

СВОЙСТВА ЛЬДА И МЕРЗЛЫХ ПОРОД

УДК 622.011.4:621.396.96

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ МЕРЗЛЫХ ЗАСОЛЕННЫХ ГРУНТОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОЙ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

Л.Г. Нерадовский

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 1, Россия, mpi@ysn.ru*

На основе архивных материалов инженерно-геологических изысканий получены результаты, показывающие возможность осуществлять георадиолокационный мониторинг состояния и свойств мерзлых пород, используемых в качестве оснований фундаментов инженерных сооружений. В диапазоне частот 20–250 МГц изучены статистические закономерности изменения скорости распространения и поглощения энергии электромагнитных импульсов в мерзлых засоленных отложениях озерно-аллювиального генезиса. Установлена тесная связь динамического признака георадиолокации (скорости изменения амплитуды импульсов) с температурой начала замерзания порового раствора, а также со степенью засоленности грунтов и содержанием в них незамерзшей воды. Описана методика построения устойчивых математических моделей для получения количественных экспресс-оценок некоторых свойств мерзлых засоленных дисперсных грунтов на основе использования нормативных характеристик разреза. Даны рекомендации по частному применению этих моделей для дистанционного мониторинга состояния грунтовых оснований фундаментов зданий и сооружений в застроенной части Якутска и определены направления дальнейших исследований.

Засоленность мерзлых грунтов, электромагнитные импульсы, мониторинг, динамический признак георадиолокации, математические модели

INVESTIGATION OF SALINE FROZEN SOIL PROPERTIES, USING A DYNAMIC GEORADAR METHOD

L.G. Neradovsky

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 677010, Yakutsk, Merzlotnaya str., 1, Russia, mpi@ysn.ru

Based on the site investigation reports of geological engineering survey, the results were obtained indicating that the properties and behaviour of frozen foundation materials can be monitored with the help of georadar from the ground surface. In the 20–250 MHz frequency range, the statistical regularities of the change of velocity of electromagnetic pulse propagation and attenuation in frozen saline sediments of lacustrine and alluvial origin were studied. The dynamic georadar response (the rate of change in pulse amplitudes) was found to correlate closely with the freezing point of pore solution, as well as with the soil salinity and the content of unfrozen water. The article describes a procedure for constructing stable mathematical models to obtain rapid quantitative estimates of some properties of frozen saline soils based on the profile standard characteristics. It provides recommendations for special applications of the derived mathematical models to remote monitoring of the frozen foundation soils below endangered buildings and structures in Yakutsk and outlines further research.

Salinity of frozen soils, electromagnetic pulses, monitoring, dynamic georadar response, mathematical models

ВВЕДЕНИЕ

Из теории и практики инженерного мерзлотоведения известно, что природное или техногенное засоление приводит к снижению несущей способности мерзлых грунтов на нагрузки фундаментов инженерных сооружений. Поэтому изучение засоленности, как и других физико-механических свойств, является необходимым условием для обеспечения безопасной эксплуатации объектов промышленного, гражданского и сельскохозяйственного строительства, возводимых в криолитозоне России и, в частности, на территории Республики Саха (Якутия). При этом особую актуаль-

ность для решения проблемы устойчивости и надежности эксплуатируемых зданий и сооружений имеет контроль (мониторинг) временной и пространственной направленности процесса техногенного засоления. Решение этой проблемы неразрывно связано с изучением поверхностных и подземных грунтовых вод, движении которых приводит к растеплению многолетнемерзлых грунтов и перераспределению в них содержания и состава солей. В результате в местах аварийных утечек из теплоцентралей и канализационных коллекторов в мерзлое грунтовое основание фундаментов посту-

пает горячая вода и фекалии, от которых под зданиями и сооружениями образуются чаши протаивания – техногенные талики и криопэги – минерализованные воды с отрицательной температурой [Анисимова, 1981].

Системное и полноценное инженерно-геокриологическое изучение ореолов техногенного засоления мерзлых грунтов, таликов и криопэгов невозможно путем проведения только буровых работ, без применения геофизических методов. Среди них особое место (по возможности работать под зданиями и сооружениями) занимает метод георадиолокационного зондирования (ГРЗ), относящийся к классу методов высокочастотной импульсной электроразведки.

Методом ГРЗ можно с высокой детальностью и точностью зондировать (до глубины 10–30 м) немагнитные мерзлые рыхлые отложения, изучая их структуру, литологический состав и в редких случаях геокриологическое состояние. В настоящее время для расширения круга решаемых задач в лаборатории георадиолокации Института горного дела Севера СО РАН и лаборатории инженерной геокриологии Института мерзлотоведения СО РАН ведется совместная методическая разработка нового и перспективного направления – динамической георадиолокации. Оно базируется на изучении спектральных и скоростных характеристик изменения формы и амплитуды затухания электромагнитных импульсов. Эти характеристики в несколько раз более чувствительны к изменению состояния и физико-механических свойств мерзлых грунтов, нежели скорость распространения импульсов. Об этом говорят результаты экспериментальных исследований, полученные в Якутии [Нерадовский, Омеляненко, 2004а,б; Нерадовский, 2005].

По сути динамическая георадиолокация мало чем отличается от динамической сейсморазведки, которая на протяжении длительного времени успешно использует амплитудно-спектральные характеристики для изучения глубинных тектонических разломов [Берзон, 1977; Гликман, 2003], прямых поисков неструктурных (стратиграфических) месторождений нефти и газа [Кондратьев, 1986] и решения иных сложных задач по признаку аномального поглощения энергии упругих волн в геологических средах.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы на примере изучения и статистической обработки архивных материалов инженерно-геологических изысканий показать высокую информативность использования динамической георадиолокации как метода дистанционного исследования физических свойств мерзлых засоленных дисперсных грунтов в условиях плотной городской застройки и инженерных коммуникаций.

Исследования выполнены по материалам Якутского треста инженерно-строительных изысканий (ЯкутГИСИЗ).

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Двухэтажное кирпичное здание инженерно-технического факультета Якутского госуниверситета расположено в Якутске (ул. Ярославского, 47). Оно было построено в 1910 г. и называлось сначала Реальным училищем, а затем, в советское время, Педагогическим институтом. Из-за неправильной эксплуатации под зданием образовалась чаша оттаивания с техногенным засолением грунтов до глубины 4–6 м. В ее пределах образовался и развивался надмерзлотный криопэг. На момент последнего обследования здания [Петров, 1992; Мучин, 1998] чаша протаивания промерзла, но криопэг в ней сохранился и наиболее сильно проявляет себя со стороны поступления тепла, воды и солей, т. е. со стороны бывшей котельной. Сохранились и следы теплового техногенного воздействия на толщу многолетнемерзлых грунтов. Они уверенно фиксируются повышением температуры грунтов на 2,0–2,5 °С на фоне сохранившихся фрагментов реликтовой мерзлоты (–5...–6 °С) и уверенно прослеживаются методом георадиолокации до глубины 9,4–11,5 м по признаку повышенного поглощения энергии электромагнитных импульсов.

К началу 90-х гг. прошлого столетия здание пришло в аварийное состояние, а в 1997 г. перестало отапливаться и эксплуатироваться. Для инженерного мерзлотоведения само здание также представляет интерес, как редкий объект, построенный на ленточном фундаменте, с почти вековым опытом эксплуатации на мерзлых грунтах. Кроме того, грунтовое основание здания хорошо изучено в инженерно-геологическом отношении бурением скважин и наземными геофизическими методами до глубины 10–15 м и представляет собой ценный полигон для проведения научных исследований.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалы, по которым проведены статистические исследования радиофизических свойств мерзлых засоленных дисперсных грунтов, получены по результатам мерзлотного обследования здания в 1991 г. Оно включало бурение девяти скважин, постановку метода георадиолокации с зондированием разреза до 10–20 м в 114 точках, а также геодезические наблюдения за деформацией здания. Скважины бурились ручным способом внутри здания с поверхности деревянного пола. Опробование разреза выполнялось по стандартной методике. Для определения влажности (льдистости) грунтов пробы отбирались по стволу скважин с шагом 1 м, а для остальных физико-механических

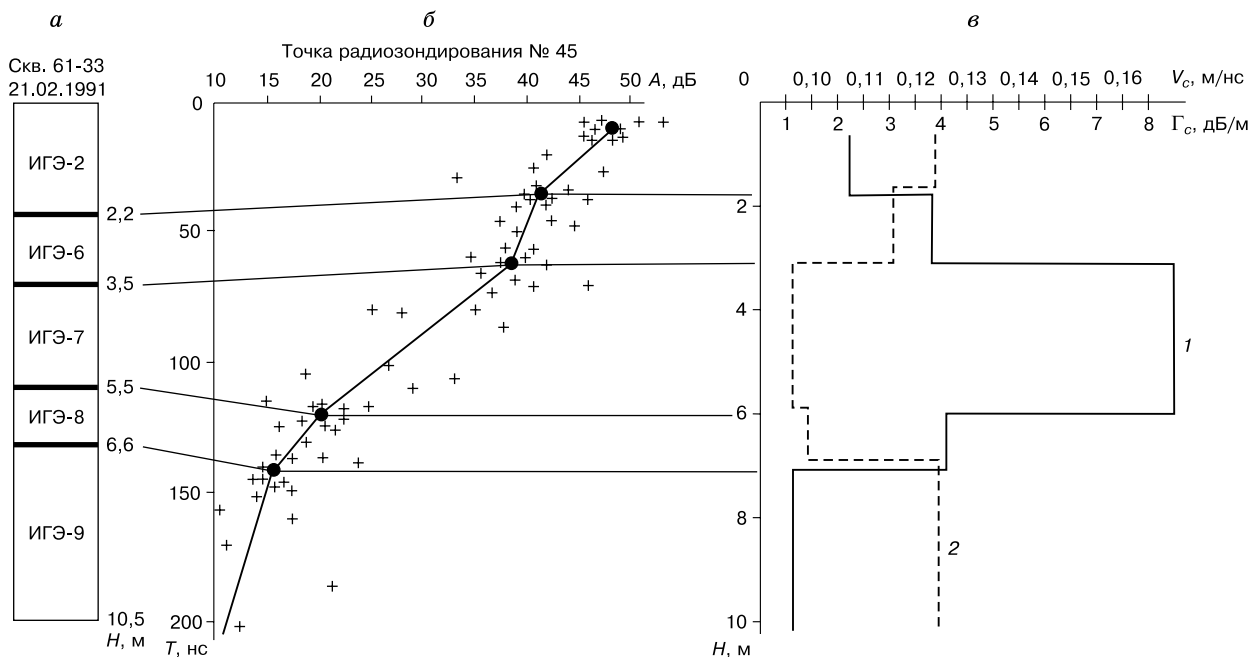


Рис. 1. Параметрическое определение радиофизических свойств мерзлых дисперсных грунтов на скважине аппаратурой 17ГРЛ-1:

a – колонка ИГЭ (инженерно-геологического элемента) по скважине; *б* – сглаженный график амплитуд когерентных импульсов (A); *в* – графики радиофизических свойств грунтов (1 – поглощения энергии импульсов (Γ_c), 2 – скорости распространения импульсов (V_c)).

свойств руководствовались правилом: по одной пробе из каждой литологической разности. Определение свойств мерзлых грунтов производилось в грунтово-химической лаборатории треста ЯкутГИСИЗ.

Измерения сигналов георадиолокации осуществлялись отечественной аппаратурой 17ГРЛ-1, выпускаемой на заводе «Метеоприбор» в г. Кимовске Тульской области. Эта техника рассчитана на зондирование в отдельных точках с ручным избирательным измерением времени задержки и амплитуды импульсов сигналов в полосе частот 20–250 МГц.

Зондирование проводилось в двух азимутах с поворотом оси антенного диполя на 90° . При параметрических измерениях этот прием подавления помех дополнялся площадным накоплением точек зондирования. Для этого сигналы измерялись в квадрате размером 3–5 м², центр которого совмещался с устьем скважин.

Обработка сигналов заключалась в визуальном анализе на экране ЭЛТ осциллографа общей структуры сигнала и формы отраженных импульсов, а затем построении графиков затухания амплитуд импульсов по времени задержки (глубине) и аппроксимацией графиков полиномами 1–5 порядка. В результате получались сглаженные графики амплитуд импульсов. По точкам перегиба

графиков и в местах скопления импульсов выделялись когерентные отражения, которые образуются на плоских и сравнительно протяженных границах разреза с существенной разницей диэлектрической проницаемости грунтов.

Интерпретация графиков когерентных импульсов осуществлялась обычным способом, т. е. путем сравнения особенностей формы графиков с обобщенной литологической колонкой разреза всего участка работ и частными колонками по отдельным скважинам. При этом принимались во внимание температуры грунтов на глубине 10–15 м и лабораторные определения физических свойств грунтов. После установления связи (идентификации) когерентных импульсов с опорными границами разреза производилась заключительная операция, т. е. по каждому слою разреза вычислялись значения скорости распространения импульсов и вертикального градиента затухания их амплитуд.

Примером могут служить графики, представленные на рис. 1. Крестиками на рис. 1,б обозначены точки отраженных импульсов, зарегистрированных при площадных измерениях в окрестности скважины № 61-33.

Более полное описание методики определения с поверхности земли радиофизических свойств мерзлых грунтов в их естественном залегании можно найти в работе [Нерадовский, 2005].

Статистический анализ архивного материала буровых работ и метода георадиолокации проводился стандартными методами. Его цель заключалась в изучении взаимосвязей радиофизических свойств с некоторыми свойствами мерзлых засоленных грунтов. Следует отметить, что схема неравномерного опробования разреза создает серьезные трудности для корректного решения этой задачи. Для их преодоления из инженерной геологии была заимствована методика определения нормативных значений физико-механических свойств грунтов по инженерно-геологическим элементам (ИГЭ) разреза [ГОСТ 20522-96, 1996].

Переход из области частных определений в область метрик средних значений существенно повышает надежность построения математических моделей, используемых для количественного описания эмпирических связей между различными геолого-геофизическими величинами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разрез объекта исследования сложен до глубины 1–2 м насыпными глинистыми грунтами (суглинками) с большим количеством разнообразного строительного мусора. Этот слой разреза в зависимости от его мощности и содержания мусора идентифицируется как ИГЭ-1 и ИГЭ-2 (табл. 1). На момент проведения изысканий слой насыпных грунтов находился в мерзлом слабозасоленном состоянии. Ниже слоя насыпных грунтов залегают озерно-аллювиальные отложения I надпойменной террасы р. Лены. Они представлены мерзлыми и в различной степени засоленными и льдистыми суглинками, супесями, пылеватыми и мелкозернистыми песками. Нижняя граница засоленных грун-

Таблица 1. Литологический состав и состояние грунтов в различных инженерно-геологических элементах

Номер ИГЭ	Породы озерно-аллювиального генезиса
ИГЭ-1	Насыпной грунт из супесей и серых суглинков со строительным мусором до 60–90 %, слабозасоленный, льдистый, твердомерзлый
ИГЭ-2	Насыпной грунт из коричневых суглинков с обломками щебня, кирпича, дерева, слабозасоленный, слабольдистый, мерзлый
ИГЭ-3	Суглинки с примесью органики, слабозасоленные, льдистые, талые или мерзлые
ИГЭ-4	Суглинки с примесью органики, слабозасоленные, пластично-мерзлые с прослоями и линзами криопэггов
ИГЭ-5	Песок пылеватый, сильнозасоленный, малольдистый с массивной криотекстурой, твердомерзлый
ИГЭ-6	Супесь темно-серая, слабозасоленная, малольдистая с массивной криотекстурой, твердомерзлая
ИГЭ-7	Суглинки черно-коричневые, средnezасоленные, среднелдистые, пластично-мерзлые с прослоями криопэггов
ИГЭ-8	Песок мелкий, темно-серый, иногда желтоватый, сильнозасоленный, льдистый с массивной криотекстурой, твердомерзлый
ИГЭ-9	Песок мелкий, темно-серый, незасоленный, нельдистый с массивной криотекстурой, твердомерзлый

тов (ИГЭ-3–ИГЭ-8) проходит на глубине 5–6 м. В верхней и нижней части толщи засоленных грунтов находятся прослой и линзы криопэггов (ИГЭ-4, ИГЭ-7) с общей минерализацией 10–12 г/л и температурой замерзания порового раствора (незамерзшей воды), равной –1,52 °С (табл. 2).

Таблица 2. Нормативные (обобщенные) характеристики свойств мерзлых засоленных озерно-аллювиальных отложений I надпойменной террасы р. Лены

Номер ИГЭ	Интервал глубины залегания ИГЭ, м	V_c , м/нс	Γ_c , дБ/м	i_p , д. ед.	W_{tot} , д. ед.	W_w , д. ед.	D_{sal} , %	T_{bf} , °С
<i>Слой сезонного промерзания–оттаивания</i>								
ИГЭ-1	0–1,0	0,108	3,31	0,29	0,32	0,08	0,27	–0,48
ИГЭ-2	0–2,0	0,085	6,03	0,11	0,19	0,05	0,26	–1,04
ИГЭ-3	1,6–2,6	0,087	4,22	0,21	0,42	0,05	0,36	–0,90
ИГЭ-4	3,1–3,6	0,077	7,29	0,28	0,32	0,10	0,52	–1,52
<i>Многолетнемерзлая толща</i>								
ИГЭ-5	2,2–5,6	0,082	4,44	0,19	0,49	0,07	0,48	–0,80
ИГЭ-6	3,0–6,0	0,083	5,44	0,13	0,46	0,11	0,39	–0,90
ИГЭ-7	3,0–5,0	0,079	7,44	0,27	0,53	0,21	0,83	–1,52
ИГЭ-8	5,0–6,0	0,092	3,03	0,32	0,57	0,20	0,23	–0,48
ИГЭ-9	5,0–10,0	0,104	2,42	0,12	0,19	0,001	0,00	–0,12

Примечание. V_c – скорость распространения импульсов в слое; Γ_c – градиент затухания амплитуды импульсов в слое; i_p – льдистость за счет видимого льда; W_{tot} – суммарная весовая влажность (льдистость); W_w – содержание незамерзшей воды в грунте; D_{sal} – степень засоленности; T_{bf} – температура начала замерзания порового раствора.

Таблица 3. Корреляционная матрица взаимосвязей радиофизических свойств с физическими свойствами мерзлых засоленных грунтов

Параметры*	V_c	Γ_c	i_i	W_{tot}	W_w	D_{sal}	T_{bf}
V_c	1,00	-0,65	0,65	0,40	-0,15	-0,46	0,71
Γ_c		1,00	-0,50	-0,34	0,55	0,67	-0,92
i_i			1,00	0,62	0,22	-0,06	0,56
W_{tot}				1,00	0,20	0,06	0,32
W_w					1,00	0,87	-0,59
D_{sal}						1,00	-0,79
T_{bf}							1,00

* Выделенные цифры – статистически значимые значения коэффициента корреляции.

Анализ нормативных характеристик радиофизических свойств (см. табл. 2) показывает, что в толще мерзлых засоленных дисперсных грунтов, являющейся средой для образования криопэггов, электромагнитные импульсы распространяются с низкой скоростью (0,089 м/нс) и высоким затуханием амплитуды (4,41 дБ/м). Экстремальные значения этих характеристик равны 7,37 дБ/м и 0,078 м/нс. Они наблюдаются преимущественно в засоленных суглинках с маломощными (0,1–0,3 м) прослоями и линзами криопэггов.

В незасоленных многолетнемерзлых песках (ИГЭ-9) нормативные значения скоростных и поглощающих характеристик равны 0,104 м/нс и 2,42 дБ/м.

Таким образом, контраст мерзлых засоленных и незасоленных грунтов составляет по поглощающим свойствам 58 %, а по скоростным – 15 %. Из этого следует, что возможности динамической георадиолокации в распознавании и мониторинге степени засоленности мерзлых грунтов почти в 4 раза выше, чем у обычной кинематической георадиолокации.

Асимметрия контрастов мерзлых грунтов по степени засоленности сохраняется и в корреляционных связях, где поглощающая характеристика превосходит скоростную в 1,3–3,7 раза. На это указывает результат расчета корреляционной матрицы (табл. 3). При этом максимум корреляции

поглощающей характеристики ($r = -0,92$) соответствует температуре замерзания порового раствора в грунтах T_{bf} . Значимый уровень связи поглощающей характеристики установлен также с величиной D_{sal} – степенью засоленности грунтов ($r = 0,67$).

Суммарная весовая влажность (льдиность) W_{tot} оказывает слабое влияние на поглощение энергии электромагнитных импульсов в мерзлых засоленных грунтах. Тем самым подтверждается факт о независимости максимума коэффициента потерь диэлектрической проницаемости от влажности (льдиности) мерзлых засоленных дисперсных грунтов, установленный в работе [Фролов, Гусев, 1973].

В отличие от влажности характеристики засоления мерзлых грунтов (T_{bf} , i_i , D_{sal}) тесно связаны друг с другом (см. табл. 3), что полностью согласуется с теорией структурно-фазовых переходов. Судя по корреляции, наиболее чувствительна к изменению степени засоленности мерзлых дисперсных грунтов величина содержания незамерзшей воды W_w ($r = 0,87$) и, в несколько меньшей степени, температура начала ее замерзания ($r = -0,79$). Именно эти важнейшие характеристики термодинамического состояния мерзлых грунтовых сред оказывают сильное влияние на поглощение энергии электромагнитных импульсов. Они и должны быть в первую очередь предметом изучения метода динамической георадиолокации. Для их определения были разработаны робастные математические модели (табл. 4). В случае необходимости их можно использовать (с некоторыми оговорками) для получения экспресс-оценок величин W_w , D_{sal} при проведении изысканий на аварийных объектах Якутска.

Определение экспресс-оценок следует начинать с величины T_{bf} . Для надежности принимаемых решений это лучше делать по диаграмме (рис. 2), комплексно используя поглощающую (Γ_c) и скоростную (V_c) характеристики сигналов георадиолокации. Изолинии на диаграмме означают значения T_{bf} . Пользоваться диаграммой для решения практических задач рекомендуется в пределах области экспериментальных данных. За границами этой области точность определений T_{bf} может

Таблица 4. Математические модели описания физических свойств мерзлых засоленных песчано-глинистых грунтов Якутска

Парные корреляционные связи величин	Коэффициент корреляции Спирмена	Математическая модель статистической связи	
		линейные уравнения регрессии	нелинейные полиномиальные уравнения регрессии
$T_{bf}-\Gamma_c$	-0,92	$T_{bf} = 0,136 - 0,217\Gamma_c$	$T_{bf} = 2,51 - 1,33\Gamma_c + 0,12\Gamma_c^2$
$D_{sal}-T_{bf}$	-0,79	$D_{sal} = 0,0639 - 0,3181T_{bf}$	$D_{sal} = -0,155 - 0,935T_{bf} - 0,422T_{bf}^2$
W_w-D_{sal}	+0,87	$W_w = -0,0059 + 0,2187D_{sal}$	$W_w = -0,0291 + 0,248D_{sal} - 0,058D_{sal}^2$

быть недопустимо низкой. Для более точного определения величины T_{bf} лучше воспользоваться уравнением квадратичной зависимости

$$T_{bf} = -5,63 + 76,05V_c + 0,682\Gamma_c - 265V_c^2 - 4,82(V_c \cdot \Gamma_c) - 0,045\Gamma_c^2.$$

Для определения экспресс-оценок величин D_{sal} , W_w можно выбрать любое уравнение из табл. 4. При этом рекомендуется придерживаться следующего порядка действий: сначала по T_{bf} определить D_{sal} (рис. 3,а), а затем по D_{sal} определить W_w (см. рис. 3,б).

Поясним графики зависимостей физических свойств (см. рис. 3). Приведенные на них большие кружки называются “бубликами”. Они означают места концентрации точек с близкими значениями изучаемых величин. Следует напомнить, что каждая точка на графиках представляет собой нормативное значение ИГЭ, содержащее в свернутом виде несколько единичных значений.

Точность определений экспресс-оценок физических свойств мерзлых засоленных дисперсных грунтов различная. Точнее всего определяется температура начала замерзания порового раствора. При $T_{bf} < -0,6$ °С средние значения абсолютной ошибки не превышают 0,025 °С. При $T_{bf} > -0,6$ °С ошибка возрастает до 0,1 °С, т. е. почти на порядок.

Количество незамерзшей воды определяется в 50 % случаев со средней относительной точностью до 7,0 %. При увеличении W_w до 0,21 д. ед. точность определений снижается до 16,7 %, а при уменьшении W_w до 0,015–0,020 д. ед. – до 62,5 %.

Степень засоленности мерзлых грунтов в интервале 0,35–0,45 % определяется практически с нулевой погрешностью. За пределами этих значений средняя относительная ошибка возрастает до 40–75 %.

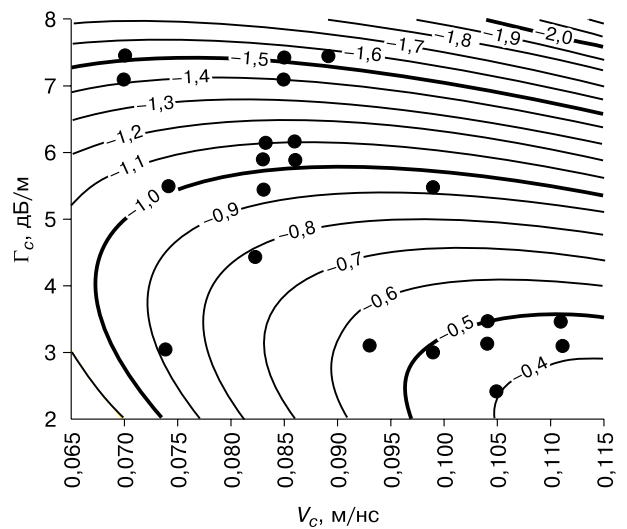


Рис. 2. Диаграмма для определения температуры начала замерзания незамерзшей воды в мерзлых засоленных дисперсных грунтах по скоростной (V_c) и поглощающей (Γ_c) характеристикам.

Изолинии – значения T_{bf} .

Самая низкая точность количественных определений (относительная ошибка 63–75 %) отмечается для категории слабозасоленных мерзлых грунтов, что затрудняет изучение их состояния и свойств (W_w , D_{sal}) методом динамической георадиолокации.

Изложенный подход к построению математических петрофизических моделей и определению экспресс-оценок свойств мерзлых засоленных грунтов лучше всего применим в тех ситуациях, когда по тем или иным причинам отсутствуют

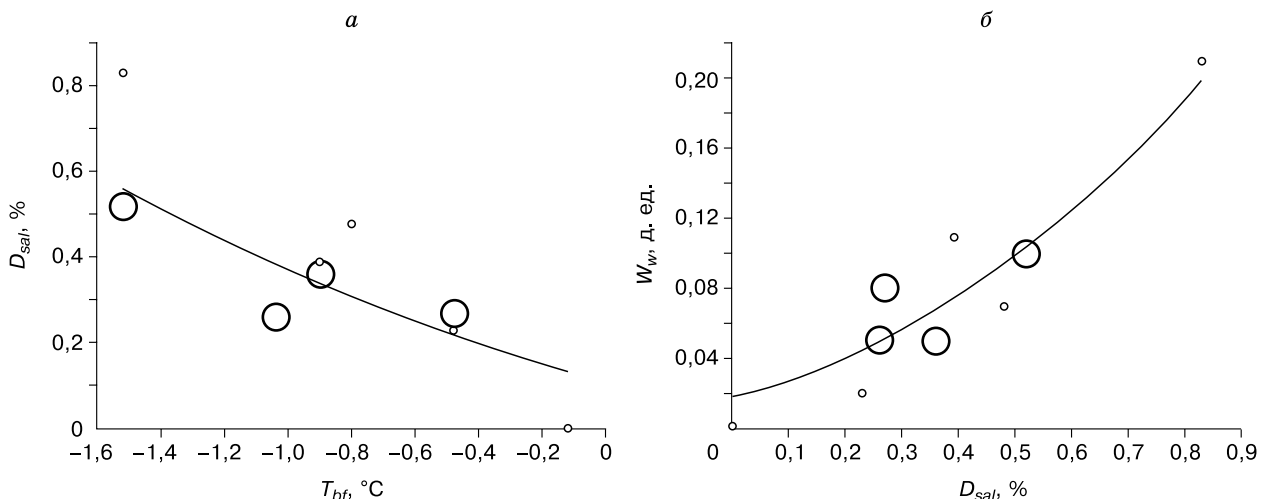


Рис. 3. Поле корреляций нормативных характеристик ИГЭ мерзлых засоленных песчано-глинистых грунтов и кривые регрессий полинома второго порядка для определения:

а – степени засоленности (D_{sal}); б – содержания незамерзшей воды (W_w). Поясн. см. в тексте.

данные бурения с результатами лабораторных исследований физико-механических свойств грунтов. В общем виде такие ситуации можно разделить на две категории.

Первая категория – плановые ситуации. Они типичны при опережающей постановке геофизических работ на стадии технико-экономического обоснования или разработки технического проекта объекта инженерно-геокриологических изысканий с целью рационального размещения точек буровых скважин на ключевых участках местности. Вторая категория – чрезвычайные ситуации. В последнее время они нередко возникают на городских территориях, связаны с деформациями или обрушением инженерных сооружений и требуют быстрой оценки состояния грунтового основания фундаментов для принятия взвешенных проектных решений и проведения ремонтно-восстановительных работ. В таких ситуациях практическая значимость динамической георадиолокации резко возрастает, если принять во внимание, что другие известные методы инженерной геофизики в редких случаях могут работать в таких условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статистические исследования архивного материала изыскательских работ имеют интересные и важные результаты. Они свидетельствуют о правильном выборе нового направления исследований в георадиолокации, объектом изучения которого становятся поглощающие свойства мерзлых грунтов. Научную ценность при этом имеет установление тесной связи динамического признака георадиолокации – градиента затухания амплитуды импульсов с температурой начала замерзания и содержанием незамерзшей воды в грунте. Прикладное значение имеют математические робастные (устойчивые) модели, полученные по методике нормативных характеристик ИГЭ разреза. Они свидетельствуют о возможности выхода георадиолокации на уровень количественной оценки тенденций изменения во времени и пространстве состояния и свойств мерзлых грунтовых оснований фундаментов зданий и сооружений. Представляется, что все это внесет свой вклад в развитие петрофизики мерзлых пород и совершенствование методики неразрушающего контроля состояния и свойств мерзлых горных пород в строительстве, коммунальном хозяйстве, горном деле и иных областях применения метода динамической георадиолокации.

Изучение радиофизических свойств засоленных и иных мерзлых грунтов *in situ* представляет собой сложную задачу. Ее решение требует проведения дорогостоящих работ по бурению скважин с отбором проб грунтов, определения их физико-

механических свойств, а также постановки параметрических георадиолокационных измерений в окрестности горных выработок. В современных условиях организовать и выполнить такие работы очень сложно. Поэтому дальнейшие исследования радиофизических свойств мерзлых грунтов рекомендуется продолжить по пути ревизии архивных материалов изыскательских организаций. Можно надеяться, что повторная обработка архивных материалов с использованием компьютерной техники статистического анализа принесет не мало важных результатов и даст более полное и точное представление о закономерностях изменчивости радиофизических свойств многолетнемерзлых пород и грунтов разного генезиса, литологии и гидрогеохимического состава. Наряду с этим надо апробировать репрезентативность полученных математических моделей в разных частях Якутска. В то же время необходимо сосредоточить усилия для разработки федеральной программы комплексных петрофизических исследований в различных областях России на территориях промышленного освоения криолитозоны. Цель программы – создать единую базу данных по петрофизическим свойствам мерзлых грунтов с широким набором локальных и региональных математических моделей для проведения неразрушающего контроля (мониторинга) состояния и свойств мерзлых грунтовых оснований фундаментов инженерных сооружений на различных стадиях эксплуатации.

Что касается метода георадиолокации, то его значимость и место в планируемых петрофизических исследованиях определяются возможностью эффективно работать на застроенных территориях и в промзонах. При этом возможны различные варианты методики непрерывной георадарной съемки. Однако они должны обязательно сочетаться с методикой параметрических многократных измерений сигналов в окрестности каждой горной выработки или топографических пикетов. Как показывает практический опыт и специальные эксперименты, без этого нельзя получить надежные и достоверные оценки радиофизических свойств мерзлых пород и грунтов, особенно это требование касается поглощающих свойств.

Литература

- Анисимова Н.П.** Криогидрогеохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск, Наука. Сиб. отд-ние, 1981, 153 с.
- Берзон И.С.** Сейсмическая разведка вертикально-слоистых сред фундамента. М., Недра, 1977, 320 с.
- Гликман А.Г.** О новом принципе сейсморазведки // Геофизика XXI столетия: Сб. тр. Четвертых геофиз. чтений им. В.В. Федынского (Москва, 28 февраля–2 марта 2002 г.). М., Науч. мир, 2003, с. 345–352.
- ГОСТ 20522-96.** Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. М., 1996, 25 с.

- Кондратьев О.К.** Сейсмические волны в поглощающих средах. М., Недра, 1986, 176 с.
- Мучин В.И.** Комплексное мерзлотно-строительное обследование здания Реального училища по ул. Ярославского, 47. Ч. II. Строительное обследование. Якутск, 1998. (Архив треста ЯкутГИСИЗ; арх. № 5288).
- Нерадовский Л.Г.** Изучение состояния и свойств мерзлых грунтов и криопэгов методом георадиолокации: Дис. ... канд. техн. наук. Якутск, 2005, 204 с.
- Нерадовский Л.Г., Омеляненко А.В.** Динамическая георадиолокация мерзлых грунтов и мониторинг криопэгов // Криосфера нефтегазоносных провинций: Материалы Междунар. конф. Тюмень, Науч. совет по криологии Земли, 2004а, с. 138.
- Нерадовский Л.Г., Омеляненко А.В.** Прочностные свойства коренных пород криолитозоны по данным динамической георадиолокации // Там же, 2004б, с. 138–139.
- Петров С.Б.** Материалы мерзлотно-строительного надзора по учебному корпусу ИТФ по ул. Ярославского, 47. Якутск, 1992. (Архив треста ЯкутГИСИЗ; арх. № 4545).
- Фролов А.Д., Гусев Б.В.** Диэлектрический метод определения содержания незамерзшей воды в мерзлых песчано-глинистых горных породах // Вторая Междунар. конф. по мерзлотоведению. Вып. 4. Якутск, 1973, с. 226–229.

*Поступила в редакцию
29 марта 2006 г.*