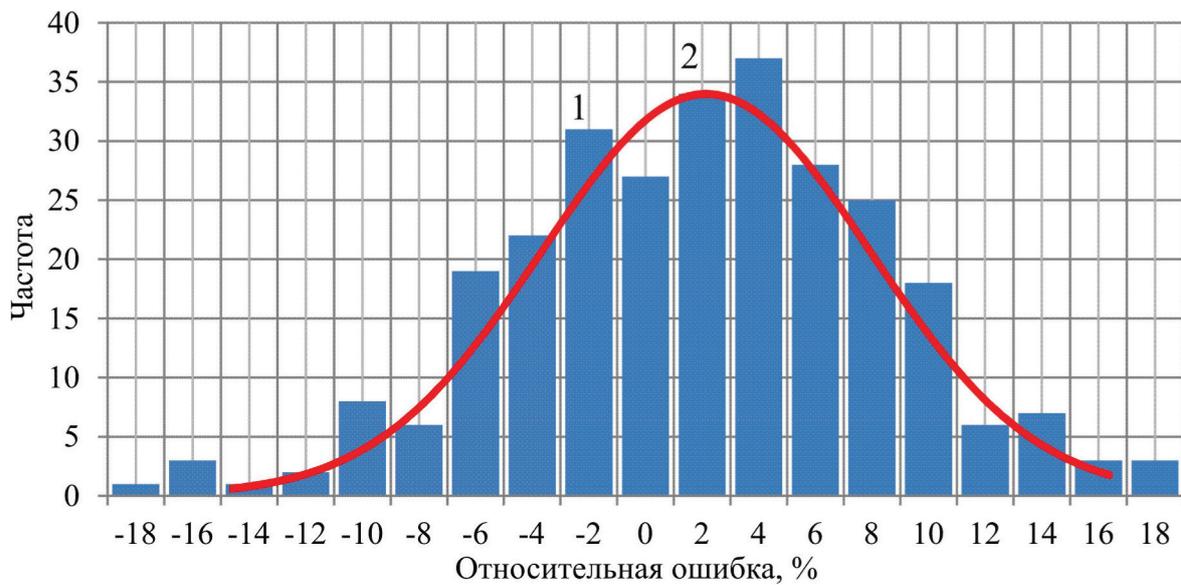


Рис. 3. График распределения экспериментальных (1 – гистограмма) и теоретических (2 – вариограмма) ошибок вычисления по уравнению степенной функции затухания волн в г. Якутске. Объем выборки – 281 определение

Fig. 3. Plot of distribution of experimental (1 – histogram) and theoretical (2 – variogram) errors of calculation on the equation of power function of attenuation of waves in Yakutsk. The sample size is 281 definitions

(долине р. Лены «Туймаада»), так и на территории ледового комплекса в южной окраине Центрально-Якутской низменности.

Расширение границ применения уравнения (1) за пределы г. Якутска, без сомнения, имеет практическую ценность, так как, руководствуясь данными только одного метода ВЭЗ или электротомографии, на ранних стадиях проектно-изыскательских работ с опережением бурения скважин и проходки мелких горных выработок (шурфов) позволяет без применения метода георадиолокации получать с приемлемой точностью информацию о затухании волн в мерзлых породах озерно-болотного, озерно-ледникового и аллювиального генезиса.

В мерзлых породах с потерями энергии электромагнитных полей скорость волн так же, как и их затухание, зависит от УЭС. В общем случае теоретические оценки скорости волн можно вычислить, зная магнитную, диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь. Например, по формуле, приведенной в работе М.Л. Владова и М.С. Судаковой [19, с. 42]. При решении конкретных инженерно-геологических задач целесообразнее использовать непосредственную корреляционную связь скорости и затухания волн. Опыт многократных измерений сигналов георадиолокации [7] показывает, что сила корреляции между этими характеристиками бывает разной, но сама связь всегда остается статистически значимой. График связи показан на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что рост затухания волн от 2,10-3,00 до 4,32-5,61 дБ/м (при переходе грунтов песчаного состава к грунтам глинистого состава) сопровождается нелинейным уменьшением скорости волн от 0,161-0,145 до 0,108-0,100 м/нс. Процесс этого изменения, как и для парной корреляции затухания волн и УЭС, описывается уравнением степенной функции на высоком уровне детерминации (скорректированное значение  $R^2 = 0,957$ ):

$$C = 0,2487 \Gamma^{-0,534}, \quad (2)$$

где  $C$  и  $\Gamma$  – групповые средние значения скорости и затухания волн, в м/нс и дБ/м.

По результатам верификации на фактическом материале эксперимента, абсолютная и относительная ошибка вычисления скорости волн по уравнению (2) по предварительно вычисленным по уравнению (1) значениям затухания волн, при доверительной вероятности 70%, составляет  $\pm 0,005$  м/нс и  $\pm 3,71\%$ . С прибавкой ошибки вычисления затухания волн по уравнению (1) относительная ошибка увеличивается до  $\pm 9,62\%$ .

В населенных пунктах проведение работ методом ВЭЗ или электротомографии встречает порой непреодолимые препятствия из-за трудности заземления электродов питающих и приемных линий в бетон, асфальт или плотный грунт. В таких случаях недостающее знание УЭС мерзлых пород нетрудно получить по данным метода георадиолокации, используя опять же уравнение степенной функции:

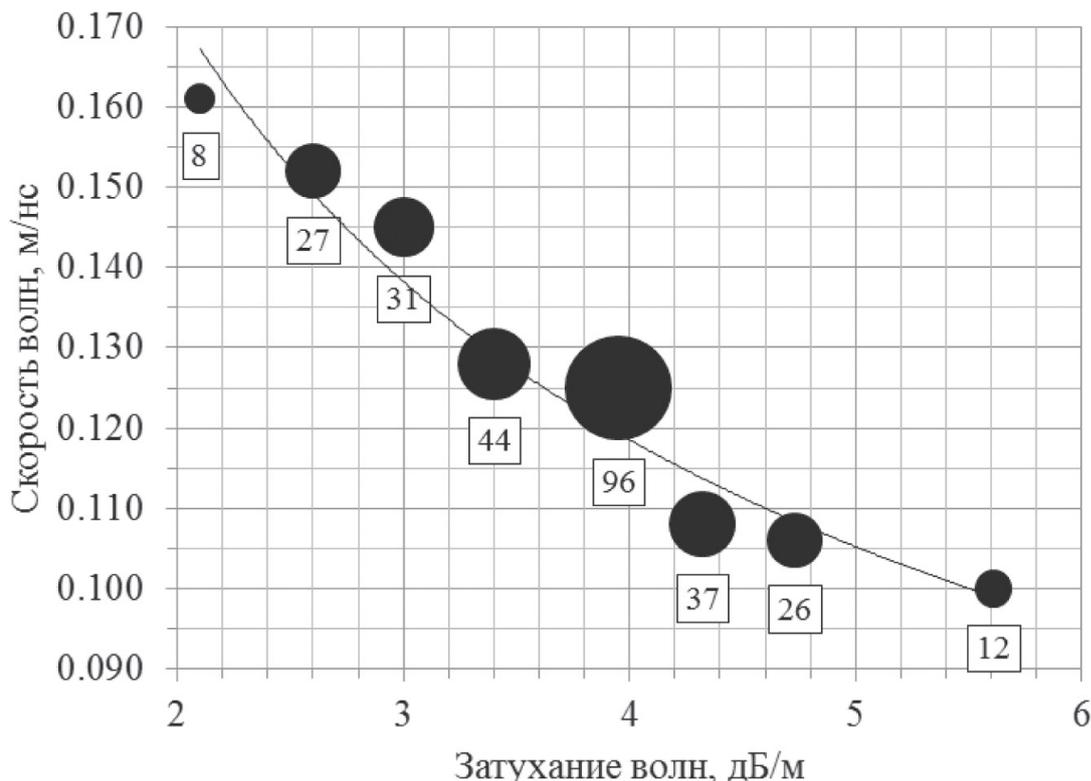


Рис. 4. Пузырьковая диаграмма обобщенной статистической зависимости радиофизических характеристик мерзлых пород в г. Якутске. Цифры на диаграмме означают количество значений исследуемых характеристик в группах. Объем выборки – 281 определение

Fig. 4. Bubble diagram of generalized statistical dependence of radiophysical characteristics of frozen rocks in Yakutsk. The numbers on the chart indicate the number of values of the studied characteristics in the groups. The sample size is 281 definitions

$$УЭС = 12404 \Gamma^{-2,391}, \quad (3)$$

где УЭС и  $\Gamma$  – групповые средние значения удельного электрического сопротивления в Ом·м и затухания волн в дБ/м.

При  $R^2 = 0,936$  вычисления по уравнению (3) в среднем незначительно завышают фактические значения УЭС на 32 Ом·м при вариациях ошибок от +370 до –237 Ом·м. При доверительной вероятности 70% абсолютная и относительная ошибка равны  $\pm 122$  Ом·м и  $\pm 15,2\%$ . В случаях необходимости использования предварительно не сгруппированных, а разрозненных единичных значений затухания, скорости волн и УЭС относительная ошибка вычисления этих характеристик (по уравнениям степенных функций, но с другими параметрами, нежели параметры уравнений (1)-(3)) увеличивается до 8,7; 13,7 и 17,5%. Ошибки невелики, что позволяет использовать расчетные значения характеристик вместе с общими их средними значениями по г. Якутску как априорные знания для решения научно-практических задач. В научном плане эти знания, полученные в условиях *in situ*, расширяют представления о физико-геокриологической модели мерзлых

пород в сфере их теплового, механического и иного взаимодействия с инженерными сооружениями г. Якутска. В практическом отношении они могут быть востребованными теми проектно-исследовательскими организациями, которые ранее не выполняли геофизические работы в г. Якутске.

Хотя априорные знания привязаны к мерзлой толще дисперсных и крупнообломочных пород озерно-болотного и аллювиального генезиса, на которой построены и эксплуатируются инженерные сооружения г. Якутска, но и в иных местах криолитозоны Якутии со схожими инженерно-геологическими условиями строительства и эксплуатации инженерных сооружений они могут оказаться полезными. Ближайшим местом к г. Якутску с наибольшим сходством обозначенных условий предстает перспективная для строительства долина р. Лены «Туймаада», являющаяся частью южной окраины Центрально-Якутской низменности. Принимая во внимание региональную общность действия законов осадконакопления и кригенезиса пород, правомерно допустить и общность реакции пород на возбуждение электрическими полями постоянного

и переменного тока. При таком системном подходе установленные в г. Якутске закономерные вероятностные взаимоотношения петрофизических характеристик мерзлых пород не могут не сохранить хотя бы общих черт и на Северо-Востоке Якутии. То есть там, где в озерно-болотистой местности приморских низменностей так же, как и в г. Якутске, широко распространены мерзлые толщи дисперсных пород песчано-глинистого состава. Остается надеяться, что и на таком огромном удалении от г. Якутска в целом сохранится вид или форма статистических зависимостей между изученными петрофизическими характеристиками. А этого достаточно для достоверного изучения относительной динамики электрофизических и радиофизических свойств мерзлых пород на геоэлектрическом и георадиолокационном разрезах.

Более того, исходя из теоретических представлений, полученные априорные знания не имеют ограничений с технической стороны при производстве работ методом георадиолокации с любым георадаром, антенны которого настроены и работают в так называемой области «георадарных частот», т.е. на центральной частоте спектра излучения-приема электромагнитных волн в воздухе в диапазоне  $10^6$ - $10^9$  Гц [20, с. 48].

В г. Якутске априорные знания радиофизических характеристик имеют значение при планировании на небольших по размерам площадках инженерно-геологических изысканий работ методом георадиолокации, имеющим неоспоримое первенство перед методом ВЭЗ и электротомографии в части детального и точного изучения строения мерзлых пород. В таких случаях общие средние значения затухания и скорости волн ( $1,88 \pm 0,04$  дБ/м и  $0,124 \pm 0,001$  м/нс) позволяют не только правильно выбрать георадарную технику для необходимой глубины изучения мерзлых пород, но и преобразовать записанные современными георадарами радарограммы в разрез глубины залегания радиоотражающих границ. Кроме этого, по начальным оценкам значений затухания волн в слоях мерзлых пород можно получить расчетным путем ценную дополнительную информацию [7]. А именно, послойные значения УЭС, по которым нетрудно построить привязанные к глубине залегания радиоотражающих границ псевдогеоэлектрические разрезы для всей площадки изысканий или частные разрезы для некоторых ее частей. По этим разрезам можно не только изучать строение и мощность мерзлой толщи пород на участках проектирования и строительства инженерных сооружений в г. Якутске, но и решать задачи оценки коррозионной активности грунтов в сезонноталом слое и условия их проводимости в контурах заземлений

энергетических и радиотехнических устройств (трансформаторов, радиостанций и пр.).

В малообжитой труднодоступной и труднопроходимой горно-таежной и болотистой местности при изысканиях протяженных линейных сооружений (газонефтепроводов, водоводов, автомобильных и железных дорог), где применение метода георадиолокации для равномерного изучения инженерно-геологического разреза по техническим причинам проблематично, а применение метода электротомографии экономически невыгодно и весьма трудоемко, рекомендуется применять в классическом варианте метод ВЭЗ, который до сих пор не потерял своей актуальности. В таких случаях построенный по данным ВЭЗ геоэлектрический разрез мерзлых пород является источником информации для решения традиционных инженерно-геологических задач. Их спектр расширяется при преобразовании значений УЭС слоев геоэлектрического разреза в георадиолокационный разрез слоев в виде средних значений скорости и затухания волн. Построить такие разрезы нетрудно, используя последние версии известной программы «Surfer» или иные подобные ей программы построения цифровых моделей.

В любом случае значения УЭС, затухания и скорости волн, получаемые методами ВЭЗ, электротомографии и георадиолокации, в их совокупности или по отдельности, представляют собой исходный фактический материал для последующих петрофизических исследований в части изучения статистических зависимостей с показателями состава, состояния и свойств мерзлых пород. При решении такого рода задач общим ключевым фактором, влияющим на изменение всего спектра физических свойств литогенной основы пород, как об этом справедливо замечают зарубежные исследователи, например геологи из Австралии [21], являются показатели плотности (пористости), гранулометрического и минералогического состава. Для пород, находящихся в мерзлом состоянии, как показали исследования И.Е. Гурьянова [22, с. 6], минимально достаточными для описания всех сочетаний компонентов породы, слагающей основания инженерных сооружений, выступают три ортогональные базисные литогенные характеристики: грансостав, влажность (льдистость) и несущая способность локального блока породы (грунтового массива), выражаемая в прочностных и деформационных свойствах.

Ко всему сказанному остается добавить, что УЭС не зря называют базовой электрофизической характеристикой. Она, как известно, наиболее информативна по своим многообразным петрофизическим связям со всеми показателями внутреннего облика немерзлых и мерзлых пород, который

раскрывается и выражается в их реакции на возбуждение электрическим полем постоянного тока. Однако в силу интегральности этого поля по УЭС невозможно с высокой детальностью и точностью изучать строение анизотропных мерзлых пород с неоднородностями сложной конфигурации, а также состав, состояние и свойства мерзлых пород.

Критерию детальности и точности изучения мерзлых пород при их возбуждении электрическим полем переменного тока удовлетворяет радиофизическая характеристика – удельное затухание волн, которая, ко всему прочему, в наибольшей степени наследует от УЭС качество информативности.

В последнее время на эту динамическую характеристику электромагнитного поля все чаще стали обращать внимание и использовать ее в решении нетрадиционных задач геофизики. Впечатляющим примером решения одной из таких задач, применительно к оценке методом георадиолокации урожайности почв сельскохозяйственных районов Германии и Чехии, являются лабораторные опыты, которые обнаружили на частоте 0,6-1,6 ГГц статистическую зависимость между коэффициентом добротности  $Q$  (одна из характеристик затухания волн) и содержанием в почвах связанной воды и глинисто-илистых частиц [23]. Еще один пример – натуральный эксперимент, установивший статистическую связь амплитуды сигналов георадиолокации и влажности стволов спиленных и складированных деревьев (ели, осины, тополя) [24]. Сильная корреляция этих характеристик позволила вычислять по данным георадиолокации влажность древесины с ошибкой (6÷22)%. Благодаря этому был сделан вывод о перспективе применения метода георадиолокации в лесной промышленности с целью оперативного определения влажности древесины. Что касается задач собственно петрофизики мерзлых пород, слагающих основания инженерных сооружений, то их решение методом георадиолокации и методом индукции с использованием характеристик затухания волн подробно описано в обобщающей работе по Якутии [25]. Общие вопросы петрофизики мерзлых пород и подземных льдов обстоятельно и разносторонне рассмотрены теоретически и экспериментально в фундаментальной работе А.Д. Фролова [26]. Систематизированный материал по электропроводности мерзлых толщ Северо-Востока СССР находится в работе В.С. Якупова [15]. Практические аспекты и номограммы количественной экспресс-оценки физико-механических свойств мерзлых дисперсных грунтов методами геофизики на начальных стадиях инженерно-геологических изысканий в криолитозоне России рассмотрены и приведены в обобщающей

работе двух институтов Госстроя СССР [26] (Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве и Научно-исследовательский институт оснований и подземных сооружений им Н.М. Герсеванова).

### Заключение

Статистические зависимости базовой электрофизической характеристики УЭС и радиофизических характеристик скорости распространения и удельного затухания электромагнитных волн, изученные на территории одного из мегаполисов криолитозоны России – г. Якутска, расширяют научные представления в слабоизученной области петрофизики геологических образований, находящихся в вечномерзлом или многолетнемерзлом состоянии. Речь идет о наблюдаемых на графиках статистических зависимостей вероятностных закономерностях, которые выражают реакцию на возбуждение искусственно вызванными электрическими полями постоянного и переменного тока мерзлой толщи озерно-болотных и аллювиальных отложений долины р. Лены, используемой в качестве оснований фундаментов инженерных сооружений. Априорные знания в виде общих средних значений УЭС, скорости и затухания волн, а также статистических зависимостей этих петрофизических характеристик могут быть без особой погрешности использованы не только в г. Якутске, но и за его пределами с близким инженерно-геологическим строением, например в прилегающей территории долины р. Лены «Туймаада», а также на южной окраине Центрально-Якутской равнины. Прикладной интерес статистические зависимости петрофизических характеристик мерзлых пород получают благодаря ранее неизвестной (при проведении натуральных экспериментов в криолитозоне России) возможности выполнять преобразования геоэлектрических разрезов в георадиолокационные разрезы и наоборот. То есть по данным методов ВЭЗ и/или электротомографии быстро и без излишних дополнительных финансовых и материальных затрат, связанных с производством георадиолокации и бурением дорогостоящих заверочных буровых скважин, получать дополнительно отсутствующую информацию о радиофизических характеристиках. Аналогичным образом по данным метода георадиолокации получать сведения о базовой электрофизической характеристике (УЭС). Относительная ошибка таких преобразований с использованием степенных уравнений регрессии не превышает 20%.

**Ключевые слова:** ВЭЗ, георадиолокация, мерзлые породы, затухание, скорость, удельное электрическое сопротивление, ошибка.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Гриненко В.С., Камалетдинов В.А., Сластенов Ю.Л., Щербаков О.И. Геологическое строение Большого Якутска // Региональная геология Якутии. – Якутск : Изд-во Якутского гос. ун-та, 1995. – С. 3-20.
2. Соловьев П.А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья. – М. : Изд-во АН СССР, 1959. – 144 с.
3. Коржуев С.С. Геоморфология долины средней Лены и прилегающих районов. – М. : Изд-во Академии наук СССР, 1959. – 151 с.
4. Спектор В.В., Бакулина Н.Т., Спектор В.Б. Рельеф и возраст аллювиального покрова долины р. Лены на «Якутском разбое» // Геоморфология. – 2008. – № 1. – С. 87-94.
5. Инструкция по применению электроразведки при инженерных изысканиях в строительстве. Постоянный ток и естественное поле. Республиканские строительные нормы. РСН 43-74. – М. : Изд-во Госстроя РСФСР, 1975. – 120 с.
6. Инструкция по электроразведке / под ред. Г.С. Франтова. – Л. : Недра, 1984. – 534 с.
7. Нерадовский Л.Г. Методическое руководство по изучению многолетнемерзлых пород методом динамической георадиолокации. – М. : Изд-во РАН, 2009. – 337 с. – (Серия «Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий» : ежегод. изд. МСНТ / гл. ред. Н.П. Ершов).
8. Пылаев А.М. Руководство по интерпретации вертикальных электрических зондирований. Издание второе, исправленное. – М. : Недра, 1968. – 148 с.
9. Бобачев А.А. Руководство пользователя. Программа IPI2Win (версия 2). – М. : Изд-во МГУ, 2001. – 22 с.
10. Инструкция пользователя программы «R9M». Обработка и интерпретация данных георадиолокации применительно к аппаратуре 17ГРЛ-1. – Якутск : Трест ЯкутГИСИЗ, 1990. – 37 с.
11. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных, 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Форум : ИНФРА-М. – 2006. – 512 с.
12. Пасхавер И.С. Закон больших чисел и статистические закономерности. – М. : Статистика, 1974. – 152 с.
13. Нерадовский Л.Г. Статистика удельного электрического сопротивления мерзлых рыхлых отложений и осадочных пород долины реки Лены «Туймаада» // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 49-55.
14. Анисимова Н.П., Павлова Н.А. Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии / отв. ред. В.В. Шепелёв ; Ин-т мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. – Новосибирск : Академическое изд-во «Гео», 2014. – 189 с.
15. Якупов В.С. Электропроводность и геоэлектрический разрез мёрзлых толщ // Труды Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского института. Выпуск 20. – М. : Изд-во «Наука», 1968. – 179 с.
16. Нерадовский Л.Г., Омельяненко А.В., Федорова Л.Л. Методические возможности георадиолокации мониторинга состояния мерзлых грунтов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М. : МГГУ, 2004. – № 7. – С. 44-47.
17. Нерадовский Л.Г. Оценка объемной льдистости дисперсных грунтов Центрально-Якутской низменности по данным георадиолокации // Лёд и Снег. – 2019. – Т. 59, № 1. – С. 81-92.
18. Нерадовский Л.Г. Строение ледового комплекса южной окраины Лено-Амгинского междуречья по данным метода вертикального электрического зондирования // Криосфера Земли. – 2019. – Т. XXIII, № 5. – С. 35-48.
19. Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений. – М. : ГЕОС, 2017. – 240 с.
20. Ground penetrating radar theory and applications / ed. by Harry M. Jol. – Elsevier Science, 2009. – 523 p.
21. Dentith M., Enkin R.J., Morris W., Adams C., Bourne B. Petrophysics and mineral exploration: a workflow for data analysis and a new interpretation framework // Geophysical Prospecting. – 2019. – V. 68, Issue 1. – P. 178-199. – URL: <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12882> (date of access: 18.05.2019).
22. Гурьянов И.Е. Инженерная криолитология: прочность вечномерзлых грунтов / Ин-т мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. – Новосибирск : Академическое изд-во «Гео», 2009. – 139 с.
23. Wunderlich T., Rabbel W. Absorption and frequency shift of GPR signals in sandy and silty soils: empirical relations between quality factor Q, complex permittivity and clay and water contents // Near Surface Geophysics. – 2013. – V. 11, Issue 2. – P. 117-128. – URL: <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2012025> (date of access: 24.05.2019).
24. Hans G., Redman D., Leblon B., Nader J., la Roque A. Determination of log moisture content using early-time GPR signal // Wood Material Science and Engineering. – 2015. – V. 10, Issue 1. – P. 112-129. – URL: <https://doi.org/10.1080/17480272.2014.939714> (date of access: 23.05.2019).
25. Нерадовский, Л.Г. Технология электромагнитного зондирования мерзлых грунтов слоя годовых теплооборотов / отв. ред. А.В. Омельяненко ; Ин-т мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. – М. : АНО Изд. дом «Науч. обозрение», 2018. – 622 с.
26. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. – 2-е изд., доп. и испр. – Пушкино : ОНТИ ПНЦ РАН, 2005. – 607 с.
27. Рекомендации по определению физико-механических свойств мерзлых дисперсных грунтов

геофизическими методами / Произв. и НИИ по инж. изысканиям в стр.-ве. – М. : Стройиздат, 1989. – 56 с.

### REFERENCES

1. Grinenko V.S., Kamaletdinov V.A., Slastenov Yu.L., Shcherbakov O.I. The geological structure of Greater Yakutsk // Regional Geology of Yakutia. Yakutsk : Izd-vo Yakutskogo gos. un-ta, 1995. P. 3-20.
2. Solovyev P.A. Permafrost in the Northern Part of the Lena-Amga Watershed. Moscow : Izd-vo AN SSSR, 1959. 144 p.
3. Korzhuyev S.S. Geomorphology of the Middle Lena Valley and Adjacent Areas. Moscow : Izd-vo AN SSSR, 1959. 151 p.
4. Spektor V.V., Bakulina N.T., Spektor V.B. Relief and Age of alluvial Cover of The Lena River Valley on the Yakutsky Razboy // Geomorfologiya. 2008. No. 1. P. 87-94.
5. Guidelines for Application of Electrical Methods in Engineering Site Investigations. DC Resistivity and Self-Potential Methods. Regional Code of Practice RSN 43-74. Moscow : Izd-vo Gosstroya RSFSR, 1975. 120 p.
6. Instructions for Electromagnetics. Edited by G.S. Frantov. L. : Nedra, 1984. 534 p.
7. Neradovskii L.G. Guidelines for Permafrost Investigation by Dynamic GPR Method. Moscow : Izd-vo RAN, 2009. 337 p. (Russian Academy of Sciences Press. Selected Papers of the Russian School for Science and Technology Problems Series, MCHT Annual Publ, ed. N.P. Ershov).
8. Pylayev A.M. Guide to Interpretation of Vertical Electrical Soundings. Second edition, revised, Moscow : Izd-wo Nedra, 1968. 148 p.
9. Bobachev A.A. A User's Guide. The Program IPI2Win (Version 2). Moscow : the Moscow State University, 2001. 22 p.
10. A User Manual of the Program R9M. Processing and Interpretation of Geo-Radar Data in Relation to the Equipment 17GRL-1. Yakutsk : Trust YakutTECS, 1990. 37 p.
11. Kulaichev A.P. Methods and Tools for Integrated Data Analysis, 4th ed., remade and add. Moscow : Forum : INFRA-M, 2006. 512 p.
12. Paskhaver I.S. The Law of Large Numbers and Statistical Regularities. Moscow : Statistics, 1974. 152 p.
13. Neradovskii L.G. Statistics of Electrical Resistivity of Frozen Loose Sediments and Sedimentary Rocks of the Lena River Valley Tuimaada // Arctic and Subarctic natural resources. 2019. V. 24, No. 2. P. 49-55.
14. Anisimova, N.P., Pavlova N.A. Hydrogeochemical Studies of Permafrost in Central Yakutia. Novosibirsk : Academic Publishing House «Geo», 2014. 189 p.
15. Yakupov V.S. Electrical Conductivity and Geoelectric Section of Frozen Strata // Proceedings of the Northern Integrated Research Institute. Issue 20. Moscow : Publishing House Science, 1968. 179 p.
16. Neradovskii L.G., Omelyanenko A.V., Fedorova L.L. Methodological Possibilities of Geo-radar Monitoring of Frozen Soils // Mountain Information and Analytical Bulletin. Moscow : the Moscow State University, 2004. No. 7. P. 44-47.
17. Neradovskii L.G. Estimation of Volumetric Ice Content of Dispersed Soils of the Central Yakut Lowland According to Georadolocation Data // Ice and Snow. 2019. V. 59, No. 1. P. 81-92.
18. Neradovskii L.G. The Structure of the Ice Complex of the Southern Outskirts of the Lena-and-Amga Interfluvium According to the Method of Vertical Electric Sensing // Cryosphere of the Earth. 2019. V. XXIII, No. 5. P. 35-48.
19. Vladov M.L., Sudakova M.S. Georadiolokaciya. Ground Probing Radar. From Physical Principles to Promising Directions. Moscow : GEOS, 2017. 240 p.
20. Ground penetrating radar theory and applications. Ed. by Harry M. Jol. Elsevier Science, 2009. 523 p.
21. Dentith M., Enkin R.J., Morris W., Adams C., Bourne B. Petrophysics and mineral exploration: a workflow for data analysis and a new interpretation framework // Geophysical Prospecting. 2019. V. 68, Issue 1. P. 178-199. URL: <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12882> (date of access: 18.05.2019).
22. Guryanov I.E. Engineering Cryolithology: Strength of Permafrost Soils. Novosibirsk : Academic Publishing House «Geo», 2009. 139 p.
23. Wunderlich T., Rabbel W. Absorption and frequency shift of GPR signals in sandy and silty soils: empirical relations between quality factor Q, complex permittivity and clay and water contents // Near Surface Geophysics. 2013. V. 11, Issue 2. P. 117-128. URL: <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2012025> (date of access: 24.05.2019).
24. Hans G., Redman D., Leblon B., Nader J., La Roque A. Determination of log moisture content using early-time GPR signal // Wood Material Science and Engineering. 2015. V. 10, Issue 1. P. 112-129. URL: <https://doi.org/10.1080/17480272.2014.939714> (date of access: 23.05.2019).
25. Neradovskii L.G. Electromagnetic Sounding Technology for Frozen Ground within the Layer of Annual Temperature Variations. Moscow : ANO Izd. dom «Nauch. Obozrenie», 2018. 622 p.
26. Frolov A.D. Electrical and Elastic Properties of Frozen Rocks and Ice. Second Amended and Revised Edition. Pushchino : DSTI PSC RAS, 2005. 607 p.
27. Recommendations for Determination of Physical and Mechanical Properties of Frozen Dispersed Soils by Geophysical Methods. Moscow : Stroizdat, 1989. 56 p.