

УДК [550.8:624.131.3]:[624.046:624.131.21/.29]:625.78

В.В. Набатов, Р.М. Гайсин

**ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ
МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД ВБЛИЗИ
ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ КОЛЛЕКТОРОВ С ЦЕЛЮ
ВЫЯВЛЕНИЯ ОБЛАСТЕЙ РАЗУПЛОТНЕНИЯ**

Описан опыт применения георадиолокации для оценки нарушенности грунтового массива вблизи подземных коммуникаций. Приведены примеры получаемых результатов, приведены аргументы, используемые при интерпретации результатов.

Ключевые слова: прикладная геофизика, георадар, георадиолокация, коллектора, подземные коммуникации, области разуплотнения, устойчивость, грунтовый массив, инверсия полярности при отражении сигналов, помеховые факторы, интерпретация результатов.

В мегаполисах не редки ситуации, под воздействием течи в системе водоснабжения происходит перемещение грунта с образованием полостей или областей с пониженной несущей способностью [1]. Результатом таких ситуаций может быть образование провалов, опасность которых очевидна в любой части территории города. Однако в том случае если описываемый процесс происходит под проезжей частью то возможны серьезные аварийные ситуации.

Существует целый ряд методов позволяющих решать задачу выявления таких областей. В частности это методы, основанные на поиске мест протечек по создаваемым ими акустическим шумам (так называемая акустическая эмиссия) [2], геофизические методы и термографический контроль (съемка геомассива с вертолета с целью выявления мест прорыва теплотрасс — грунт в области прорыва прогревается сильнее и интенсивнее излучает в инфракрасном диапазоне) [3]. Среди описываемых групп методов некоторые из геофизических методов (и в

первую очередь георадиолокация [4; 5]) обладают одним важным достоинством — позволяют снимать большие площади за короткое время. Термографический контроль также обладает этой особенностью, однако он ограничен по спектру задач. Высокая оперативность и низкая трудоемкость полевых работ, высокая разрешенность получаемых глубинных разрезов приводит к тому, что георадиолокация занимает все большее место в геофизическом контроле мегаполисов.

Однако существует и ряд проблем, которые осложняют работу этим методом — на результаты влияет достаточно большое количество помех. Это так называемые «воздушные» помехи (отражения от объектов над поверхностью земли — использование поглощающих материалов решает проблему только отчасти) [4, стр. 28]. Это помехи от приповерхностных объектов (конструктивные элементы дороги, железобетонные плиты, создающие так называемые «звенящие» записи на радарограммах). Это неравномерность распределения свойств грунтов: контрастное изменение свойств грунтов

приводит к возникновению множественных отражений. При этом неравномерность распределения свойств, вообще присущая геологическим объектам, обостряется антропогенным воздействием человека в городе (грунты перемешаются, перекапываются, создаются искусственные грунты, свойства грунтов изменяются в результате изменения гидрогеологической ситуации). В результате воздействия помех радарограммы могут становиться нечитабельными.

Другой проблемой часто становится низкая глубинность (максимальная глубина, с которой еще можно получить результаты) — она падает значительно ниже заявленной производителем ориентировочной оценки максимальной глубины. В большой степени это связано с неравномерностью распределения свойств грунтов.

Энергия зондирующих сигналов теряется при отражениях на границах и сигнал не доходит до необходимой глубины. Нередко приходится сталкиваться с тем, что для георадаров частотного диапазона 150-700 МГц излучение не проникает глубже 2-3 м. Понижение же частоты приводит к ряду проблем: георадары становятся слишком громоздки. Прибор может занимать существенную часть обследуемой площадки, в результате чего становится невозможным снять достаточное количество трасс для построения удобной для чтения радарограммы. Также важно, что если прибор монтируется на автомобильной базе, то существуют определенные ограничения по его размерам и весу. Низкочастотные георадары также трудно экранировать от «воздушных» помех из-за слишком больших размеров требуемого экрана [6, стр. 19-20]. Существенно падает разрешающая способность (в результате становится непо-

нятно что является причиной того или иного артефакта на радарограмме).

Однако все описанные проблемы не делают георадиолокацию неэффективным методом при поиске областей разуплотнения. В некоторых случаях вполне допустима работа с помощью низкочастотных георадаров, в других глубина на которой нужно проверить наличие областей разуплотнения находится в допустимых пределах для возможности использования высокочастотной георадиолокации.

На рис. 1 представлены примеры результатов съемок, полученных с помощью высокочастотной георадиолокации (георадар «ОКО-2», антенный блок АБ1200, средняя частота импульса 1200 МГц). Профиль радарограммы которого представлена на рис. 1 А переходит через колодец канализационной системы, находящийся на отметке профиля 5 м. Участок профиля от 4.5 м до 6 м зашумлен отражениями от конструктивных элементов коллектора (вблизи находится колодец). Левее зашумленной части просматривается граница уходящая резко вниз (так называемая «просадка» оси синфазности) и очерчивающая область, которую можно интерпретировать как область разуплотнения. Подобные картины были получены на нескольких объектах и нередко они привязаны к колодцам.

Причины возникновения подобной связи можно объяснить следующим образом. Зимой из-за морозного пучения грунтов происходит поднятие конструктивных элементов колодца (колец) в результате между ними могут возникать щели. Весной, при оттаивании, грунтовые воды через образовавшиеся щели проникают в колодец и попадают в канализационную систему.

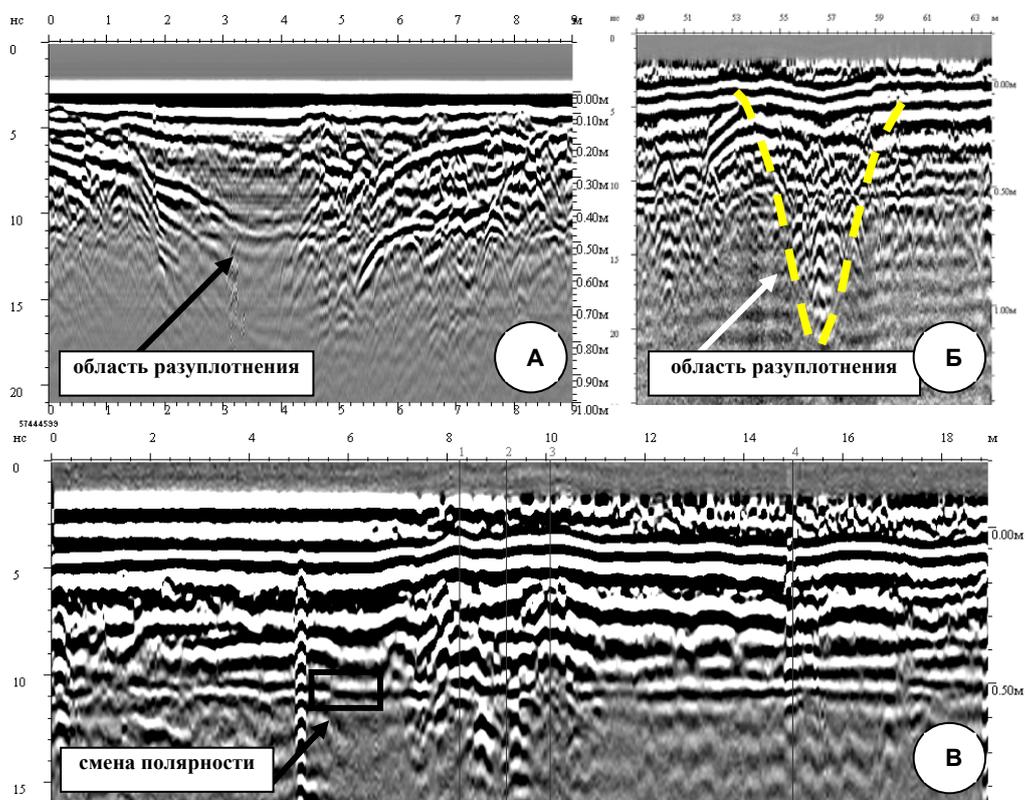


Рис. 1. Выявление областей разуплотнения

При этом происходит вынос в коллектор частиц грунта. В результате рядом с колодцами нередко наблюдаются области разуплотнения.

Пример, как на радарограмме выглядит прилегающей к колодцу геомассив в котором нет области разуплотнения представлен на рис. 1 В. Метки 1, 2 и 3 (расположены между 8-м и 10-м метром профиля) это места расположения трех колодцев (один из них на небольшом удалении от профиля). На этой радарограмме нельзя выявить ярко выраженных «просадок» осей синфазности. Границу на 0.5 м можно было бы интерпретировать как воздушную помеху — она почти не испытывает колебаний по вертикали. Однако при анализе глубинного разре-

за, рассчитанного с учетом скорости волны в воздушной среде, на площадке съемки не удалось выявить объектов, которые могли бы быть источниками «воздушных» помех. Возможно, это выровненная площадка на которую укладывалось дорожное полотно.

Область разуплотнения выделенная на радарограмме рис. 1 Б, выявлена по «просадкам» осей синфазности и хаотическому поведению волновой картины.

В приведенных выше примерах можно предположить, что наблюдаются не области разуплотнения, а границы засыпанного котлована. Здесь аргументом за или против могут быть тип формы полученных областей разуплотнения.

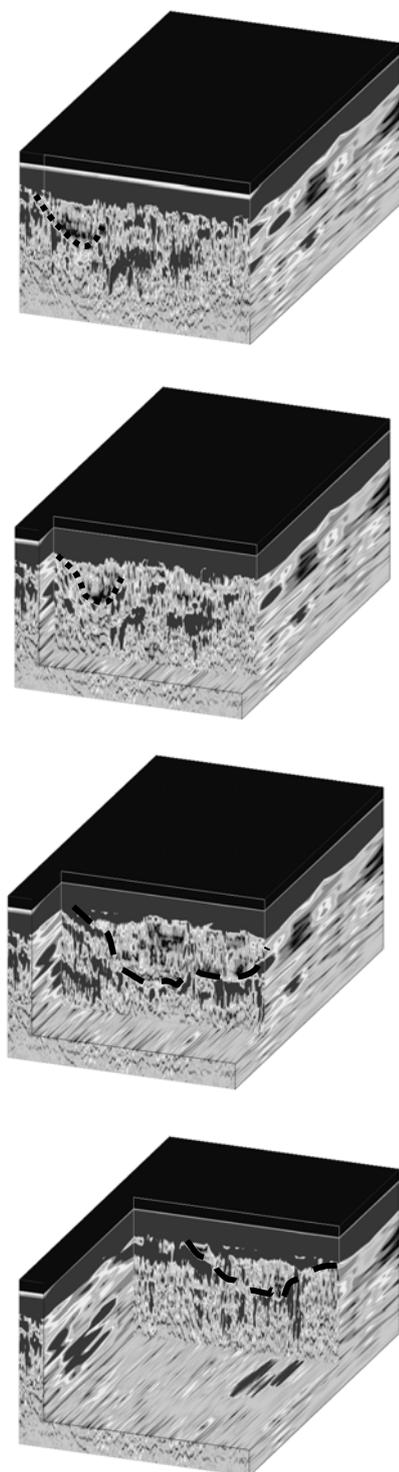


Рис. 2. Срезы куба мгновенных амплитуд. Пунктирными линиями выделены границы

Для этого необходимо провести так называемую площадную съемку: сеть параллельных профилей с привязкой их начал и концов на местности. В программном обеспечении большинства современных георадаров есть функции построения трехмерных волновых полей (2D сетка точек на профилях и еще одна размерность возникает за счет временной протяженности трасс). Применяя преобразование Гильберта к полученному волновому полю, можно получать кубы мгновенных амплитуд, частот и фаз [Ошибка! Закладка не определена.;7, стр. 61]. А далее — анализировать их сечения вертикальными и горизонтальными плоскостями. Разрезы часто помогают оценить форму области (в некоторых случаях особенно удачны сечения именно горизонтальными плоскостями). Пример подобного куба в нескольких разрезах дан на рис. 2. Пунктирными линиями даны границы области разуплотнения — видно, что ее форма характеризуется плавно спускающимися «бортами» и неровной донной поверхностью.

Проиллюстрировать какие формы могут принимать те или иные области разуплотнения можно с помощью рис. 3, на котором приведены примеры границ в виде 3D модели (границы пикированы интерпретатором и построены в Surfer 8.0). Хорошо заметно что форма области рис. 3 Б прямоугольная, борта субвертикальны, дно плоское. Речь, скорее всего, идет о котловане, откопанном после аварии и засыпанного после устранения течи. Рис. 3 А показывает совсем другую поверхность — неровные, плавно спускающиеся ко дну границы. Гори-

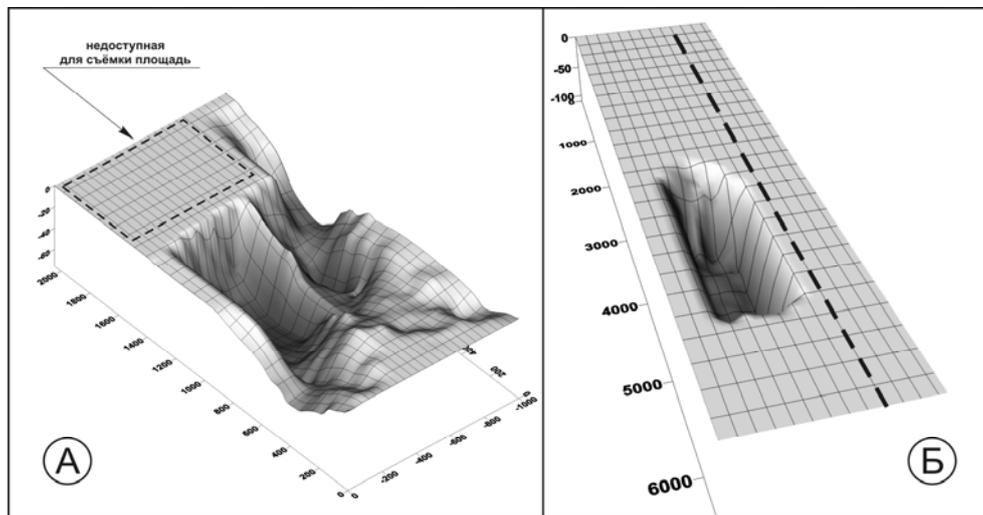


Рис. 3. 3D поверхности построенные по границам в геомассиве

горизонтальная площадка в левом верхнем углу рис. 3 А это поверхность геомассива, недоступная для съемки.

Однако, при обследовании большого объема дорожного полотна площадная съемка не возможна. В этом случае георадары ставят на автомобильную базу [8, 9] и съемка ведется километрами на скоростях несколько десятков км в час [10 стр. 4-5]. В таких условиях сложно привязывать начала профилей. Площадные съемки возможны только для небольших объемов или для доисследования спорных объектов.

Отдельной задачей является принятие решения, есть ли полость выше выявленной границы или весь грунтовый массив заполнен породой, а «просадка» оси синфазности является проявлением засыпанных уже границ (котлован при строительстве объекта, уже отремонтированный участок дороги). Здесь помогает изучение полярности отраженного сигнала. Дело в том, что значение амплитуды волны прошедшей через границу и волны отраженной от границы зависят от коэффициентов отражения $K_{отр}$ и прохождения $K_{пр}$ [11, стр. 21]:

$$K_{отр} = \frac{\sqrt{\varepsilon'_1} - \sqrt{\varepsilon'_2}}{\sqrt{\varepsilon'_1} + \sqrt{\varepsilon'_2}} \text{ и}$$

$$K_{пр} = \frac{2\sqrt{\varepsilon'_2}}{\sqrt{\varepsilon'_1} + \sqrt{\varepsilon'_2}},$$

где ε'_1 – действительная часть диэлектрической проницаемости грунта над отражающей границей, ε'_2 – действительная часть диэлектрической проницаемости грунта под отражающей границей. Здесь важно то, что коэффициент прохождения не может принимать отрицательные значения, зато отрицательные значения может принимать коэффициент отражения. Если говорить конкретно о волновой форме сигнала, то отрицательное значение коэффициента отражения означает, что сигнал инвертируется (меняет свою полярность на обратную, см. рис. 4 А и Б).

Таким образом, если сигнал падает на раздел сред, на котором действительная часть диэлектрической проницаемости меняется с большей на меньшую (например, граница «вода-грунт») при отражении его полярность не меняется [12, стр. 27,46,55-

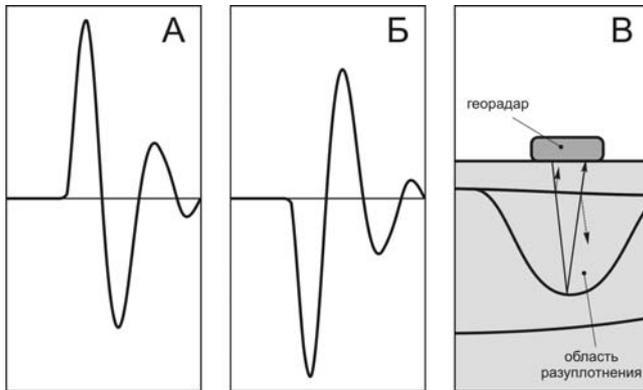


Рис. 4. Изменение полярности зондирующего сигнала при отражении: А — исходная полярность сигнала, Б — инвертированная полярность сигнала, В — ход луча в геомассиве

56; 13]. Однако полярность должна меняться, если сигнал падает на раздел где диэлектрическая проницаемость меняется с меньшей на большую (граница «воздух-грунт»).

Если теперь рассмотреть процесс распространения сигнала в геомассиве складывается следующая картина. Распространяясь до нижней границы области разуплотнения сигнал проходит через несколько границ не инвертируясь (коэффициент прохождения всегда больше единицы). Отражаясь от дна полости, в случае границы «воздух-грунт», сигнал меняет свою полярность (коэффициент отражения меньше единицы). Далее, возвращаясь к поверхности, сигнал проходит несколько границ не меняя полярности (см. рис. 4 В). Образующиеся в этом случае множественные отраженные волны приходят на приемную антенну в другие времена и их легко разделить с волной отразившейся от дна обследуемой области разуплотнения. Существенно исказить описываемую картину могут только кратные волны. Однако они редки в георадиолокации, что связано с небольшими (например, по сравнению с сейсморазведкой) контрастами тех свойств грунтов, которые определяют

особенности процесса отражения волны [14].

На рис. 5 представлен пример результатов интерпретировавшихся с точки зрения контроля инверсии сигнала. На рис. 5 А приведена радарограмма с областью разуплотнения на 4-м — 8-м метрах профиля (на радарограмме представлена только левая часть области разуплотнения). Область просматривается по «просадке» оси синфазности. «Звон» на 8-м метре профиля это крышка люка по которой пройден профиль.

На описываемой радарограмме взяты две трассы (на точках профиля 4.4 м и 6 м), приведенные на рис. 5 Б и В. Сплошные вертикальные линии на радарограмме рис. 5 А указывают с каких точек профиля взяты эти трассы. Горизонтальные линии на радарограмме рис. 5 А соответствуют горизонтальным уровням на рис. 5 Б и В.

Трасса рис. 5 Б иллюстрирует отсутствие инверсии сигнала. Прямая волна (распространяется от испускающей до приемной антенны по воздуху) начинается с отрицательных амплитуд (см. первые периоды трасс рис. 5 Б и В). Эта волна просматривается и на самой радарограмме (рис. 5 А) — первый период прямой волны виден как горизонтальная белая и черная полоса сверху разреза (отрицательные амплитуды, превосходящие некоторый предел, кодируются белым, положительные амплитуды — черным, амплитуды между пределами

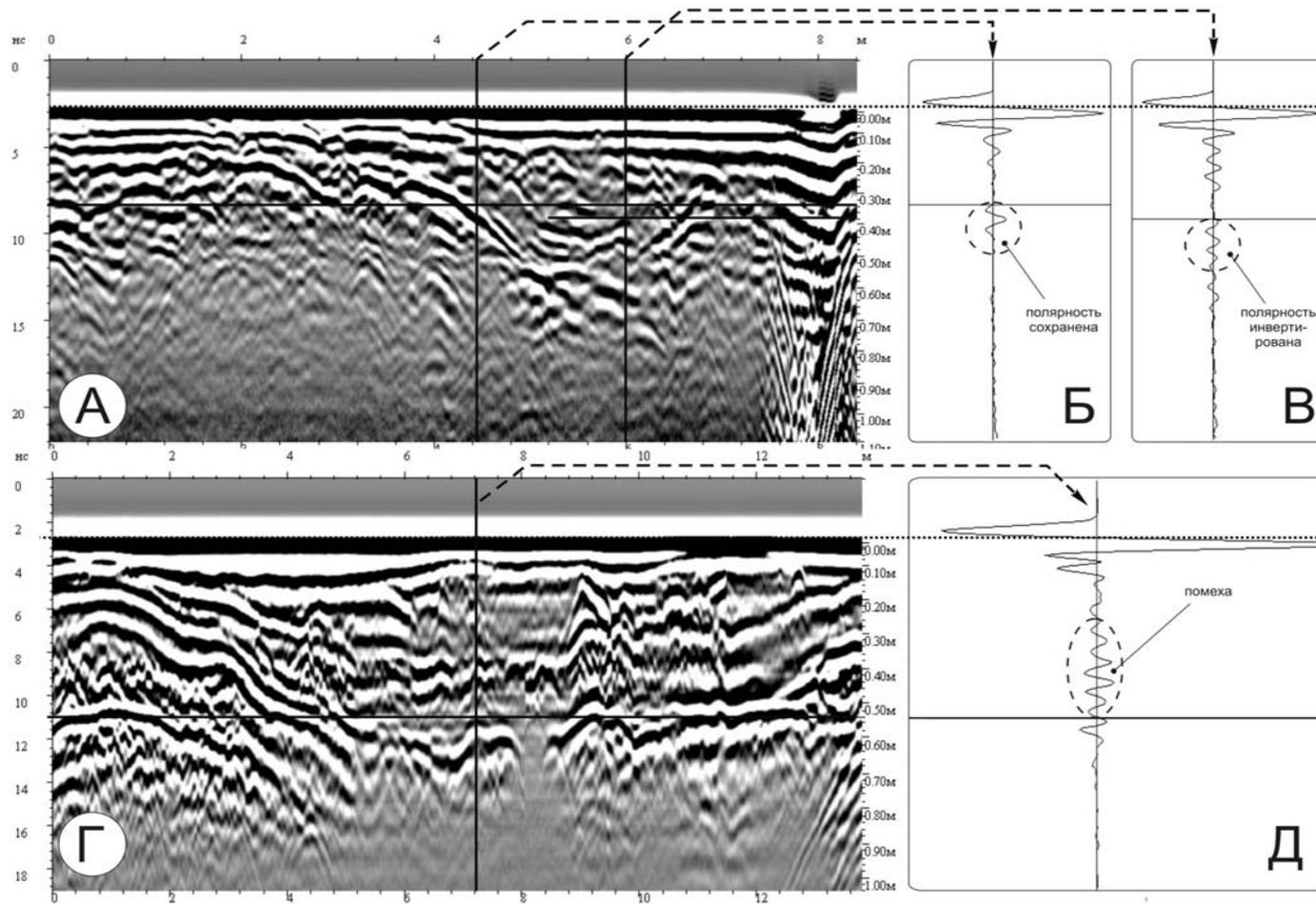


Рис. 5. Примеры изменения полярности сигнала при отражении. Пояснения см. в тексте

кодируются градациями серого). Хорошо видно, что на трассе рис. 5 Б, отраженный от границы в геомассиве волновой пакет имеет ту же полярность: полупериод отрицательных амплитуд, далее полупериод положительных (волновой пакет выделен пунктирным кругом). Если рассмотреть радарограмму, то видно, что отражение от этой границы (первое перекрестие) читается как «белый — черный — белый». Одним словом на трассе с отметкой профиля 4.4 м излучение переходит из среды с высокой диэлектрической проницаемостью в среду с низкой. Т.е. речь не идет о границе «воздух-грунт». Скорее всего, речь не идет и о границе «вода-грунт», поскольку увлажненные области дают ярко выраженные так называемые «звенящие» записи на трассах.

Другая ситуация наблюдается на трассе рис. 5 В. Теперь рассматривая волновой пакет можно заметить что сначала идет полупериод положительных амплитуд, далее полупериод отрицательных. На радарограмме (второе перекрестие) просматривается картина «черное — белое — черное — белое». Это позволяет предположить, что на отметке профиля 6 м (в приближении к колодцу) пустота присутствует. «Звонов» ниже момента отражения не наблюдается, поэтому, скорее всего, полость водой не заполнена. Ярко выраженную картину изменения полярности отраженного сигнала можно заметить на рис. 1 В (участок подписан как «смена полярности»): до определенного метража профиля граница просматривается с одной полярностью, после — с другой.

У приведенной интерпретации, есть ряд проблем. Грунты тоже могут различаться по диэлектрической проницаемости. А значит, опираться приходится не только на изменение

полярности, но и амплитудный уровень отраженного волнового пакета. Другой проблемой является зашумленность отраженных сигналов.

Приведенные выше столь легко просматривающиеся границы встречаются не часто. Гораздо чаще радарограмма представляет собой сильно зашумленный разрез. Пример не слишком обостренной подобной ситуации представлен на рис. 5 Г, вертикальная линия на отметке профиля 7.2 м указывает точку, с которой взята трасса рис. 5 Д. Перекрестие указывает на первое вступление волнового пакета отраженного сигнала. На первый взгляд можно подумать, что волновой пакет имеет структуру «положительная амплитуда — отрицательная амплитуда» (на радарограмме это просматривается как «черный — белый» под перекрестием). Однако хорошо видно, что на более ранних временах трасса зашумлена. Поэтому здесь легко предположить, что первое вступление отраженного волнового пакета было просто подавлено шумом — интерпретатор видит второй полупериод волнового пакета, а поэтому легко предположить и то, что изменения полярности сигнала не происходило. Также, анализируя радарограмму рис. 5 Г можно заметить, что рядом с представленной трассой есть несколько трасс, где видна последовательность «белый — черный». В результате решение о наличии пустоты в этой области принять достаточно сложно.

В целом можно сказать, что анализ полярности отраженных сигналов далеко не всегда дает однозначный ответ о характере выявленной области разуплотнения. Однако этот анализ можно использовать как компонент системы аргументов, которую можно использовать при принятии тех или иных решений в процессе интерпре-

тации результатов. Также нужно сказать, что в некоторых случаях обра-

ботка может исказить полярность сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старовойтов А.В., Владов М.Л., Калашников А.Ю. Применение георадиолокации для выяснения деформаций зданий. Разведка и охрана недр. 2004. — № 12. — С. 34-37.
2. Лапшин Б.М., Овчинников А.Л. Исследование распространения упругих волн в трубах с жидкостью при акустико-эмиссионном обнаружении утечек // Дефектоскопия 1998. №7. — С. 25-32.
3. Пируева Т.Г., Скловский С.А. Дистанционный тепловой мониторинг городских территорий и природных объектов // Разведка и охрана недр. 2006. — №6. — С. 46-52.
4. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных: Учеб. пособие / М.: Издательство МГУ, 2008. — 192 с.
5. Изюмов С.В., Дручинин С.В., Вознесенский А.С. Теория и методы георадиолокации: Учеб. пособие / М.: Горная книга, 2008. - 196 с.
6. Изюмов С.В. Совершенствование опережающего контроля массива горных пород радарными при проходке подземных горных выработок [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.14 : защищена М., 21.11.2002.
7. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. Учебное пособие — М.: Издательство МГУ, 2004. — 153 с.
8. Сайт ООО "Геологоразведка", раздел посвященный георадиолокационным работам на дорогах (http://www.trgeo.ru/Roads_DorComplex_rus.htm). Проверено 4.01.2012.
9. Семейкин Н.П., Помозов В.В., Дудник А.В. Расширение спектра георадарных задач как следствие совершенствования аппаратной базы // Разведка и охрана недр. 2005, №12. С. — 18-21.
10. Кулижников А.М., Шабалева М.А. Георадары в дорожном строительстве / Автомобильные дороги: обзорная информация. 2000, № 2.
11. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Георадиолокационные исследования верхней части разреза. — М.: МГУ, 1999. - 92 с.
12. Изюмов С.В. Совершенствование опережающего контроля массива горных пород радарными при проходке подземных горных выработок: диссертация ... канд. техн. наук : 25.00.14: защищена М., 21.11.2002.
13. Копейкин В.В. Первичная обработка георадарных сигналов: [Электронный документ]. (<http://www.geo-radar.ru/articles/article5.php>). Проверено 10-11-2011.
14. Калинин А.В., Старовойтов А.В., Шалаева Н.В. Высокочастотные волновые методы в современной геофизике. // Разведка и охрана недр. 2002. №1. С. 23-27. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Набатов В.В. — кандидат технических наук, доцент,
Гайсин Р.М. — кандидат технических наук, доцент,
Московский государственный горный университет, ud@msmu.ru.

