

УДК 550.837.6 : 551.345.1

А.П. Ермаков¹, А.В. Старовойтов²

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

Приведены результаты применения метода георадиолокации на засоленных и незасоленных грунтах в зонах распространения многолетнемерзлых пород. Проведена геологическая интерпретация георадарограмм при изучении термокарста и бугров пучения. На засоленных грунтах рассмотрены возможности применения метода георадиолокации при картировании кровли и подошвы многолетнемерзлых пород.

Ключевые слова: георадиолокация, многолетнемерзлые породы, термокарст, бугры пучения.

The article presents the results of using Ground Penetration Radar (GPR) method for investigation of salt soils and non salt soils in the area of permafrost. Geological interpretation of time cross sections for investigation of thermokarst and pingo was made. The possibility of application of GPR method for lateral exploration the upper and lower of permafrost was examined for salt soils.

Key words: Ground Penetration Radar (GPR) method, permafrost, thermokarst, pingo.

Введение. Большая область распространения многолетнемерзлых пород (ММП) на территории нашей страны предопределяет целенаправленное изучение этих пород в связи с широким объемом строительства в условиях развития ММП. На фоне традиционных геофизических методов сейсморазведки и электроразведки, используемых для картирования мерзлых грунтов, результаты применения сравнительно нового метода георадиолокации свидетельствуют о широком спектре возможностей этого метода как для геологического картирования ММП, так и для определения физических свойств массива.

Материалы получены в ходе опытно-методических работ, проведенных сотрудниками геологического факультета МГУ и ОАО ПНИИИС, на Европейском Севере России в районах Варандэй и р. Южная Хыльчюю. Общий объем выполненных георадиолокационных профилей составил 4560 м. Для геологической интерпретации георадарограмм привлечены данные изучения разрезов инженерных скважин.

Для полевых наблюдений использовали георадар «Зонд-12с» с неэкранированными антеннами 75 и 150 МГц и экранированной антенной 300 МГц. Исходя из опыта предыдущих исследований набор этих антенн позволяет решать широкий круг задач. Для обработки георадиолокационных данных использовали программное обеспечение RadExPro, разработанное в ООО «Деко-геофизика» (Москва).

Среди множества нерешенных или малоизученных проблем, связанных с возможностью применения метода георадиолокации на многолетнемерзлых грунтах, с методикой георадиолокационного профилирования,

геологической интерпретацией и истолкованием результатов исследований, выделяются проблемы, связанные с оценкой значений коэффициента отражения как инструмента для изучения геологической среды на отраженных электромагнитных волнах, мерзлых грунтов с различной степенью засоленности, а также связи засоленности грунта с затуханием и поглощением электромагнитных волн. При этом определяются также значения диэлектрической проницаемости. Влияние засоленности грунта на затухание и поглощение электромагнитных волн на высоких частотах (МГц) при исследованиях полевым георадаром на сегодняшний день плохо изучено, публикации малочисленны и носят по большей части описательный характер.

Статья посвящена рассмотрению результатов применения метода георадиолокации на засоленных и незасоленных грунтах в зонах распространения ММП.

Применение георадара для изучения ММП. В настоящее время опыт применения георадара для изучения ММП как многофазной системы (лед, вода, грунт, воздух) по большей части сводится к структурным построениям с выделением кровли и иногда подошвы ММП. Широкое применение георадара для такого рода работ обусловлено в первую очередь существенным различием физических свойств (в данном случае диэлектрической проницаемости) пород, находящихся в талом и мерзлом состоянии. Например, для значений частоты 50–300 МГц диэлектрическая проницаемость талого влажного песка при заморозке уменьшается в 3 раза — с 15 до 5 соответственно.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, вед. науч. с., e-mail: ermakov@geol.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, доцент, e-mail: starovoytov_msu@mail.ru

Таким образом, при полевых наблюдениях следует ожидать высоких значений коэффициента отражения от границы талых и мерзлых пород, т.е. кровли и/или подошвы слоя пород в мерзлом состоянии. Возможность картирования таких границ показана в работах [Василенко и др., 1999; Владов, Старовойтов, 2004; Нерадовский, 2005, 2007, 2009а, б; Омеляненко, 1989; Рекомендации..., 1989; Финкельштейн и др., 1986; Annan, Davis, 1976; Hunter et al., 2003].

Намного реже встречаются работы, где приводятся количественные оценки, такие, как значения коэффициентов отражения, поглощения или затухания, определенные при полевых наблюдениях. То же самое относится к ряду зависимостей физических свойств, например диэлектрической проницаемости (скорость распространения электромагнитных волн в среде) для разных типов горных пород и грунтов в мерзлом состоянии [Нерадовский, 2005, 2007, 2009а, б; Фролов, 1998; Argone, Delaney, 1989; Delaney, Argone, 1982].

Георадиолокационные исследования на мерзлых незасоленных грунтах. Объект Южная Хыльчюю. Полевые работы на объекте проводились летом в районе р. Южная Хыльчюю в области распространения ММП в климатических условиях тундры с целью изучения геокриологических условий при проектировании прокладки трассы трубопровода. Георадиолокационные исследования проводили вдоль прямолинейных профилей. Для пересчета из временного масштаба в глубинный использовали следующие значения скорости распространения электромагнитных волн: 4–5 см/нс — от дневной поверхности до кровли ММП и 15 см/нс собственно в ММП. Эти значения получены при сопоставлении разрезов скважин (шурфов) и георадарограмм (методика привязки описана в работе [Владов, Старовойтов, 2004]). Скорость распространения электромагнитных волн зависит от влажности отложений, и по латерали ее значения могут меняться до 30%, т.е. глубина залегания кровли ММП на данном объекте может изменяться в зависимости от степени увлажнения до 0,2 м.

По данным бурения и шурфов, верхняя часть разреза до глубины 10 м сложена (сверху вниз) торфом (талый слой), который далее сменяется толщей песка с гравием и супесями (талый и мерзлый слой). Исследуемый разрез ограничивается слоем суглинков, залегающих в мерзлом состоянии начиная с глубины 4 м. Достигнув этого слоя, электромагнитные волны быстро затухают, исчезают оси синфазности отраженных волн, запись становится малоинформативной.

На всех георадарограммах повсеместно уверенно выделяется кровля ММП по увеличению в несколько раз амплитуды отраженных волн. При этом высокая отражательная способность (высокое значение коэффициента отражения) кровли ММП приводит к появлению на георадарограммах поля интенсивных кратных волн. Глубина залегания кровли ММП составляет в среднем 0,6–0,8 м.

Из анализа георадарограмм видно, что участки с заглубленной кровлей ММП имеют прямую связь с поверхностными (ландшафтными) условиями: во всех случаях эти участки соответствуют заболоченным зонам или зонам понижения в рельефе, а также смене растительности, характерной для зон увлажнения и растепления верхней части разреза.

Резкое увеличение глубины залегания кровли ММП наблюдается на участках распространения термокарста. На рис. 1 показан георадиолокационный разрез, который пересекает термокарст, выявленный с помощью инженерно-геокриологических методов картирования. Участок термокарста показан на фрагменте инженерно-геокриологической карты. По результатам картирования, основанного на изучении ландшафта, видно, что термокарст распространен локально, в то время как по данным георадиолокационного метода термокарст имеет значительно большее распространение. Так, в результате ландшафтного картирования размеры участка с проявлениями термокарста не превышают 30 м; в соответствии с данными георадиолокации можно уверенно говорить, что размеры участка составляют не менее 70 м. Непрерывные наблюдения методом георадиолокации в данном случае позволят существенно повысить точность оконтуривания участка с развитием термокарста.

При анализе георадарограммы, приведенной на рис. 1, следует учитывать сильное искажение вертикального масштаба. Угол в 80° на георадарограммах соответствует реальному углу падения геологических границ в несколько градусов. Соотношение вертикального и горизонтального масштабов составляет около 40:1, что в данном случае связано с очень низкой скоростью электромагнитных волн в верхней части разреза: для влажного торфа скорость электромагнитных волн составляет 4–5 см/нс.

Другой пример применения георадара при изучении ММП — бугры пучения. На площади исследований выявлено несколько бугров пучения, хорошо выраженных в рельефе. Бугры изометричны в плане, составляют в поперечнике около 1,5–2 м. Высота бугров не превышает 0,5 м. Выявление бугров пучения, не выраженных в рельефе, представляет особую задачу. На рис. 2 показан пример успешного применения георадара для выявления зарождающихся бугров пучения, не выявленных в рельефе.

Минимальная глубина залегания кровли ММП оказывается на участках, где бугры пучения хорошо выражены в рельефе дневной поверхности, и не превышает здесь 0,5 м. Для не выраженных в рельефе бугров пучения кровля ММП оказывается также приподнятой (не превышает 0,5 м), но в современном рельефе поверхности не отражается. Само тело бугра пучения на фоне всей записи выделяется в виде области с низкой амплитудой электромагнитных волн и местами более «смазанной» волновой картиной. Этот факт следует использовать в качестве одного из

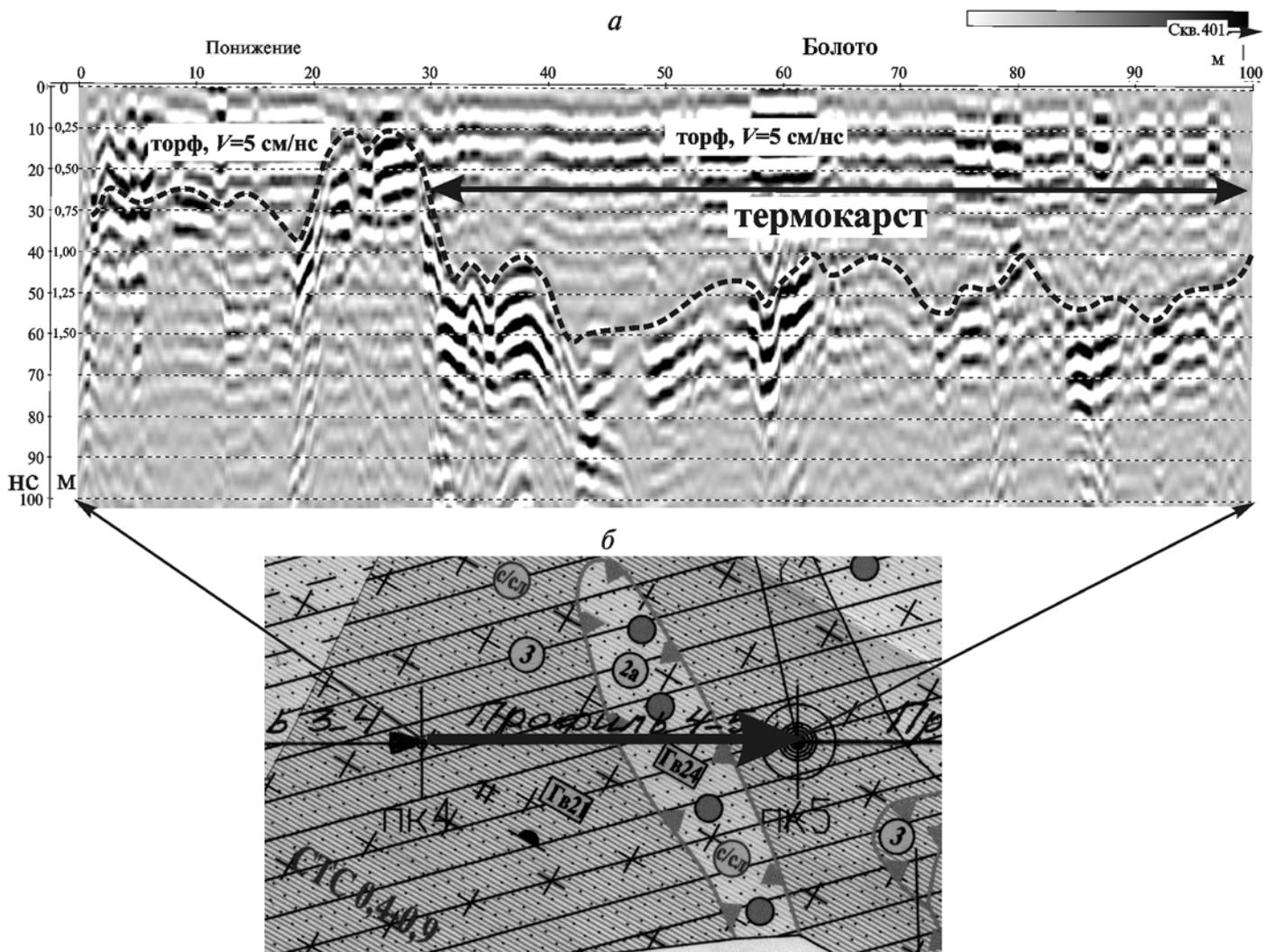


Рис. 1. Временной разрез (георадарограмма) по профилю, пересекающему участок с проявлением термокарста: *а* — георадарограмма; *б* — фрагмент инженерно-геокриологической карты. Использована антенна 300 МГц (объект Южная Хыльчюу). Кровля ММП на георадарограмме (*а*) — черная пунктирная линия. На фрагменте инженерно-геокриологической карты (*б*) индексом 2а показана область распространения термокарста, выявленная при ландшафтном картировании

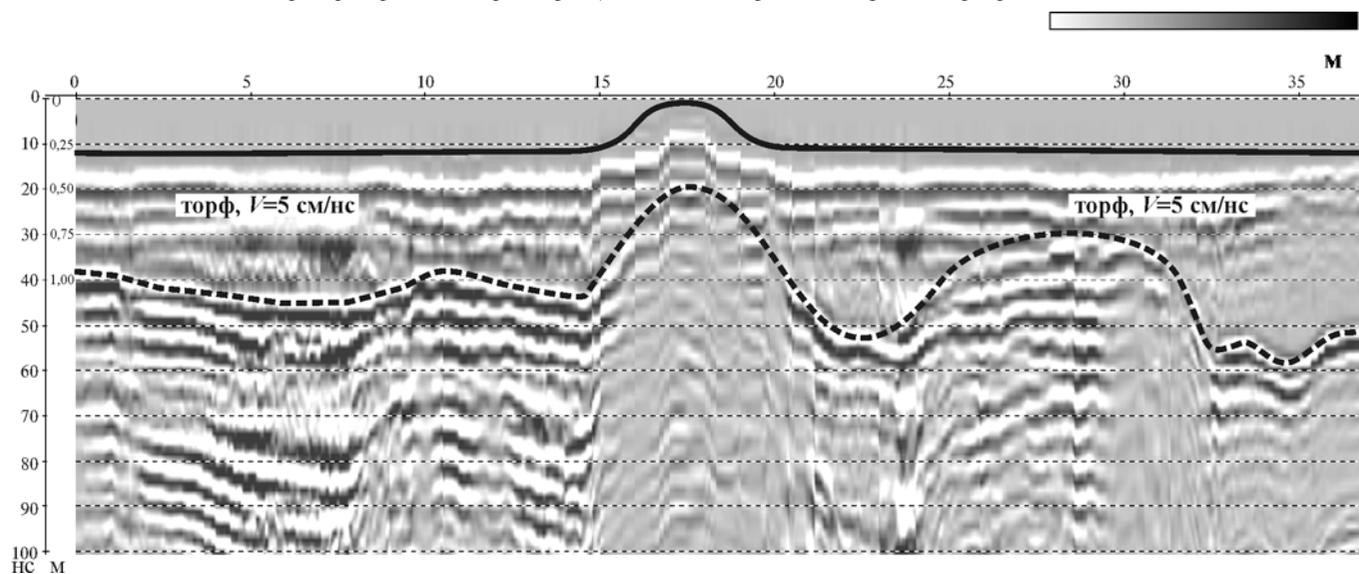


Рис. 2. Временной разрез (георадарограмма) по профилю, пересекающему бугры пучения, выраженные и не выраженные в рельефе дневной поверхности (показана сплошной черной линией). Использована антенна 300 МГц (объект Южная Хыльчюу). Кровля ММП на георадарограмме — черная пунктирная линия. Бугор пучения в центре хорошо выражен в рельефе. На пикетах 25–30 м показан зарождающийся бугор пучения

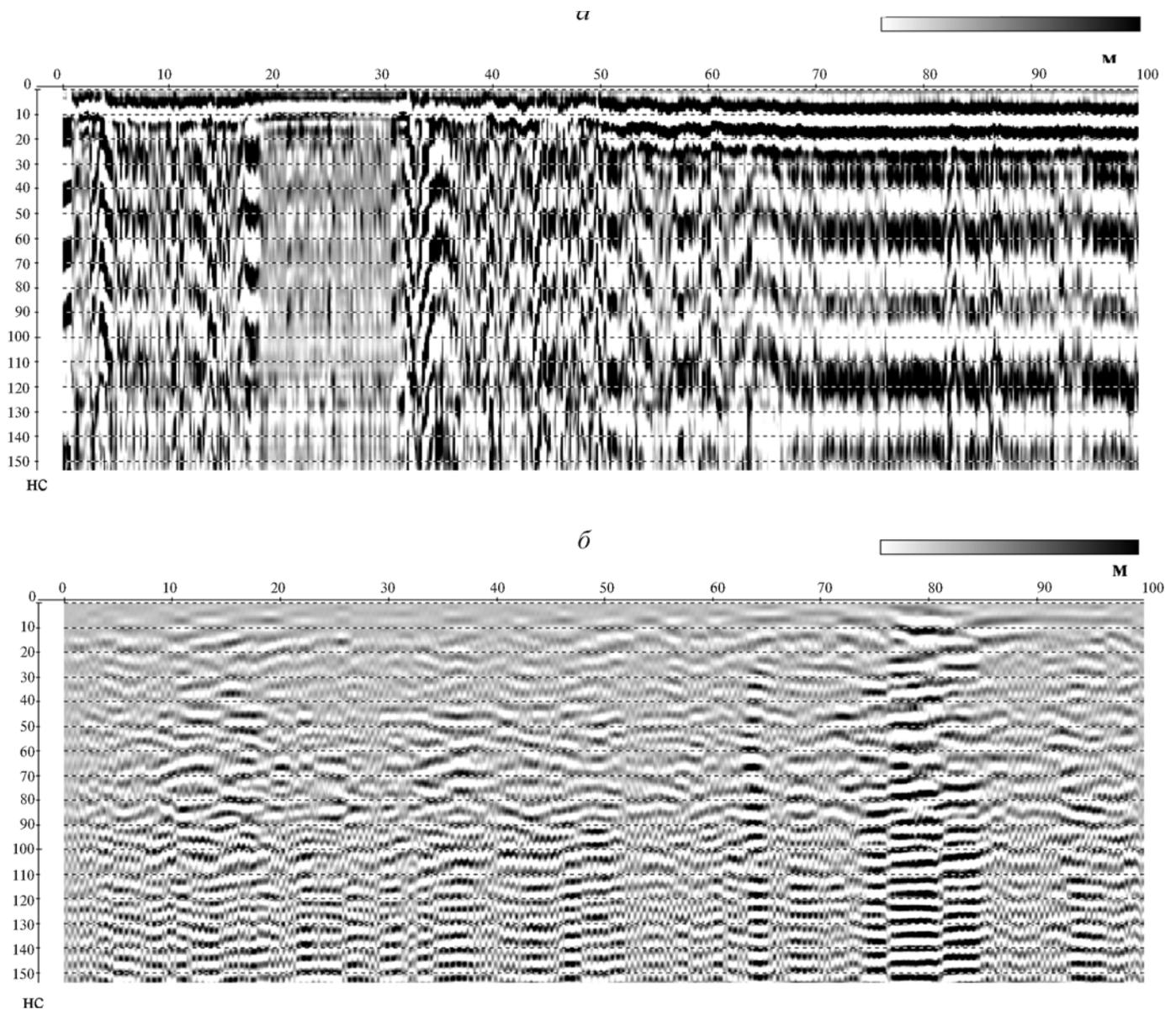


Рис. 3. Временной разрез (георадарограмма) по профилю, пересекающему область повышенной засоленности грунтов в верхней части разреза. Использована антенна 300 МГц (объект Варандэй). Профиль расположен в непосредственной близости от берега моря: *а* — георадарограмма до частотной фильтрации, *б* — после частотной фильтрации. На волновой картине георадарограмм отсутствуют выраженные оси синфазности отраженных волн. Перевод в глубинный масштаб не проводился

важных картировочных признаков при выделении относительно глубоких (1 м и более) и не выраженных в рельефе поверхности бугров пучения.

Из-за низкой скорости распространения электромагнитных волн во влажном торфе ($V = 5$ см/нс) соотношение вертикального и горизонтального масштабов на георадарограмме на рис. 2 в верхней части разреза составляет примерно 5:1. Вся поверхность участка исследований, за исключением бугров пучения, сильно увлажнена, что приводит к появлению на радарограммах записи с низкой частотой. Многочисленные оси синфазности, присутствующие на радарограммах на более поздних временах по сравнению с кровлей ММП, являются кратными волнами-помехами от кровли ММП, обладающей высоким коэффициентом отражения.

Георадиолокационные исследования на мерзлых засоленных грунтах. Объект Варандэй. Полевые исследования на объекте проводились в районе с распространением ММП в климатических условиях тундры летом в непосредственной близости от морского побережья с целью определения глубины залегания кровли и подошвы ММП. Близкое расположение моря — главная причина сильной засоленности грунтов в верхней части разреза. Георадиолокационные исследования проводили вдоль прямолинейных профилей. Все участки профилирования вместе представляют собой единый профиль, проходящий через неглубокие инженерно-геологические скважины. По результатам бурения получены описания разрезов скважин и данные о засоленности грунтов.

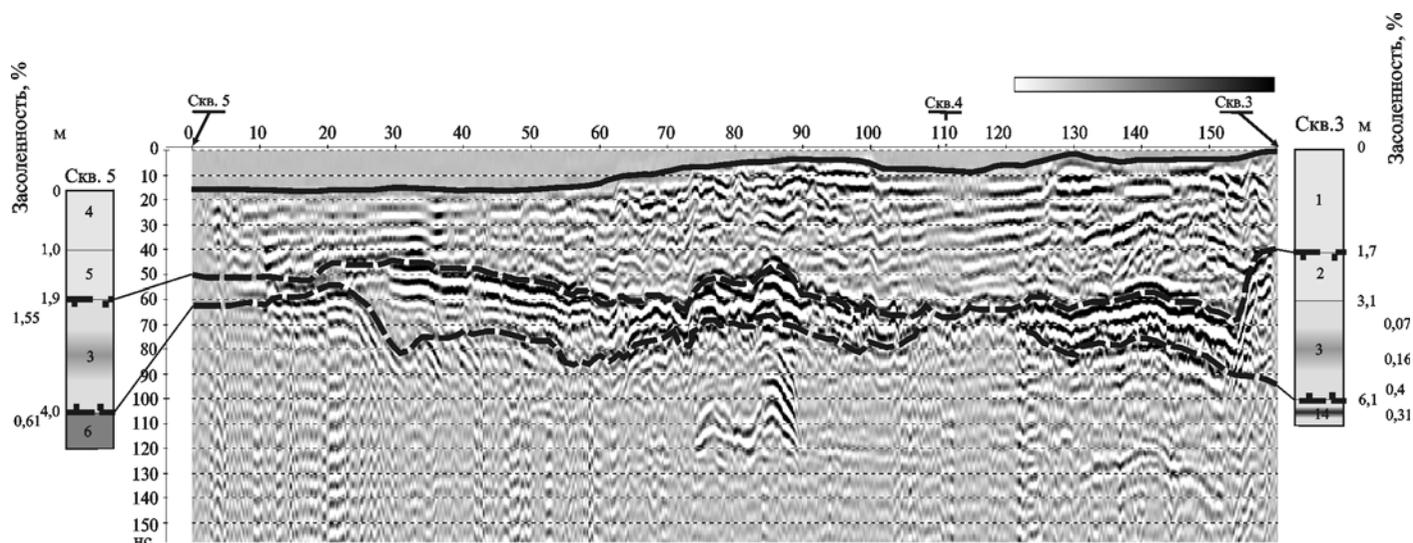


Рис. 4. Временной разрез (георадарограмма) по профилю, пересекающему береговые валы. Использована антенна 300 МГц (объект Варандэй). Профиль расположен на самом большом удалении от берега моря. Черная сплошная линия — дневная поверхность, черные пунктирные линии — кровля и подошва ММП. На разрезах скважин цифрами обозначены: 1 — песок талый; 2 — песок мерзлый (криотекстура массивная); 3 — переслаивание песка и черного ила (грунт мерзлый); 4 — песок талый; 5 — песок с гравием талый; 6 — суглинок тяжелый талый; 14 — переслаивание песка и ила (грунт талый). По данным изучения разреза скважины 4 (пикет 110 м) многолетнемерзлые породы не обнаружены

Для пересчета из временного в глубинный масштаб использовали следующие значения средней скорости распространения электромагнитных волн: 9 см/нс — от поверхности наблюдения до кровли ММП и 15 см/нс — от кровли до подошвы ММП. Эти значения получены при сопоставлении разрезов скважин и георадарограмм [Владов, Старовойтов, 2004]. Скорость распространения электромагнитных волн зависит от влажности и засоленности отложений, в связи с этим по латерали ее значения могут варьировать до 30%, т.е. глубина залегания кровли ММП на данном объекте может меняться в зависимости от степени увлажнения и засоленности до 0,5 м.

Верхняя часть разреза до глубины около 10 м, по данным бурения, сложена песком, илами, внизу — суглинками разной степени засоленности и увлажнения. Измерения степени засоленности грунтов показывают ее постепенное увеличение при приближении к морю. ММП обнаружены повсеместно почти во всех скважинах. Максимальные значения засоленности приурочены к илам и илам с песком в мерзлом состоянии. Для этих участков разреза увеличение засоленности возрастает в 3 раза, достигая максимального значения 1,55‰ [Пособие..., 1986; Руководство..., 1970].

На всех георадарограммах при приближении к морю наблюдается значительное уменьшение контрастности волновой картины на радарограммах. Смещение частотного спектра полезного сигнала в область низких частот свидетельствует об увеличении поглощения электромагнитных волн при приближении к морю, это связано, очевидно, с повышением засоленности приповерхностной части разреза и, в частности, наблюдается по значениям засоленности, измеренным в скважинах.

В качестве примера увеличения поглощения и затухания электромагнитных волн при работах на засоленных грунтах на рис. 3 представлен временной разрез (георадарограмма) по профилю, пересекающему область повышенной засоленности грунтов в верхней части разреза. На георадарограммах не удается выделить какие-либо протяженные оси синфазности отраженных волн.

На рис. 4 приведена георадарограмма по профилю, наиболее удаленному от берега моря. Волновая картина здесь стала более информативной, наблюдаются многочисленные оси синфазности отраженных волн. Кровля и подошва ММП уверенно выделяются на временном разрезе по отражениям с высокой амплитудой.

В процессе бурения инженерных скважин отобрано 47 проб грунтов с целью определения засоленности и химического состава солей по водным вытяжкам грунта. Методика приготовления водной вытяжки описана в [Пособие..., 1986], а ее химического анализа — в [Руководство..., 1970]

Согласно определению засоленности грунтов, процентное содержание соли в грунте возрастает от скважины 3 к скважине 5 почти в 4 раза — с 0,4 до 1,55‰ (средне — и сильнозасоленные грунты). Такое большое изменение засоленности отмечается в изменении волновой картины, что выразилось в уменьшении амплитуды отраженных волн вблизи скважины 5. Важно, что уменьшение амплитуды (начиная с пикета 30 м), а затем и полное исчезновение отражений как от кровли, так и от подошвы ММП вблизи скважины 5 (начиная с пикета 10 м) происходит не постепенно, а в непосредственной близости от скважины (рис. 4). Таким образом, можно предположить достаточно резкое увеличение засоленности в межскважинном пространстве на интервале 0–30 м.

По данным изучения разреза скважины 4 (пикет 110 м) признаки наличия ММП до глубины 9 м не обнаружены. На георадарограммах на пикетах 105–120 м наблюдается уменьшение амплитуды отраженных волн в пределах слоя ММП, но при этом не теряется корреляция кровли слоя ММП. Подобная ситуация может быть связана, например, с растеплением ММП (так называемая вялая мерзлота). В данном случае результаты метода георадиолокации будут, по-видимому, объективнее, так как они дают интегральную характеристику разреза в целом, в отличие от описания разреза скважины, т.е. данных по одной точке. Таким образом, этот пример показывает возможность выделения слоя ММП малой мощности и в растепленном состоянии, что иногда оказывается крайне сложно сделать только при анализе разреза скважин.

Выводы. 1. На всех георадиолокационных профилях на незасоленных грунтах уверенно выделяется кровля ММП по резкому увеличению амплитуды отраженных электромагнитных волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Василенко Е.В., Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я. и др. Радиофизические исследования ледника Альдегонда на Шпицбергене в 1999 году // Мат-лы гляциол. исслед. 1999. Вып. 90. С. 86–99.

Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. С. 92–97, 122–130.

Нерадовский Л.Г. Изучение свойств мерзлых засоленных грунтов и криопэгов методом георадиолокации: Автореф. канд. дис. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2005.

Нерадовский Л.Г. Изучение свойств мерзлых засоленных грунтов методом динамической георадиолокации // Криосфера Земли. 2007. Т. 11, № 2. С. 32–40.

Нерадовский Л.Г. Влияние температуры многолетнемерзлых грунтов на затухание электромагнитной энергии // Геофизика. 2009а. № 2. С. 57–67.

Нерадовский Л.Г. Методическое руководство по изучению многолетнемерзлых пород методом динамической георадиолокации // Избр. тр. российской школы по проблемам науки и технологий. М., 2009б.

Омельяненко А.В. Георадиолокация мерзлых рыхлых отложений: Автореф. канд. дис. М., 1989. 17 с.

Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83). М.: Изд-во НИИОСП, 1986.

2. Глубинность и информативность метода георадиолокации снижаются при переходе от слабозасоленных грунтов к более засоленным.

3. При анализе исходных (необработанных) радарограмм в отдельных случаях можно выделять участки с разной засоленностью по профилю, что выражается в изменении волновой картины на георадарограммах. С увеличением засоленности грунтов на георадарограммах отмечается уменьшение амплитуды отраженных волн. То же самое можно отметить для мерзлых и растепленных участков.

4. Метод георадиолокации позволяет определять ММП в растепленном состоянии, которые не всегда выявляются при изучении разреза скважины.

5. Применение георадара оказывается весьма удачным при изучении бугров пучения, не выраженных в рельефе, и при оконтуривании участков с развитием термокарста. Получаемая информация о внутренней структуре объектов при этом оказывается существенно более полной по сравнению с ландшафтным инженерно-геокриологическим картированием.

Рекомендации по определению физико-механических свойств мерзлых дисперсных грунтов геофизическими методами. М.: ПНИИИС Госстроя СССР, 1989. 55 с.

Руководство по химическому анализу почв / Под ред. Е.В. Аринушкина. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970.

Финкельштейн М.Н., Кутев В.А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. М.: Недра, 1986. 126 с.

Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пушино, 1998. 514 с.

Annan A.P., Davis J.L. Impuls radar sounding in permafrost // Radio Science. 1976. Vol. 11, N 4. P. 383–394.

Arcone S.A., Delaney A.J. Investigations of dielectric properties of some frozen materials using cross-borehole Radiowave pulse transmissions // Cold regions research and engineering laboratory. Hanover, New Hampshire, CRREL Rep. 1989. P. 89–94.

Delaney A.J., Arcone S.A. Laboratory measurements of soil electric properties between 0,1 and 5 GGz // USA CRREL. 1982. Rep. 82–10. P. 8.

Hunter L., Delaney A., Lawson D., Davis J. Dawnhole GPR for high-resolution analysis of material properties near Fairbanks, Alaska. Ground penetrating radar in Sediments // Geol. Soc. London. Spec. Public. 2003. P. 275–285.

Поступила в редакцию
11.05.2010