ОПЫТ *ПРИМЕНЕНИЯ* ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ ЯКУТИИ

Нерадовский Л. Г.
Старший научный сотрудник лаборатории инженерной геокриологии Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, к.т.н., Якутск
leoner@mpi.ysn.ru

Аннотация

Представлены результаты научных исследований архивного материала изыскательских работ, полученных в одном из населённых пунктов Северо-Востока Якутии. Показаны в сравнении с классическими методами электроразведки на постоянном токе ранее неизвестные и важные для производства возможности метода георадиолокации в части определения объёмной влажности (льдистости) мёрзлых дисперсных отложений, а также их температуры в слое годовых теплооборотов на глубине 10 м

Ключевые слова

Георадиолокация, ВЭЗ, волновые характеристики, УЭС, температура, объёмная влажность, (льдистость), льды, модели

Введение

Современный период развития геокриологической науки в условиях рыночной экономики отличается значительными трудностями в организации полевых экспериментов с целью получения новых знаний в области петрофизики многолетнемёрзлых пород. Заказчики проектно-изыскательских работ в этом не заинтересованы, а со стороны Сибирского отделения Российской Академии Наук не хватает объёма финансирования, выделяемого на эти цели в рамках разного рода фондов, программ и проектов. Ситуация становится тупиковой когда дело заходит о проведении экспериментальных исследований в труднодоступных районах Сибири и Дальнего Востока. Именно поэтому автор продолжает публикацию серии петрофизических исследований, проводимых в Институте мерзлотоведения им. П. И. Мельникова (ИМЗ) СО РАН, используя имеющиеся архивные материалы инженерно-строительных изысканий прошлого века, накопленные по территории Республики Саха (Якутии). Цель такого рода исследований состоит в раскрытии и активном использовании менеджерами строительных компаний ранее неизвестных возможностей метода георадиолокации в части быстрого, экономичного и экологичного изучения на разных стадиях проектно-изыскательских работ строения, состояния и свойств многолетнемёрзлых пород, используемых в качестве грунтовых оснований строящихся и эксплуатируемых инженерных сооружений.

Объект исследований

Объект исследований – архивные изыскательские материалы 1972-1988 гг. Они получены в районе проектируемой площадки строительства «Дом быта на 70 рабочих мест» в посёлке Черском, Нижнеколымского района Республики Саха (Якутия). Среди них есть материалы1980 г., полученные методами вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и электропрофилирования (ЭП) на постоянном токе при изучении подземных льдов и кровли коренных пород на площади одной из квартальных застроек. Кратко отметим, что для решения этих задач в методе ВЭЗ применялась симметричная 4-х электродная установка с ориентацией питающей линии вдоль рельефа местности, используя незастроенное пространство между зданиями и сооружениями. В методе ЭП использовалась односторонняя осевая дипольная установка при расстоянии между центрами диполей 40 м. Длина питающего диполя 5 м, а приёмного – 2 м.

Метод ВЭЗ производился при увеличении полуразносов питающей линии АВ/2 от 0,3 м до 220-470 м с использованием 2-х приёмных линий. Переход измерений между ними выполнялся на

полуразносах 9 и 15 м. Начальная ветвь, вычисляемых в полевых условиях кривых кажущегося электрического сопротивления, прослеживалась на приёмной линии MN=0,2 м, а нижняя ветвь – на линии MN=6,0 м.

Измерения разности потенциалов и силы тока в приёмной и питающей линиях методов ВЭЗ и ЭП выполнялись прибором АЭ-72.

Площадка размером 11х16 м^2 расположена в застроенной части посёлка на наклонной поверхности высокой надпойменной террасы р. Колымы с абсолютными высотными отметками 28,5-32,7 м. По данным бурения 11 скважин разрез района работ, прилегающего к площадке, сложен до глубины 10-13 м верхнечетвертичными отложениями аллювиального генезиса. Это – супеси и суглинки со слоистыми криогенными текстурами, содержащие примеси растительных остатков. Встречаются и массивные криотекстуры, но редко. Наряду с линзами и прослоями текстурного (сегрегационного) льда глинистые образования содержат залежи льдов повторно-жильного генезиса (ПЖЛ), погребённых под наносами на глубине 3,0-4,1 м. В разрезе залежи льдов прослеживаются по данным бурения скважин до 3,9-7,0 м.

В виду очень сложной конфигурации ПЖЛ (в первом приближение они представляют собой вертикальное или наклонное клинообразное тело) глубину залегания их нижней границы невозможно установить ни одним методом геофизики. Эта задача частично решается при условии рассмотрения ПЖЛ вместе с вмещающими их льдистыми грунтами в виде горизонтально ориентированной зоны льдонасыщения. По данным метода ВЭЗ нижняя граница этой высокоомной зоны действительно существует и уверенно прослеживается в геоэлектрическом разрезе на глубине около 9 м. По ней можно примерно судить о глубине проникновения ПЖЛ в массив дисперсных грунтов.

Уверенно прослеживаются границы ПЖЛ и в плане по высокоомным аномалиям метода ЭП. В районе исследуемой площадки этим методом обнаружено три тела ПЖЛ шириной 5-15 м протягивающихся в северо-восточном направлении.

Суммарная весовая влажность мёрзлых супесей и суглинков изменялась по глубине и по площади в диапазоне 0,20-0,59 д. ед. при среднем значении 0,38±0,04 д. ед.

Температурный режим мёрзлых дисперсных грунтов неустойчив. Среднегодовая температура на глубине 10 м колеблется в годовом цикле в диапазоне –(4-8)^{o}С. По данным термометрии разных лет нижняя граница слоя годовых теплооборотов (СГТ) находится на глубине 12 м.

Кровля коренных пород не вскрыта бурением скважин, но по данным метода ВЭЗ она приблизительно залегает на глубине 11-32 м при среднем значении 21 м.

Методика полевых исследований

Исследования методом георадиолокации проводились весной 1988 г. тогда ещё редкой в СССР георадарной техникой – аппаратурой 17ГРЛ-1. Эта техника была специально разработана Всесоюзным научно-исследовательским Институтом радиотехники по заказу Госстроя РСФСР с целью изучения массивов мёрзлых грунтов на застроенных территориях, где применение других методов геофизики встречало большие затруднения, а нередко и невозможность их использования. Ради возможного интереса читателей на рис. 1 показана фотография общего вида аппаратуры 17ГРЛ-1.

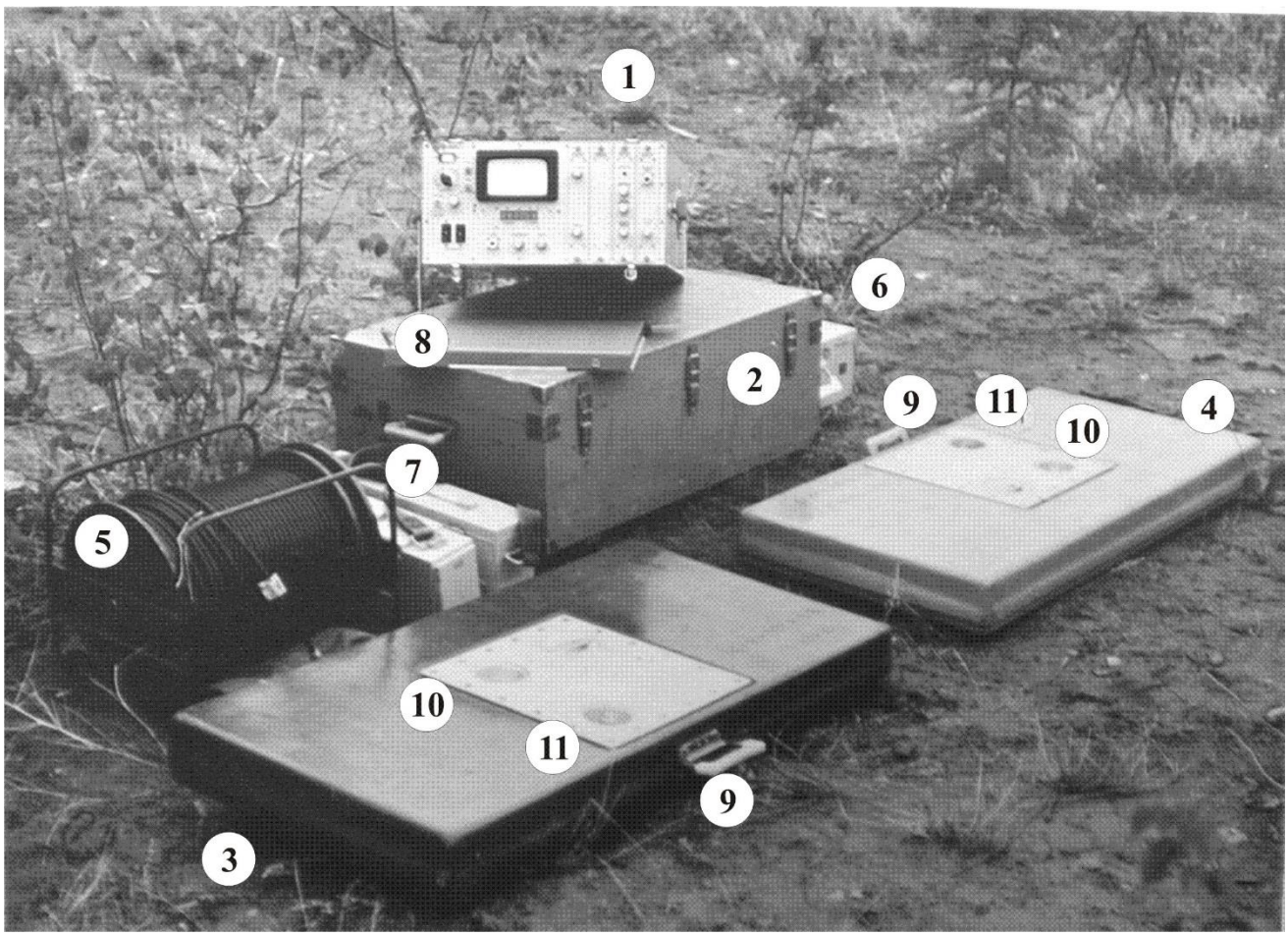

Рис. 1. Общий вид комплекта аппаратуры дискретной георадиолокации 17ГРЛ-1: 1-устройство обработки и отображения информации (УООИ); 2-ящик для хранения и транспортировки УООИ; 3-антенна приёмная; 4-антенна излучающая; 5-катушка с коаксиальным кабелем длиной 70 м; 6-аккумулятор питания УООИ; 7-аккумуляторы питания антенн; 8-защитная крышка УООИ; 9-ручки для переноски антенн; 10-разъёмы подключения кабеля; 10-разъёмы подключения аккумуляторов

Аппаратура 17ГРЛ-1 работала в полосе частот 30-150 МГц. Точное значение центральной частоты спектра моноимпульсного электромагнитного излучения неизвестно, но по данным А. В. Омельяненко [8] она равна около 40 МГц. В отличие от современных образцов георадаров, достоинством 17ГРЛ-1 являлся ряд технико-эксплуатационных характеристик. Это – возможность изучать в аналого-цифровом виде в реальном режиме времени динамику волновой картины на экране электронно-лучевой трубки устройства обработки и отображения информации, а также возможность проводить измерения в зимний период года при низких температурах воздуха (до –(40-45)^{o}С). Причём, амплитуда отражённых импульсов измерялась в децибелах. В этом масштабе широкий динамический диапазон записи сигналов выравнивается, что в существенной мере облегчает задачу их визуального обнаружения и дальнейшего количественного анализа. Главный недостаток 17ГРЛ-1 состоял в отсутствии автоматизированной записи осциллограмм сигналов в точках зондирований. По этой причине в статье не приводятся рисунки записей сигналов георадиолокации.

На период проведения полевых работ перед методом георадиолокации ставились две задачи: 1) уточнить данные метода ВЭЗ в части определения глубины залегания кровли коренных пород; 2) изучить условия залегания ПЖЛ в дополнение к результатам работ методом ЭП. Для решения этих задач на застроенной площадке была разбита неравномерная прямоугольная сеть, состоящая из 9 профилей, ориентированных в широтном направлении и пересекающих точки скважин, а также тела ПЖЛ. Точки зондирований располагались по линиям профилей. Расстояние между точками

изменялось в зависимости от имеющегося свободного пространства между зданиями и инженерными коммуникациями и в среднем составило 5 м. На участках пересечения ПЖЛ расстояние между точками зондирований уменьшалось до 2-3 м. Всего зондирования выполнены в 132 точках.

Работы методом георадиолокации выполнялись по методике многократных измерений сигналов в окрестности точек поисковой сети наблюдений с изменением положения и ориентации приёмной и передающей антенн [4]. Заметим, что на период проведения полевых работ отдельные элементы методики ещё только начинали разрабатываться, исходя из принципа стохастической природы сигналов георадиолокации.

В окрестности точек скважин параметрические измерения сигналов выполнялись по 10 раз в углах и центре квадратов с поворотом продольной оси антенного диполя на 90°. Размер квадратов 3-5 м. В остальных точках сети наблюдений измерения сигналов выполнялись по 2 раза, ограничиваясь только изменением ориентации антенн, т.е. поворотом их продольной оси на 90°. Квадрат был выбран в качестве одной из правильных геометрических фигур с целью накопления и суммирования первичной информации и последующего подавления на стадии цифровой обработки случайных амплитудно-фазовых вариаций нерасчленённого поля отражённых, рассеянных (диффузных) и дифрагированных импульсов от протяжённых литологических границ и локальных неоднородностей разреза (ПЖЛ).

В ходе зондирований выполнялось измерение двойного времени задержки и относительной (по отношению к амплитуде зондирующего импульса) амплитуды всех импульсов, наблюдаемых оператором в осциллограммах сигналов. Измерения выполнялись до 700 наносекунд. На этом времени заканчивалось поступление информации о разрезе и начиналось переотражение в коаксиальном кабеле зондирующего импульса. Даже при минимально возможной средней скорости распространения электромагнитной волны в мёрзлых грунтах 0,100 м/нс выбор максимального временного интервала считывания сигналов георадиолокации 700 нс гарантированно обеспечивал изучение разреза до глубины залегания коренных пород.

Инструментальная точность измерения времени задержки и амплитуды импульсов составляли 1 нс и 1 дБ. Полевая точность измерений составила по средним показателям 3 нс и 2 дБ. Показатель воспроизводимости сигналов по числу зарегистрированных импульсов оценивался по контрольному смещению на 1-2 м и случайному повороту центра антенного диполя на любой угол по отношению к точкам зондирований. На участках площади, где нет льдов, средний показатель воспроизводимости составил 46%. Появление в разрезе льдов приводило к его снижению до 14%. Эти данные ни в коем случае не стоит рассматривать с позиции оценки достоверности результатов полевых измерений, как это принято при использовании классических методов электроразведки. В георадиолокации показатель низкой воспроизводимости сигналов по числу импульсов не является основанием для того, чтобы считать измерения браком. Напротив, этот показатель является явным свидетельством сильного влияния фактора случайности на результат зондирования при изменении местоположения точек возбуждения и приёма сигналов георадиолокации, которые по своей физической природе являются электромагнитными волнами (ЭМВ), возникающими, как интегральный отклик мёрзлого массива грунтов (ММГ) на импульсное высокочастотное возбуждение. Чем сложнее строение и изменчивее в окрестности точки зондирования состояние и свойства ММГ, тем сильнее влияние случайного фактора, количественно выражаемого в низком показателе воспроизводимости сигналов по числу зарегистрированных импульсов. В конкретном случае на этот показатель оказывает доминирующее влияние присутствие в разрезе неоднородностей со сложной конфигурацией границ, т.е. в первом приближении клинообразных тел ПЖЛ.

Методика цифровой обработки

Главная цель цифровой обработки – изучить корреляционно-регрессионные связи волновых характеристик со свойствами и тепловым состоянием ММГ. При этом нужно было решить несколько задач:

1) выполнить анализ лабораторных определений показателей свойств мёрзлых грунтов;

2) по данным термометрии скважин сделать анализ временной изменчивости температуры мёрзлых грунтов между точками скважин и по глубине;

3) проверить и заново вычислить, ранее полученные по данным параметрических зондирований на скважинах, эмпирические оценки послойных удельных электрических сопротивлений (УЭС) и удельных волновых характеристик (скорости распространения и затухания амплитуды ЭМВ);

4) сформировать по слоям разреза для проведения комплексного статистического анализа матрицу значений исследуемых переменных (УЭС, волновых характеристик и показателей физических свойств);

5) изучить корреляции и найти адекватные математические регрессионные модели, связывающие геофизические характеристики между собой, а также с показателями физических свойств мёрзлых грунтов и их температурой в СГТ;

6) исследовать ошибки вычисления по моделям средних показателей физических свойств и температуры мёрзлых грунтов по данным георадиолокации.

Из имеющихся лабораторных данных наиболее представительным по объёму определений оказались два показателя: суммарная весовая влажность W_{tot} и плотность или объёмный вес мёрзлых грунтов. По данным термометрии были известны разновременные замеры температуры грунтов до глубины 10 м.

При решении третьей задачи первичные данные обрабатывались на современном уровне цифровых компьютерных технологий, сохраняя неизменной идею стохастической природы сигналов георадиолокации. Эта плодотворная идея пронизывает стадию цифровой обработки сигналов с использованием методов теории вероятности и стадию интерпретации данных георадиолокации с использованием методики построения физико-геокриологических моделей (ФГКМ) в виде частных и обобщённых колонок разреза буровых скважин и вероятностных образов амплитудных графиков когерентных импульсов[1].

Процесс обработки, интерпретации сигналов георадиолокации и вычисление средних значений волновых характеристик по слоям разреза в статье опускается. Он подробно изложен в методическом руководстве [5]. Здесь достаточно сказать, что прослеживание между точками скважин литологических границ разреза осуществлялось с использованием программы «R-9M», составленной Л. Л. Никифоровой (сотрудником Института горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН) по алгоритму распознавания динамических особенностей сигналов георадиолокации с учётом изменения по площади средней скорости до заданной глубины зондирования [7].

Обсуждение результатов

Обсуждение полученных результатов экспериментальных исследований проводится в 4-х направлениях:

1) сравнительный анализ глубины залегания коренных пород по данным метода ВЭЗ и метода георадиолокационного зондирования (ГРЛЗ);

2) анализ нормативных показателей физических свойств мёрзлых грунтов и льдов по инженерно-геологическим элементам (ИГЭ) разреза;

3) изучение влияния фактора льдистости на послойные УЭС и удельные волновые характеристики мёрзлых грунтов и льдов;

4) изучение влияния температуры на УЭС и затухание амплитуды ЭМВ в СГТ;

---

[1] Когерентные и в меньшей степени частично когерентные импульсы обладают фазовой устойчивостью при отражении от плоских и протяжённых границ. В различных условиях приёма они явно или неявно многократно появляются в сигнале на фиксированных задержках. При отсутствии когерентности разность фаз, регистрируемых в сигнале импульсов случайным образом “скачет” при изменении положения и ориентации антенн. Такие ситуации обычны для диффузных и дифракционных отражений от шероховатых, волнообразных границ и от неоднородностей сложной формы. В радиолокации они описываются моделями “блестящих точек” от локальных источников [10].

Первое направление

Результаты электрических зондирований на постоянном и переменном токе в точках скважин приведены в табл. 1.

Табл. 1.

Результаты зондирования кровли коренных пород

Номер скважины	Номер ВЭЗ	Номер ГРЛЗ	Глубина залегания, метры		Разница определений	
			ВЭЗ	ГРЛЗ	метры	проценты
37/1	1	9	11	15	-4.0	-30.8
38/2	2	10	17	19	-2.0	-11.1
39/3	3	8	26	22	4.0	16.7
59/4	4	7	32	22	10.0	37.0
60/5	5	6	14	17	-3.0	-19.4
150/7	6	5	19	20	-1.0	-5.1
151/8	7	4	16	19	-3.0	-17.1
166/9	8	3	17	20	-3.0	-16.2
167/10	9	2	26	21	5.0	21.3
168/11	10	1	20	18	2.0	10.5
Итого:	1-10	1-10	21.0	16.3	4.7	25.2

Примечание: Числитель в номере скважины означает её идентификационный номер, а в знаменателе – номер по порядку в выборке цифровых определений.

В методе ВЭЗ определение глубины залегания коренных пород осуществлялось ручным способом с использованием вспомогательных палеток А. М. Пылаева [9], исходя из априорных представлений об особенностях строения геоэлектрического разреза толщи мёрзлых четвертичных отложений в речных долинах Северо-Востока Якутии.

В методе ГРЛЗ эта задача решалась проще и точнее в силу того, что искомая граница заведомо является радиоконтрастной по разнице диэлектрической проницаемости между четвертичными отложениями и коренными породами. Об этом же говорят чётко выраженные по амплитуде и фазовому разрешению отражения зондирующего импульса в зоне временных задержек сигналов георадиолокации около 200 нс. Более того, в этой зоне наблюдается не только обеднение спектра сигналов высокими частотами, но и, что интересно, существенное уменьшение количества рассеянных (диффузных) отражений от разных неоднородностей разреза. Этот эмпирический признак в большинстве случаев применения георадиолокации в областях распространения многолетнемёрзлых пород обычно говорит о переходе толщи рыхлых отложений в консолидированное основание скальных и полускальных коренных пород. Вычисление глубины залегания этих пород осуществлялось по значению средневзвешенной скорости (0,142 м/нс) распространения ЭМВ в мёрзлых грунтах глинистого состава и ПЖЛ, определённой по разрезу скважин до глубины 10-13 м.

Конечно, это значение скорости не учитывает изменение условий прохождения ЭМВ в нижележащей части разреза, как правило, сложенной грунтами песчаного и крупнообломочного состава, но иного пути и способа оценить глубину залегания коренных пород не было. Полученная оценка положения в разрезе этой границы приближается к неизвестному истинному значению и становится более достоверной, если использовать всю совокупность данных метода ВЭЗ и метода георадиолокации.

Статистика этих данных говорит о том, что кровля коренных пород с вероятностью 95% залегает в среднем на глубине 19,5±2,0 м. Заметим, что это значение характеризует точность средней оценки и не имеет никакого отношения к площадным вариациям частных (единичных) определений. Поэтому при задании доверительной вероятности около 70% (уровень

характеризующий достоверность результатов геофизических работ), ожидается, что глубина залегания коренных пород в районе исследуемой площадки будет находиться в интервале 15–24 м.

В сравнении с методом ВЭЗ существенно меньший и локализованный вокруг точки зондирования объём изучения ММГ делает метод ГРЛЗ более точным в определении глубины залегания кровли коренных пород, как и других границ в толще четвертичных отложений. Исходя из этого, представляет интерес посмотреть, как справляется с решением этой задачи в условиях застроенной территории метод ВЭЗ. Для этого обратимся к рис. 2. Порядковая нумерация точек скважин на нём дана согласно табл. 1.Из рисунка видно, что на участках локального углубления или возвышения кровли коренных пород метод ВЭЗ занижает-завышает её положение по отношению к данным ГРЛЗ на 4-10 м. В относительных единицах максимальная ошибка достигает 37%. В среднем относительная ошибка не превышает 25%.

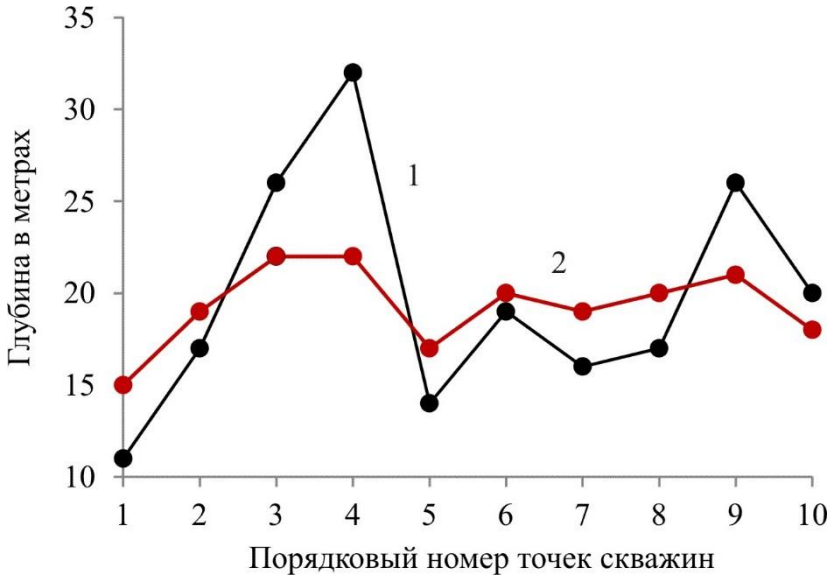

Рис. 2. Сравнительные графики глубины залегания кровли коренных пород: 1-по данным метода ВЭЗ, 2-по данным метода георадиолокации

В целом, данные ВЭЗ и ГРЛЗ свидетельствуют об одной и той же картине: незначительной площадной изменчивости положения в разрезе кровли коренных пород. По коэффициенту вариации она оценивается в 23%.По показателю угла наклона она ещё меньше. Например, если взять к рассмотрению участок площади с максимальной разницей глубины залегания коренных пород между точками скважин №37и №59 (порядковые номера №1 и №4) с одинаковой высотной отметкой над уровнем моря и расположенных друг от друга на расстоянии 30 м, то угол наклона рассматриваемой границы равен 10°.

Второе направление

Оно, как и первое направление, предназначено для решения картировочных задач, т.е. прослеживания по площади и глубине геолого-техногенных границ и составления разномасштабных карт инженерно-геологического районирования по условиям строительства разного рода инженерных сооружений.

Как известно, в инженерной геологии основными структурными единицами грунтовых массивов являются инженерно-геологические элементы (ИГЭ), которые выделяются на основе генетико-возрастной и литолого-петрографической классификации по результатам изучения закономерностей изменения состава и частных показателей свойств мёрзлых и немёрзлых грунтовых массивов по площади и глубине. Обратим внимание, что в последнее время волновые характеристики, как и всякие другие характеристики геофизических полей, стали рассматриваться с единых позиций теории природных криогенных систем. В этом отношении весьма своевременным стало появление классификации свойств массивов грунтов В. А. Королёва [2]. В соответствие с ней к электрическому подклассу физических свойств массивов грунтов отнесены электромагнитные или

волновые характеристики (транспортные и ёмкостные). К транспортным волновым характеристикам относится скорость, а к ёмкостным – затухание.

Идентификация ИГЭ выполняется по набору качественных и количественных характеристик в виде нормативных показателей. Ими принято называть среднее арифметическое значение, полученное по выборке определений какого-либо показателя свойств ММГ в пределах заданного ИГЭ. При этом обычно предполагается, что частные значения в выборке распределены по нормальному (Гауссову) закону вероятности. Однако на практике это предположение не всегда выполняется и в силу разной природы изучаемых величин и по причине небольших по объёму выборок лабораторных или натурных определений.

Посмотрим, выполняется ли постулат закона нормального вероятностного распределения для исследуемых переменных: УЭС, скорости распространения (V) и затухания амплитуды (G) ЭМВ[2], суммарной объёмной влажности (W_{ob}). Для этого протестируем достаточно представительную общую выборку частных значений переменных по 44 слоям разреза по трём статистическим критериям: Колмогорова, омега-квадрат и хи-квадрат, используя оригинальную программу А. П. Кулаичева [3]. После этой жёсткой процедуры выяснилось, что выдвинутому постулату удовлетворяют все переменные, кроме переменной УЭС. Её значения, как и ожидалось, удовлетворительно распределены по логнормальному закону вероятности. Поэтому вычисление основных статистик нормативных значений этой величины (параметра масштаба – математического ожидания и параметра формы – дисперсии или стандартного отклонения) производилось по формулам этого закона.

Ниже приводится неполное, но необходимо-достаточное для лучшего понимания сути рассматриваемых вопросов, описание ИГЭ верхней части разреза твёрдомёрзлых незасолённых верхнечетвертичных отложений аллювиального генезиса высокой надпойменной террасы р. Колымы:

1) ИГЭ-1. Насыпной грунт в виде строительного мусора из кирпича, дресвы и щебня с примесью супеси;

2) ИГЭ-2. Супеси и суглинки бурого и серого цвета с примесью растительных остатков. Они распространены повсеместно и залегают в сезонноталом слое непосредственно с поверхности или под слоем насыпных грунтов. Криогенная текстура массивная. При оттаивании тугопластичные. Суммарная весовая влажность W_{tot}=0,25 д. ед., плотность мёрзлых грунтов 1,90 г/см^3;

3) ИГЭ-3. Супеси и суглинки серого и бурого цвета с примесью растительных остатков. Имеют широкое распространение в районе исследуемой площадки, являясь вмещающей средой для ПЖЛ. Криогенная текстура слоистая. При оттаивании приобретают текучую консистенцию. Суммарная весовая влажность W_{tot}=0,43 д. ед., плотность мёрзлых грунтов 1,70 г/см^3;

4) ИГЭ-4. Подземный лёд повторно-жильного генезиса. По данным бурения и геофизики пользуется широким распространением. Льды монолитные с включением пылеватых частиц;

5) ИГЭ-5. Супеси и суглинки серого цвета с примесью растительных остатков. Имеют ограниченное распространение. Криогенная текстура массивная. Суммарная весовая влажность W_{tot} 0,27 д. ед., плотность мёрзлых грунтов 1,74 г/см^3.

Статистика нормативных показателей исследуемых физических свойств по ИГЭ разреза показана в табл. 2.

Табл. 2.

[2] Далее, в целях сокращения, скорость и затухание.

Нормативные показатели

Номера ИГЭ	Показатель свойств	Статистика на уровне доверительной вероятности 95%					
		среднее	стандарт	МИН	MAX	VAR	N
1	W_{ob}	0,45±0,13	0,14	0,28	0,72	31,1	7
1	V	0,133±0,011	0,011	0,120	0,150	8,3	7
1	G	2,1±0,58	0,6	1,1	2,9	29,3	7
1	УЭС	нет	нет	нет	нет	нет	нет
1	έ	5,1±0,8	0,8	4,0	6,3	16,6	7
2-3	W_{ob}	0,55±0,08	0,19	0,18	0,74	33,9	23
2-3	V	0,138±0,005	0,012	0,116	0,160	8,6	23
2-3	G	1,8±0,3	0,6	1,0	3,3	33,9	23
2-3	УЭС	9962 (3117)*	10773	1100	25000	108	21
2-3	έ	4,8±0,4	0,9	3,5	6,7	18,8	23
4	W_{ob}	1,00±0,00	0,00	1,00	1,00	0,0	6
4	V	0,166±0,005	0,005	0,160	0,173	2,9	6
4	G	0,5±0,13	0,1	0,3	0,6	26,7	6
4	УЭС	48549(34298)*	24788	16000	73000	51,0	6
4	έ	3,3±0,2	0,2	3,0	3,5	6,1	6
5	W_{ob}	0,46±0,16	0,19	0,21	0,77	41,5	8
5	V	0,134±0,009	0,011	0,118	0,151	8,5	8
5	G	2,1±0,4	0,5	1,4	2,8	25,0	8
5	УЭС	5820(2547)*	4980	2100	18000	85,6	8
5	έ	5,1±0,7	0,85	4,0	6,5	16,7	8
1-5	W_{ob}	0,58±0,07	0,24	0,18	1,00	41,4	44
1-5	V	0,141±0,004	0,015	0,116	0,173	10,6	44
1-5	G	1,8±0,2	0,8	0,3	3,3	43,5	44
2-5	УЭС	15669(2535)*	21113	1100	73000	153,9	35
1-5	έ	4,7±0,3	1,0	3,0	6,7	21,3	44

Примечание: 1) * - в скобках модальные значения среднего; 2) МИН и MAX – минимальные и максимальные значения, VAR – коэффициент вариации, έ – действительная часть диэлектрической проницаемости, вычисленная по скорости, N – количество определений.

Частные значения показателя суммарной объёмной льдистости (W_{ob}) вычислены по известной среди изыскателей и геокриологов формуле И. Н. Вотякова [1]. Они изменяются в широком диапазоне 0,18-1,00 д. ед. с коэффициентом вариации 41,4% при нормативном показателе по всему разрезу 0,58±0,07 д. ед. Если исключить из определений подземные льды, то этот показатель станет равным 0,49 д. ед.

Показатель Wob не является точной характеристикой степени льдистости мёрзлых дисперсных грунтов, так как завышает льдистость за счёт неучтённого присутствия в грунтах незамёрзшей воды, тем не менее, он используется с целью количественного описания относительной изменчивости по площади и глубине всех составляющих объёмной льдистости, содержащейся в криотекстурах глинистых грунтов и телах ПЖЛ. С этой позиции исследуемые грунты по нормативному показателю W_{ob} условно классифицируются как сильнольдистые, близкие к льдогрунтам. Для них нормативные показатели скорости и затухания составляют 0,141±0,004 м/нс и 1,8±0,2 дБ/м. Эти значения вместе со значениями УЭС и диэлектрической проницаемости рекомендуется использовать как справочный материал при проведении дальнейших исследований методом георадиолокации и ВЭЗ на территории посёлка Черского. Разумеется, полученные оценки геофизических характеристик будут эффективными (в смысле результативности их использования) при допущении, что они получены по репрезентативной выборке, характеризующей основные

черты генеральной совокупности физических свойств ММГ высокой надпойменной террасы р. Колымы.

На рис. 3 показан пример комплексной интерпретации данных параметрических зондирований методом ВЭЗ и методом георадиолокации с целью определения электрических и волновых характеристик по слоям разреза мёрзлых льдистых грунтов глинистого состава и ПЖЛ в окрестности скважины №37. Данные зондирований дополняют друг друга и расширяют представления о возможностях методов наземной геофизики в решении задач инженерно-геокриологического картирования, т.е. изучении строения ледового комплекса на застроенной территории населённого пункта.

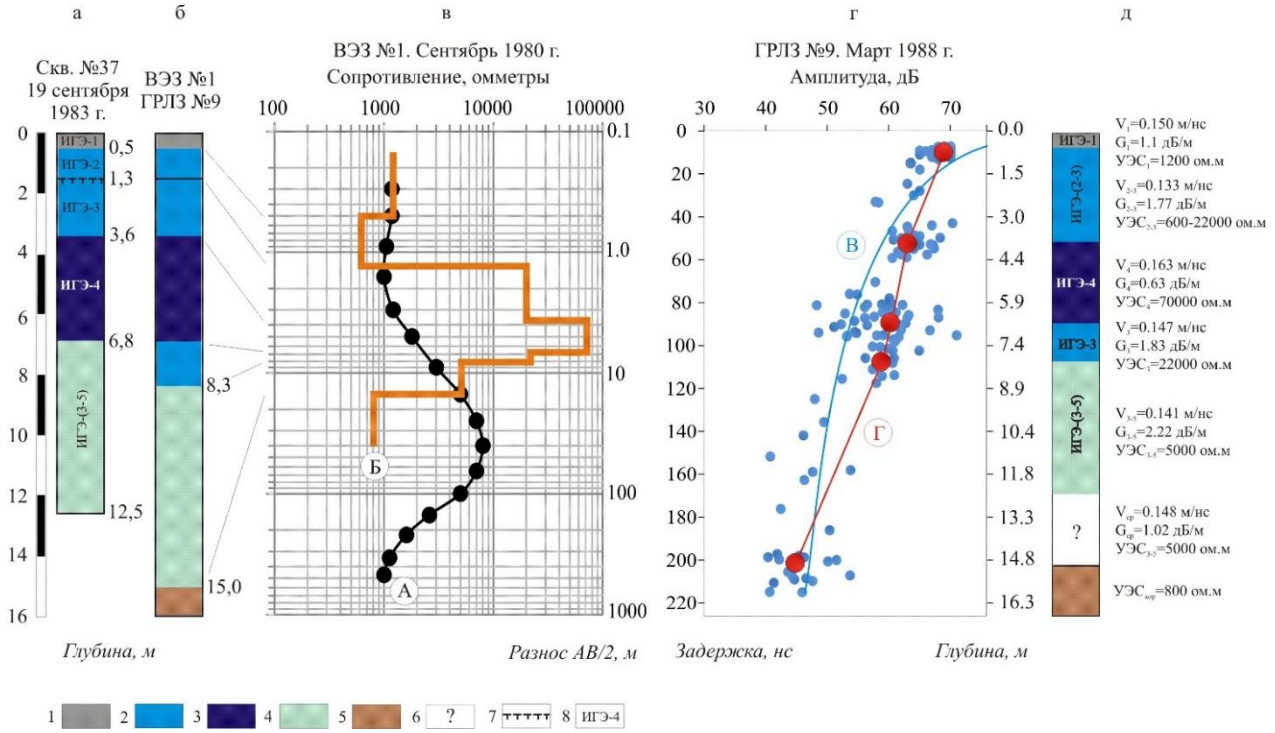

Рис. 3. Параметрическое зондирование на скважине с повторно-жильным льдом: а – колонка скважины; б – колонка результатов интерпретации геофизических данных; в – кривая ρ_k ВЭЗ (А) и график УЭС слоёв геоэлектрического разреза (Б); г – диаграмма рассеяния импульсов, зарегистрированных в окрестности точки скважины (В – график степенной функции, Г – амплитудный график когерентных и частично когерентных импульсов), д-колонка ИГЭ со значениями УЭС и волновых характеристик.

1-насыпные грунты, 2-льдистые глинистые грунты, 3-лёд, 4-разного состава нельдистые грунты, 5-коренные породы по данным ГРЛЗ, 6-грунты неизвестного состава, состояния и свойств, 7-кровля мерзлоты на период проведения бурения и работ методом ВЭЗ, 7-номера инженерно-геологических элементов

По данным метода ВЭЗ (рис. 3, в) геоэлектрический разрез в окрестности точки скважины относится по классификации французской фирмы Шлюмберже к типу «HAKQ». Слой льдонасыщения разреза на глубине 1,3-7,7 м, включающий в себя ПЖЛ, сильнольдистые грунты, льдогрунты, проявляет себя на кривой ВЭЗ максимумом кажущихся электрических сопротивлений (элемент разреза «К»). Присутствие льдов на глубине 3,6-6,8 м вызывает увеличение УЭС до аномальных значений (70000 ом.м). При переходе в коренные породы, залегающих на глубине 15 м, УЭС разреза резко снижается до значений нижней асимптоты кривой ВЭЗ (800 ом.м). Судя по значениям УЭС, коренные породы относятся к терригенной формации и представлены на глубине зондирования песчанистыми разностями (песчаниками, алевритами и алевролитами). Заметим, что высокие УЭС зоны льдонасыщения верхней части геоэлектрического разреза существенно

ограничивают глубину зондирования четвертичных отложений методом ВЭЗ. Соотношение между глубиной залегания коренных пород и значением полуразноса АВ/2, на котором влияние этой границы начинает проявлять себя, составляет 0,044. Это высокий показатель экранирования разреза и поэтому требует проведения зондирований на постоянном токе с большими значениями полуразносов, что не всегда возможно в населённых пунктах освоенных или осваиваемых районах криолитозоны Якутии и, вообще говоря, северных территорий России.

Возможности метода георадиолокационного зондирования (ГРЛЗ) в *дискретном варианте* несравненно больше возможностей метода ВЭЗ по многим показателям. Однако для их реализации и, в особенности, при изучении анизотропных разрезов и неоднородностей сложной конфигурации, таких как, например, ПЖЛ, недопустимо использовать единичные измерения сигналов георадиолокации. По той причине, что они неустойчивы по параметрам отражения на амплитудно-фазовой плоскости при изменении положения и ориентации антенн любого георадара, а не только георадара 17ГРЛ-1. Неустойчивость отражений иллюстрируется полем случайного рассеяния на рис. 3, г. Обнаружить в таком зашумлённом поле по единичным измерениям сигналов георадиолокации отражения от литологических границ разреза невозможно. При каждом изменении положения и (или) ориентации антенн будут приниматься разные интерпретационные решения и тем самым, результаты единичных зондирований будут отличаться ненадёжностью и низкой достоверностью. Устойчивость решений и достоверность результатов в определении количества отражающих границ и глубины их залегания наступает после применения специальной цифровой обработки многоразовых измерений случайных реализаций сигналов георадиолокации в окрестности точек поисковой или мониторинговой сети геолого-геофизических наблюдений. В рассматриваемом случае такая обработка выполнена для окрестности скважины №37 по 10 реализациям сигналов георадиолокации, содержащих 151 импульс. Этого объёма первичной информации оказалось достаточным для надёжного обнаружения отражений от всех границ георадиолокационного разреза, установленных бурением скважины №37. Обратим внимание на важную деталь. Около границ слоя льда, вскрытого бурением скважины, формируются области концентрации отражённо-рассеянных импульсов, центром которых являются три когерентных импульса на временных задержках 53, 91, 112 нс с разницей амплитуд в единицы децибел. Из этого следует, что георадиолокация обнаружила не только верхнюю и нижнюю границы концентрации в разрезе основной массы тела ПЖЛ, но и нижнюю границу зоны льдонасыщения, за которую ПЖЛ не распространяется.

На амплитудных графиках (рис. 3, г) когерентные и частично когерентные импульсы (первый импульс всегда зондирующий) образуют центры двумерного распределения – максимумы вероятности по числу появления зарегистрированных импульсов вблизи плоских и протяжённых (превышающих радиус первой зоны Френеля) отражающих границ. Благодаря этому удалось правильно решить задачу, заключающуюся в сопоставлении числа и координат когерентных и частично когерентных импульсов с числом и глубиной залегания границ разреза и на этой основе вычислить средние значения скорости и затухания по слоям разреза. Результаты решения этой трудной задачи приводятся на рис. 3, д вместе с результатами количественной интерпретации кривой ВЭЗ.

Кроме послойных значений волновых характеристик по нескольким измерениям сигналов георадиолокации в окрестности скважины №37 была найдена оценка коэффициента затухания (k) ЭМВ в толще мёрзлых четвертичных отложений (k=-0,162 отн. ед.), а также в слое годовых теплооборотов (СГТ) до глубины 10 м (k=-0,119 отн. ед.). Эта оценка получена путём аппроксимации значений выборочной совокупности импульсов (число импульсов в выборке 151) простой трансцендентной функцией – степенной функцией вида:

$$A = a \cdot \tau^{-k} \ , \qquad (1)$$

где, А – амплитуда импульсов в дБ, a – параметр положения функции, зависящий от значений зондирующего импульса, τ – двойное время задержки импульсов в нс, k – показатель функции, определяющий скорость затухания ЭМВ при её прохождении через однородный массив мёрзлых пород и грунтов.

Исследуемый массив макро (тела ПЖЛ) и микро (изменчивость льдистости) неоднороден и поэтому показатель *k* даёт приблизительное представление о скорости затухания амплитуды ЭМВ. Он зависит от закона геометрического расхождения фронта ЭМВ, потерь энергии зондирующего импульса при отражении от радиоконтрастных границ и рассеяния от мелких неоднородностей соизмеримых с длиной ЭМВ, а также потерь при преобразовании энергии ЭМВ в тепловую энергию. Совместное влияние всех этих известных и ещё неизвестных факторов, в конечном счёте, и определяют значение *k*. Именно поэтому он является весьма информативным к изменению строения, состояния и свойств ММГ, являющихся по своей природе неоднородными и анизотропными. Однако при этом требуется, чтобы средние значения показателя *k* были не только устойчивы к изменениям условий его определения, но и точны. Речь идёт о показателе точности сходимости ряда средних значений *k* к асимптотическому уровню, близкому к неизвестному истинному значению. Исследования, проведённые автором, показали, что для определения среднего показателя *k* с высокой точностью (порядка 1%) необходимо около 40 раз измерить сигналы георадиолокации при общем объёме числа зарегистрированных импульсов не менее 300 [6]. В данном случае точность определения *k* составляет около 10%, чего вполне достаточно для изучения влияния температуры на затухание ЭМВ в СГТ.

Третье направление

Первичный экспериментальный материал для проведения петрофизических исследований в части влияния фактора льдистости на УЭС и волновые характеристики массива мёрзлых дисперсных грунтов с включением ПЖЛ представлен в табл. 3.

Табл. 3.

Матрица переменных первого эксперимента

Номер Скв	Номер ИГЭ	Интервал глубины ИГЭ, м		Тип грунта	W_{ob} д. ед.	УЭС омметры	V м/нс	G дБ/м
		кровля	подошва					
37	3	0.5	3.6	супесь	0.64	20000	0.133	1.77
37	3	6.8	12.5	супесь	0.69	22000	0.147	1.02
38	3	0	3.8	суглинок	0.74	2056	0.121	1.77
38	3	4.1	9.3	супесь	0.72	3154	0.15	1.37
39	3	0	4.1	суглинок	0.48	1103	0.123	2.32
39	3	4.3	8.2	супесь	0.51	8156	0.153	1.81
59	3	0	3	супесь	0.61	18000	0.145	1.06
59	3	4	10	супесь	0.63	25073	0.147	1.61
60	3	0	8	супесь	0.41	9000	0.142	1.75
60	3	0	8	супесь	0.69	9000	0.142	1.75
150	3	1	3.5	супесь	0.69	13200	0.151	1.42
150	3	8.5	10	супесь	0.23	22000	0.14	2.7
151	3	3.9	7.5	супесь	0.38	15000	0.132	1.74
151	3	7.5	10	суглинок	0.74	4215	0.16	1.35
152	3	1.5	4	суглинок	0.62	3053	0.145	1.32
152	3	4	7.5	супесь	0.71	5556	0.15	1.18
152	3	7.5	10	суглинок	0.69	3120	0.14	1.73
166	3	1	2	супесь	0.71	6353	0.135	1.31
166	3	4.2	6	супесь	0.28	2200	0.123	2.9
167	3	1.2	3	суглинок	0.66	6000	0.133	2
167	3	3	6.6	супесь	0.18	4000	0.116	3.3
168	3	0.7	2.6	суглинок	0.35	6000	0.125	2.6
37	4	3.6	6.8	лёд	1.00	73000	0.163	0.53
38	4	3.8	4.1	лёд	1.00	50154	0.16	0.55
39	4	4.1	4.3	лёд	1.00	30153	0.17	0.46

59	4	3	4	лёд	1.00	53000	0.163	0.61
150	4	3.5	7	лёд	1.00	70000	0.173	0.27
151	4	3.6	3.9	лёд	1.00	16000	0.167	0.38
38	5	9.3	12.2	суглинок	0.77	2153	0.127	1.82
39	5	8.2	12.3	суглинок	0.38	2115	0.133	2.6
150	5	7	8.5	суглинок	0.42	6310	0.149	1.95
151	5	1.5	3.6	суглинок	0.21	18000	0.118	2.7
166	5	2	4.2	суглинок	0.22	4100	0.127	2.77
168	5	2.6	4.7	супесь	0.59	5000	0.13	1.65
168	5	4.7	6	суглинок	0.54	3100	0.14	1.8

Примечание: W_{ob} – суммарная объёмная влажность; УЭС – удельное электрическое сопротивление; удельные волновые характеристики (V - скорость распространения ЭМВ, G - затухание амплитуды ЭМВ).

Более высокие корреляции, полученные по параметрическому критерию Пирсона, склоняют к мнению о линейном законе эмпирической связи между исследуемыми переменными. Причём, каких-либо преимуществ в увеличении силы связи переменных W_{ob}, V, G с переменной УЭС не наблюдается при её преобразовании в значения десятичного логарифма. Диагональная матрица корреляций переменных приведена в табл. 4. Все парные связи переменных находятся выше критического уровня корреляции (0,33). Наиболее сильное влияние с коэффициентом корреляции -0,923 оказывает фактор льдистости (переменная W_{ob}) на затухание (G). При этом, чем выше льдистость слоя ММГ, тем меньше в нём затухание. В меньшей степени изменение послойной льдистости сказывается на изменении послойной скорости (V) и ещё меньше на изменении послойных значений УЭС. Со скоростью всё понятно: по отношению к затуханию она всегда изменяется незначительно при изменении состава, свойств и состояния ММГ. Что касается слабой связи УЭС с льдистостью, то она озадачивает, поскольку накопленный опыт работ методом ВЭЗ в областях распространения многолетнемёрзлых пород говорит о сильной зависимости между этими характеристиками. Чем вызвано несогласие между общим опытом и частным фактом? Во-первых, тем, что рассматриваются количественные, а не качественные отношения между УЭС и льдистостью, что не одно и то же. Во-вторых, УЭС является интегральной электрофизической величиной, зависящей от множества других показателей физических свойств. Набор их сочетаний огромен и, в особенности, при переходе пород и грунтов в мёрзлое состояние. Поэтому всегда возможно произойти событию, когда доминирующий фактор льдистости будет сильно ослаблен или вообще подавлен иными мерзлотно-грунтовыми факторами. В конкретном случае таким фактором (по совокупности имеющихся изыскательских данных) выступает фактор растительных остатков и иной органики всегда сопутствующей генезису глинистых грунтов. В-третьих, нельзя забывать, что методика количественной интерпретации кривых ВЭЗ разработана для горизонтально-слоистых разрезов и потому не может давать точных значений УЭС для разрезов со сложными неоднородностями – телами ПЖЛ.

Волновые характеристики тесно связаны между собой, что вполне естественно, так как скорость и затухание являются неразрывными атрибутами ЭМВ.

Табл. 4.

Корреляционная матрица первого эксперимента

Переменные	W_{ob}	V	G	УЭС
W_{ob}	1,000			
V	0,757	1,000		
G	-0,923	-0,855	1,000	
УЭС	0,576	0,634	-0,624	1,000
LOG_{10} УЭС	0,459	0,632	-0,594	0,878

С УЭС волновые характеристики имеют связь, но не на высоком уровне. Будучи более зависимыми от льдистости они не могут вести себя иначе по отношению к УЭС.

Иллюстрация парных корреляций исследуемых переменных показана на рис. 4.

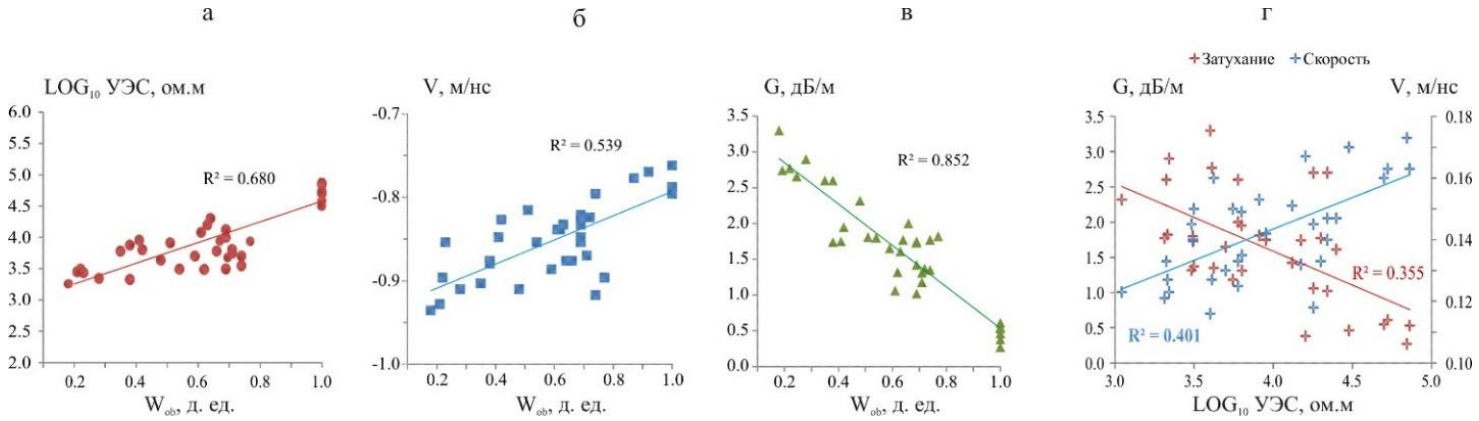

Рис. 4. Графики парных корреляций и уравнений линейной регрессии: а-в – зависимости геофизических характеристик от показателя суммарной объёмной влажности (льдистости) слоёв массива мёрзлых дисперсных грунтов; г – зависимость волновых характеристик от десятичного логарифма УЭС слоёв геоэлектрического разреза. Пояснения в тексте

Убедившись в существовании влияния фактора льдистости на геофизические характеристики, рассмотрим возможность использования этого влияния в практических целях. Для этого построим обратную математическую модель, в которой формально зависимой переменной является W_{ob} слоёв разреза, а независимыми переменными – послойные значения V, G, УЭС. Трёхмерное линейное уравнение такой модели имеет следующий вид:

$$W_{ob} = 1{,}44 - 2{,}08 \cdot V - 0{,}326 \cdot G + 0{,}000000275 \cdot УЭС,\ R^2 = 0{,}843, \qquad (2)$$

где, W_{ob} – суммарная объёмная влажность (д. ед.); V, G – скорость, затухание (м/нс, дБ/м); УЭС – удельное электрическое сопротивление (ом.м).

Уравнение (2) предоставляет возможность вычислить среднюю оценку показателя объёмной льдистости какого-либо слоя разреза, если для него известны волновые характеристики и УЭС.

Точность работы уравнения (2) проверена на экспериментальном материале (табл. 3). В результате оказалось, что вычисляемые значения W_{ob} с равной вероятностью завышаются–занижаются по отношению к лабораторным данным со средней ошибкой 0,00±0,32 д. ед. При необходимости повысить точность уравнения (2) следует исключить из него переменную УЭС с невысокой корреляционной нагрузкой и тем самым, ограничиться использованием только данных георадиолокации. Это занятие предоставляется заинтересованному читателю. Напомним, что исходные данные для построения модели находятся в табл. 3.

Разброс ошибок единичных определений при заданной доверительной вероятности 95% укладывается в интервал ±0,19 д. ед. В относительной метрике статистика ошибок следующая: средняя – 0,00±6,51%, разброс ±38%.

Таким образом, даже при единичных определениях значений W_{ob} точность уравнения (2) удовлетворяет требованиям производства и, в особенности, на ранних стадиях проектно-изыскательских работ при составлении карт инженерно-геологической оценки территории или районирования для выбора площадок по условиям строительства, когда от методов геофизики не требуется высокая точность определения показателей свойств ММГ. Пока же речь идёт только для одного из представителей Северо-Востока Якутии – посёлка Черского.

В качестве примера на рис. 5 приводится карта W_{ob} района строительства площадки «Дом быта на 70 рабочих мест», построенная по данным георадиолокации с привязкой к лабораторным данным. Линии квадрата жёлтого цвета на карте означают контур площадки. Цифрами указаны номера скважин, а чёрными кружками – точки георадиолокационных зондирований. Пунктирные линии – границы ПЖЛ по данным метода ЭП в 1980 г.

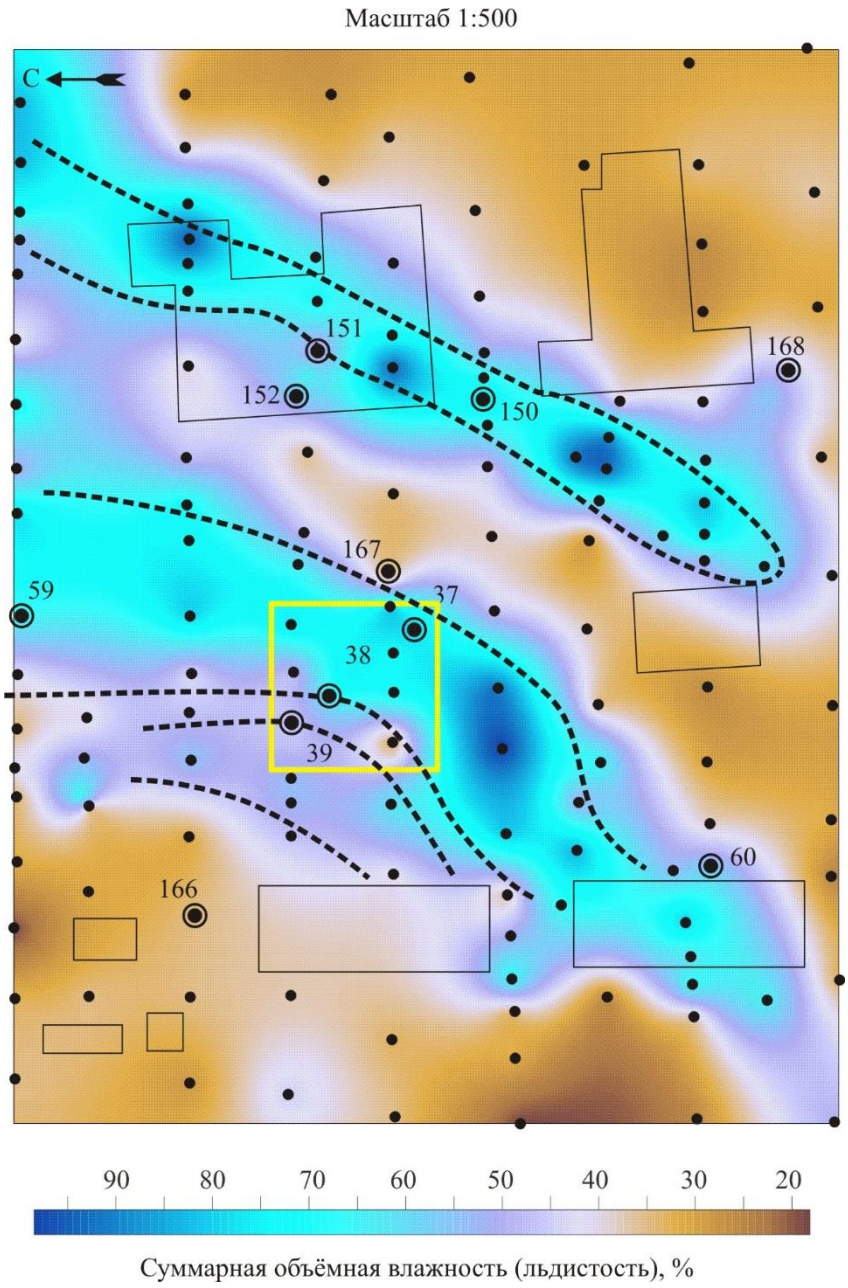

Рис. 5. Карта объёмной льдистости на участке изыскательских работ в посёлке Черском по лабораторным данным и данным георадиолокации. Пояснения в тексте

На совмещённой стадии рабочего проекта и рабочей документации карта даёт достаточно полное представление о площадной изменчивости объёмной льдистости ММГ до глубины опробования разреза буровыми скважинами. На карте отчётливо выделяются две полосы с высокой льдистостью разреза (более 50%), которые по данным бурения скважин и метода ЭП соответствуют телам повторно-жильных льдов (ПЖЛ). Эти природные образования вместе с льдогрунтами занимают около 40% площади, если картировать их границы по значению W_{ob}>60%. Льды и льдогрунты очень чувствительны к изменению климата и влиянию техногенных воздействий, создавая неблагоприятные условия для промышленного, гражданского и сельскохозяйственного строительства.

Для построения карты W_{ob} по 11 точкам скважин была найдена математическая модель в виде двумерного уравнения линейной регрессии:

$$W_{ob} = -11 + 690 \cdot V - 16{,}5 \cdot G, \; R^2 = 0{,}883, \qquad (3)$$

где, W_{ob} – средневзвешенное значение суммарной объёмной влажности (льдистости) ММГ в процентах до глубины 10-13 м; V и G – средневзвешенные значения скорости и затухания по всему разрезу до глубины 10-13 в м/нс и дБ/м.

На участках площади, где нет скважин, а значит, и нет возможности определить средневзвешенные волновые характеристики ММГ, значения W_{ob} вычислялись по уравнению (3) по нормативной средневзвешенной скорости 0,141 м/нс. По ней вычислялись интервальные затухания G в зоне льдонасыщения и задавались в уравнение (3).

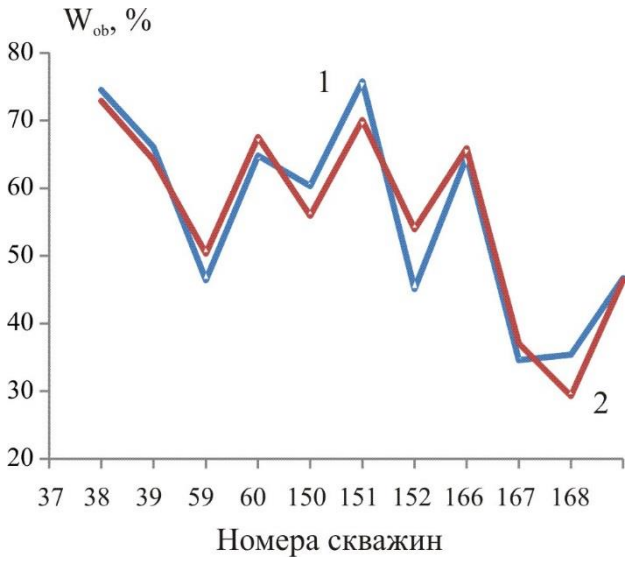

Рис. 6. Графики сравнительных результатов определения средневзвешенной по слоям разреза суммарной объёмной влажности (льдистости) в точках изыскательских скважин: 1-по данным лаборатории, 2-по данным георадиолокации

Модель (уравнение (3)) работает сбалансированно и контролирует все площадные изменения объёмной льдистости, происходящие в ММГ глинистого состава. Графики этих изменений показаны на рис. 6. При заданном уровне доверительной вероятности 95% разброс ошибок определения значений W_{ob} по отношению к лабораторным данным составляет в относительной метрике 19%. Разумеется, за пределами выборки точек скважин точность модели не может не снизиться из-за неконтролируемого изменения волновых характеристик по площади и глубине. Однако вряд ли такое снижение приведёт к коренной перестройке картины изменчивости льдистости ММГ в районе исследуемой площадки. Детали непременно изменятся, но фоновая закономерность относительной изменчивости W_{ob}, как и любой другой геофизической характеристики должна сохраниться. Такая уверенность основывается на многочисленном опыте решения разнообразных задач методами геофизики.

Четвёртое направление

Пожалуй, не будет преувеличением сказать, что это направление является важнейшим в инженерном мерзлотоведении, так как оно исследует влияние на геофизические характеристики одной из фундаментальных физических величин – температуры. Надо сказать, что работы по этому направлению начались в России в 20-30-х годах прошлого столетия и выполнялись преимущественно в лабораторных условиях на образцах пород и грунтов. В условиях in situ температурная зависимость эпизодически изучалась в основном для электрического сопротивления на постоянном токе (УЭС) и, в меньшей мере, для поляризуемости. Температурная зависимость волновых характеристик (имеется в виду скорость и затухание сигналов георадиолокации) мёрзлых грунтовых массивов в России не изучается. Исключение составляет регион Якутии, где автор проводит исследования в ИМЗ СО РАН, начиная с 2006 г. Область исследований – освоенные районы криолитозоны. Вполне возможно, что работы по этой тематике выполняются в ближнем или дальнем зарубежье, но автору они неизвестны.

В конкретном случае исследования выполнены по выборке из 11 точек скважин термометрии. Исходный материал представлен в табл. 5.

Табл. 5.

Матрица переменных второго эксперимента

Номер скважины	t_{10}	Средневзвешенные значения до глубины 10-13 м					$k_{(0-10)}$
		W_{ob}	V	G	УЭС	LOG_{10} УЭС	
37	-6.2	0.754	0.147	1.11	34480	4.538	-0.123
38	-5.4	0.744	0.136	1.58	14200	4.152	-0.132
39	-4.2	0.465	0.137	2.22	4149	3.618	-0.150
59	-5.4	0.661	0.148	1.35	25744	4.411	-0.127
60	-4.9	0.550	0.142	1.75	9000	3.954	-0.125
150	-6.1	0.690	0.157	1.29	33367	4.523	-0.112
151	-4.0	0.428	0.135	1.95	13414	4.128	-0.147
152	-5.0	0.670	0.146	1.37	3646	3.562	-0.130
166	-4.2	0.400	0.128	2.32	4281	3.632	-0.142
167	-3.8	0.398	0.124	2.71	4909	3.691	-0.135
168	-4.7	0.458	0.130	2.16	5088	3.707	-0.131

Примечание: t_{10} – среднегодовая температура на глубине 10 м; W_{ob}, V, G (расшифровка в табл. 3); УЭС и LOG_{10} УЭС – удельное электрическое сопротивление в ом.м и его десятичный логарифм; $k_{(0-10)}$ – среднее значение коэффициента затухания амплитуды ЭМВ в СГТ до глубины 10 м в отн. ед.

Из-за разновременной термометрии скважин пришлось отказаться от изучения влияния средней температуры ММГ на затухание ЭМВ в СГТ. Эта важная характеристика температурного поля используется проектировщиками при расчёте несущей способности оснований инженерных сооружений за счёт сил смерзания грунтов с боковой поверхностью висячих свайных фундаментов.

Визуальный анализ и расчёт матриц корреляции показывают, что связи между переменными с равным успехом описываются линейными или нелинейными моделями – уравнениями регрессии. Однако при небольшом объёме данных и, тем более, с 7 переменными, рекомендуется делать выбор линейных моделей. Из табл. 6 следует, что в линейном метрическом пространстве все исследуемые переменные корреляционно связаны на значимом статистическом уровне (критическое значение корреляции 0,598).

Табл. 6.

Непараметрическая матрица корреляций

Переменные	t_{10}	W_{ob}	V	G	LOG_{10}УЭС	k
t_{10}	1.00					
W_{ob}	-0.92	1.00				
V	-0.82	0.77	1.00			
G	0.90	-0.92	-0.90	1.00		
LOG_{10}УЭС	-0.77	0.66	0.68	-0.72	1.00	
k	-0.83	0.69	0.69	-0.66	0.61	1.00

Базовый уровень корреляции парной связи t_{10}-W_{ob}=-0,92 обусловлен двумя литогенными факторами – грансоставом и льдистостью, которая, как уже отмечалось, оценивается по показателю суммарной объёмной влажности (W_{ob}), включающего в себя поровую, сегрегационную и структурную (тела ПЖЛ) составляющие. От состава, льдистости и других неучтённых показателей физических свойств зависят теплофизические свойства ММГ, а от них и условий теплообмена на поверхности Земли, в свою очередь, зависит глубина проникновения сезонных колебаний температуры воздуха и среднегодовая температура мёрзлых грунтов на нижней границе СГТ (t_{10}).

При этом на участках площади, где льдистость ММГ повышается за счёт льдов и льдогрунтов, наблюдается понижение среднегодовой температуры на глубине 10 м на 1,0-1,5°С и наоборот.

Следуя постулату единства и целостности ММГ в его многообразии качественных и количественных характеристик и их взаимосвязей на разных уровнях причинно-следственных отношений, литогенные факторы непременно должны оказывать влияние на геофизические характеристики и, в частности, на волновые и электрические (УЭС). Через них посредством возбуждения ММГ электрическим полем на постоянном (метод ВЭЗ) и переменном токе высокой частоты (метод георадиолокации) в интегральном виде проявляются с разных сторон особенности фазового и термодинамического состояния ММГ. В действительности, так и происходит. Фактор температуры (t_{10}), а также фактор льдистости (W_{ob}), как один из представителей физических свойств ММГ, оказывают достаточно сильное влияние на средние удельные волновые характеристики по всему изученному разрезу ММГ: скорость (V), затухание (G) и на коэффициент затухания до глубины 10 м (k). Температура оказывает существенное влияние и на УЭС и этот факт принципиально важен, так как в частном порядке натурного эксперимента пополняет доказательную экспериментальную базу против сложившегося среди геофизиков мнения о независимости УЭС от температуры. Этому во многом способствовала фундаментальная работа В. С. Якупова по изучению электропроводности многолетнемёрзлых пород Северо-Востока СССР [11].

Между волновыми характеристиками и УЭС тоже есть корреляция, но слабая. Причём, как это следует из теории электродинамики, волновые характеристики зависят от УЭС, а не наоборот. Что касается слабой связи между ними, то этому уже давалось объяснение при обсуждении результатов исследований по третьему направлению. Остаётся только добавить, что разное влияние льдистости на рассматриваемые переменные обусловлено разным масштабным фактором. Суть его в том, что зондирования методом ВЭЗ охватывают во много раз больший объём ММГ, нежели зондирования методом георадиолокации. Поэтому, в сравнении с методом ВЭЗ получаемая методом георадиолокации информация по волновым характеристикам оказывается более локализованной по площади, а значит и более чувствительной к изменению по глубине строения, свойств и состояния ММГ в окрестности точек скважин. Заметим, что представление УЭС в виде десятичного логарифма существенно улучшает линейную связь с температурой, льдистостью и волновыми характеристиками ММГ.

Из всех возможных вариантов описания уравнениями линейной регрессии парных корреляции переменных, предоставляемых табл. 6, научно-практическое значение имеют две парных связи. Это – причинно-следственная адекватная связь k с наиболее информативными переменными и формальная связь для расчёта среднегодовой температуры на глубине 10 м по данным метода георадиолокации и метода ВЭЗ с учётом объёмной льдистости ММГ. Уравнения этих связей приводятся ниже:

$$k = -0{,}187 - 0{,}0184 \cdot t_{10} - 0{,}0379 \cdot W_{ob} - 0{,}00335 \cdot \log_{10} УЭС,\ R^2 = 0{,}722 \qquad (4)$$

$$t_{10} = -5{,}65 - 2{,}42 \cdot W_{ob} - 0{,}651 \cdot V + 0{,}30 \cdot G - 0{,}35 \cdot \log_{10} УЭС - 23{,}2 \cdot k,\ R^2 = 0{,}941 \qquad (5)$$

Расшифровка переменных в уравнениях (4) и (5) дана в табл. 3 и 5.

Таким образом, уравнение (5) предоставляет реальную возможность вычислить по совокупности геолого-геофизических данных среднегодовую температуру на глубине 10 м и построить карту её значений. На этой графической основе легко увидеть те площадные изменения теплового (температурного) состояния мёрзлого основания здания «Дом быта на 70 мест», которые произошли в его окрестности со времени начала эксплуатации под влиянием потепления климата и техногенных факторов (утечек воды и пр.). Более того, появляется возможность краткосрочного или долгосрочного прогнозного моделирования теплового состояния основания здания, изменяя по некоторым правилам объёмную льдистость и геофизические характеристики. При этом, если нет лабораторных данных по W_{ob}, то их можно заменить расчётными оценками W_{ob}, получаемых по уравнению (3).

Точность расчётных оценок температуры по уравнению (5) с вероятностью 95% заключена в интервале ±0,4°С.

Заключение

Результаты, полученные в камеральных условиях по архивным материалам изыскательских работ, показали плодотворность выбранного направления. Благодаря такому подходу оказалось возможным без больших затрат на экспедиционные расходы изучить влияние двух важнейших факторов (льдистости и температуры) на волновые характеристики сигналов георадиолокации и УЭС массива мёрзлых дисперсных грунтов с включением неоднородностей сложной конфигурации – тел повторно-жильных льдов. В ходе проделанной поисковой работы для условий Северо-Востока Якутии и применительно к территории посёлка Черского установлена не только *принципиальная*, но и *практическая* возможность использования метода георадиолокации в комплексе с классическим методом электроразведки ВЭЗ с целью решения двух важных задач инженерно-строительных изысканий и инженерного мерзлотоведения. Это – определение по вероятностно-детерминистическим моделям (уравнениям регрессии) *показателя суммарной объёмной влажности (льдистости) и температуры массива мёрзлых грунтов в слое годовых теплооборотов на глубине 10 м.* Кроме этого, к научному результату экспериментальных исследований следует отнести частное доказательство влияния температуры на удельное электрическое сопротивление льдистых четвертичных отложений аллювиального генезиса долины р. Колымы.

Список литературы

1. Вотяков, И. Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии. – Новосибирск: Наука, 1975. – 176 с.

2. Грунтоведение / Трофимов В. Т., Королёв В. А., Вознесенский Е. А., Голодковская Г. А., Васильчук Ю. К., Зиангиров Р. С. Под ред. В. Т. Трофимова. – 6-е изд., переработ. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 1024 с. – (Классический университетский учебник).

3. Кулаичев, А.П. Методы и средства комплексного анализа данных. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ФОРУМ: ИНФРА, 2006. – 512 с.

4. Нерадовский, Л. Г. Изучение состояния и свойств мёрзлых грунтов и криопэгов методом георадиолокации: дис. … канд. техн. наук: 25.00.08 / Леонид Георгиевич Нерадовский; Росс. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т мерзлотоведения. – Якутск, 2005. – 204 с. – Библиогр.: с. 179–193.

5. Нерадовский, Л. Г. Методическое руководство по изучению многолетнемёрзлых пород методом динамической георадиолокации / Л. Г. Нерадовский. – 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).

6. Нерадовский, Л. Г. Температурная зависимость сигналов георадиолокации в освоенных районах криолитозоны Якутии / Л. Г. Нерадовский ; отв. ред. Г. П. Кузьмин ; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т мерзлотоведения им. П. И. Мельникова. – Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2011. – 166 с. ISBN 978-5-93254-113-5.

7. Омельяненко, А. В. Комплекс программ обработки и интерпретации данных георадиолокации применительно к станции 17ГРЛ-1. Первая версия / А. В. Омельяненко, Л. Л. Никифорова, П. В. Стручков. – ИГДС СО АН СССР. – Якутск, 1987. – 33 с.

8. Омельяненко, А. В. Научно-методические основы георадиолокации мёрзлых горных пород : дис. … д-ра техн. наук: 25.00.08, 25.00.22 / Александр Васильевич Омельяненко; – Росс. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т мерзлотоведения. – Якутск, 2001. – 344 с. – Библиогр.: с. 315-343.

9. Пылаев, А. М. Руководство по интерпретации вертикальных электрических зондирований. – М.: Изд-во «Недра», 1968. – 148 с.

10. Штагер, Е.А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. – М.: Радио и связь, 1986. – 184 с.

11. Якупов, В. С. Электропроводность и геоэлектрический разрез мёрзлых толщ. – М.: «Наука», 1968. – 179 с.

Выходные данные: «Инженерные изыскания», №2/2013, стр. 26-37