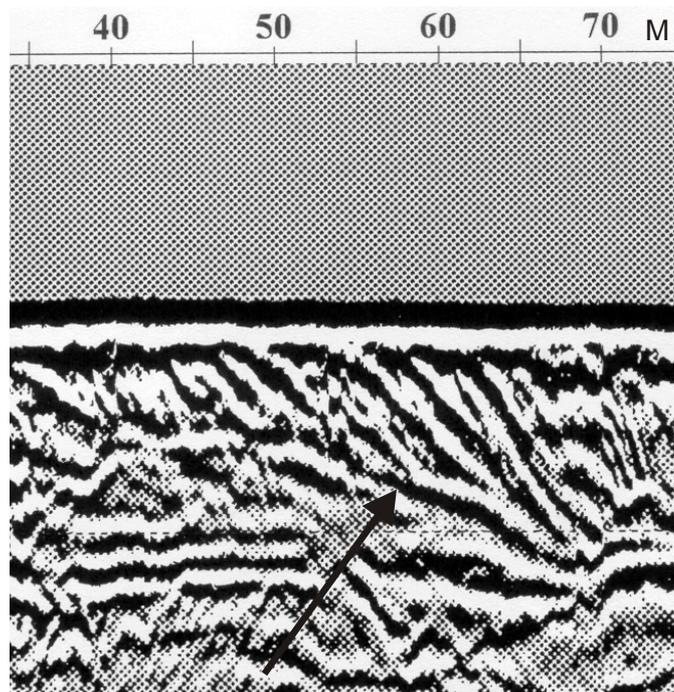


ВЛАДОВ М.Л., СТАРОВОЙТОВ А.В.

ВВЕДЕНИЕ В ГЕОРАДИОЛОКАЦИЮ



**Издательство Московского университета
2004**

УДК 550.837.2:621.396.6

ББК 26.2

В 57

Р е ц е н з е н т

доктор геол.- мин. наук, профессор В.К. Хмелевской

Владов М.Л., Старовойтов А.В.
В 57 Введение в георадиолокацию.
Учебное пособие – М.: Издательство МГУ, 2004. – 153 с.

ISBN 5-211-04938-1

В пособии отражены физические основы метода георадиолокационного профилирования, аппаратура и методика проведения работ, рассмотрены основные принципы обработки и интерпретации получаемых данных. Дается ряд примеров решения инженерно-геологических и геотехнических задач.

Для студентов-геофизиков, аспирантов и специалистов, занимающихся изучением геологического строения верхней части разреза и решением разнообразных геотехнических задач.

УДК 550.837.2:621.396.6

ББК 26.2

ISBN 5-211-04938-1

© Владов М.Л., Старовойтов А.В., 2004

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Часть 1. Физические основы метода георадиолокации, аппаратура, методика и обработка данных	7
Глава 1. Физические основы метода георадиолокации	7
1.1. Георадиолокация и сейсморазведка – волновые методы геофизики.....	7
1.2. Электрофизические свойства горных пород.....	13
1.3. Отражение, преломление, дифракция и затухание электромагнитных волн в реальных средах.....	20
1.4. Сверточная модель трассы, понятие частотной характеристики среды и частотного спектра сигналов.....	22
Глава 2. Круг задач, решаемых с помощью георадара	25
2.1. Геологические, инженерно-геологические и гидрогеологические задачи.....	25
2.2. Поиск локальных объектов, обследование инженерных сооружений, нарушение штатной ситуации.....	25
Глава 3. Аппаратура для георадиолокационных исследований	26
Глава 4. Методика работ	34
4.1. Глубинность георадарных исследований.....	34
4.2. Разрешающая способность и детальность георадарных исследований.....	41
4.3. Наблюдения на постоянной и переменной базах.....	42
4.4. Проектирование методики наблюдений.....	43
4.5. Волновая картина и способы ее изображения, оси синфазности, годографы.....	45
4.6. Математическое моделирование радарограмм.....	49
Глава 5. Обработка данных	52
5.1. Ввод-вывод данных. Формат записи.....	52
5.2. Просмотр и редактирование данных.....	53
5.3. Коррекция амплитуд.....	54
5.4. Линейная обработка сигналов (фильтрация).....	55
5.5. Повышение разрешающей способности (деконволюция).....	56
5.6. Восстановление местоположения и формы локальных объектов (миграция).....	58
5.7. Определение скорости распространения волн.....	60
5.8. Ввод статических поправок.....	60
5.9. Преобразование Гильберта (оггибающая, фаза, частота).....	61
5.10. Пикирование границ и объектов.....	63
5.11. Печать радарограмм.....	63
5.12. Примерные последовательности обработки при решении некоторых задач.....	64

5.13. Определение поглощающих свойств разреза по георадиолокационным данным.....	66
Часть 2. Методика интерпретации георадиолокационных данных.	68
Глава 6. Выделение волн – помех.....	70
Глава 7. Выделение георадарных комплексов.....	77
Глава 8. Выделение георадарных фаций.....	84
Глава 9. Геологическая привязка георадарных комплексов и фаций.....	92
9.1. Определение скоростей распространения электромагнитных волн.	92
9.2. Геологическая привязка георадиолокационных данных.....	97
Часть 3. Примеры использования георадиолокационных данных при решении различных задач.....	99
Глава 10. Поиск объектов искусственного и естественного происхождения.....	100
Глава 11. Гидрогеологические исследования.....	106
Глава 12. Геологические исследования.....	113
Глава 13. Исследования в районах развития многолетнемерзлых пород (ММП).....	122
Глава 14. Исследования на пресноводных акваториях.....	130
Глава 15. Использование георадара в строительстве.....	140
Заключение.....	150
Список литературы.....	151

ВВЕДЕНИЕ

Это учебное пособие представляет собой переработанное и значительно дополненное издание пособия по курсу георадиолокационных исследований приповерхностной части разреза, изданного впервые в 1999 году.

С той поры значительно расширился мировой и отечественный опыт применения георадиолокации для решения разнообразных задач в приповерхностной части разреза, в том числе и опыт авторов данного пособия.

Появились отечественные серийно выпускаемые приборы для георадиолокации, значительно расширился круг организаций, активно применяющий этот метод для решения своих конкретных задач. В то же время стали понятны некоторые принципиальные аспекты теории и практики георадиолокации и накопились факты, требующие своего объяснения.

Данное пособие по своему строению и основному содержанию близко к предыдущим изданиям, но изложение материала, по мнению авторов, приближено к современности. Некоторые разделы дополнены, например, описание физических основ, некоторые являются новыми, например, раздел, посвященный математическому моделированию волнового поля.

Георадиолокационный метод изучения геологической среды для нашей страны является технологически новым методом. Несмотря на давние теоретические разработки, реализация перспективных научных идей оказалась возможной только на современном уровне развития технологической основы создания аппаратуры и компьютерной базы для создания систем сбора и обработки информации.

В связи с относительной новизной метода, объем отечественной литературы по этому вопросу по-прежнему весьма невелик. В учебных заведениях геологической направленности отсутствуют специализированные курсы по теории, аппаратуре, методике работ, обработке данных георадиолокации и геологической интерпретации результатов. В то же время, потребность в георадиолокационных исследованиях возрастает с ростом объемов строительства и расширением круга геоэкологических задач. Очевидно, что с той же скоростью возрастает потребность в специалистах, способных проводить исследования и доводить решение поставленной задачи до конечного результата. Как и при использовании любого другого геофизического метода, георадиолокационные исследования должен проводить специалист с довольно широким кругозором. Как и во всяком геофизическом методе, внутри возникнет более узкая специализация – например, специалист по аппаратурно-методической базе, специалист по обработке полевых данных, интерпретатор. В любом случае каждый из этих узких специалистов должен быть хорошо знаком с методом в целом.

Это пособие предназначено для ознакомления с методом георадиолокационных подповерхностных исследований при решении широкого круга инженерно-геологических, гидрогеологических, строительных, геоэкологиче-

ских и других задач, связанных с изучением строения приповерхностной части геологической среды до глубин порядка 10 - 15 метров. С помощью этого руководства можно научиться работать с современными приборами-георадарами, разрабатывать методики полевых исследований, проводить обработку полевого материала и его интерпретацию. Тем не менее, данное руководство не является единственно необходимым для пользователя, ранее незнакомого с описываемым методом. Необходимыми материалами для пользователя являются руководство по работе с конкретным георадаром и руководство по работе с конкретной системой обработки данных.

В данном пособии не рассматривается ряд важных, но не являющихся необходимыми при конкретной работе вопросов по аппаратуре и редко применяемым трудоемким методикам наблюдений и обработки. При необходимости, пользователь может найти требуемую информацию в работах из приводимого списка литературы.

Руководство рассчитано на студентов старших курсов и магистрантов различных геофизических специализаций, знакомых с теорией распространения волн, основами геологии и геофизических методов изучения разреза, цифровой обработки сигналов и геологической интерпретации геофизических данных. Надеемся, что оно также будет полезным для всех пользователей георадаров.

Вторая часть посвящена методике интерпретации георадиолокационных данных.

В третьей части пособия приведены примеры решения ряда конкретных задач с помощью георадиолокации. Читатель может ознакомиться с реальными полевыми материалами, полученными в разнообразных ситуациях. Некоторые особенности записи объектов в поле высокочастотных электромагнитных волн даны без объяснения их причин, например, при определении длины сваи. Отсутствие объяснений в этих случаях связано с тем, что теоретические основы собственно подповерхностной георадиолокации разработаны недостаточно глубоко, многие явления непонятны, что оставляет широкое поле деятельности для самостоятельной научной работы.

Ссылки на основные литературные источники приводятся, в основном, в начале каждого раздела.

В получении и обработке практически всех георадиолокационных материалов, использованных в данном пособии, принимали участие, кроме авторов, ряд сотрудников кафедры сейсмометрии и геоакустики – Калашников А.Ю., Шалаева Н.В., Капустин В.В. Всем им авторы искренне признательны. При исследованиях использовался георадар «Зонд 12с» производства «Radar Systems, Inc» (г.Рига, Латвия). Обработка материалов производилась с помощью системы «RadExPro» («Деко-геофизика»).

Авторы будут благодарны за любые замечания, пожелания и критику данного пособия, направленные по адресу 119899, Москва, Воробьевы Горы, МГУ, Геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, тел./факс 939-43-70, E-mail - vladov@seismic.geol.msu.ru.

Часть 1. Физические основы метода георадиолокации, аппаратура, методика и обработка данных

Глава 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

[1 - 4, 6, 7, 9, 14 - 17, 21, 26, 32].

Интерес к использованию подповерхностного радиолокационного зондирования (Ground Penetrating Radar, в дальнейшем GPR), судя по кругу работ, за последние 20 лет не являлся стабильным. Выйдя из стадии лабораторных разработок, GPR в семидесятые годы привлек к себе внимание, которое потом ослабло примерно на 10 лет. Затем, в середине 80-х годов в связи с бурным развитием электроники, вычислительной микропроцессорной техники и одновременным ростом потребностей в инженерной разведке, интерес к GPR снова возрастает, но, натолкнувшись на еще не совершенную обработку, снова гаснет. За последние три года интерес к использованию GPR находится в стадии постоянного бурного роста. Если раньше радару были посвящены отдельные редкие публикации в научных журналах, то теперь целые разделы международных конференций геофизических и инженерно-геофизических обществ типа SEG, EEAG, EEPG, EEGS и других организаций посвящены радарным исследованиям верхней части разреза. Практически ежегодно проходят международные конференции, посвященные только GPR. Бурно развивается аппаратная база. Кроме георадаров широкого спектра использования, выпускается и специализированная аппаратура для узких целей - работы в скважинах, шахтах, для дефектоскопии конструкций и т.д.

Принцип действия аппаратуры подповерхностного радиолокационного зондирования (в общепринятой терминологии - георадара) основан на излучении сверхширокополосных (наносекундных) импульсов метрового и дециметрового диапазона электромагнитных волн и приеме сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства. Такими границами раздела в исследуемых средах являются, например, контакт между сухими и влагонасыщенными грунтами - уровень грунтовых вод, контакты между породами различного литологического состава, между породой и материалом искусственного сооружения, между мерзлыми и тальми грунтами, между коренными и осадочными породами и т.д.

1.1. Георадиолокация и сейсморазведка – волновые методы геофизики. [6]

К собственно волновым методам в современной геофизике относятся сейсморазведка и подповерхностная георадиолокация. В подповерхностной георадиолокации распространение электромагнитных волн метрового и дециметрового диапазона в геологической среде-диэлектрике описывается

уравнениями Максвелла. Распространение упругих (сейсмических) волн в геологической среде – неидеально упругом теле описывается уравнениями теории упругости (уравнениями движения). В то же время, оба эти метода от других геофизических методов отличаются структурой получаемых данных.

Единство структуры данных в волновых методах.

На входе среды генерируется либо электромагнитный, либо упругий импульс $f_0(t)$, а на выходе среды приемной антенной или сейсмоприемником воспринимается отклик среды – совокупность волн, отличающихся друг от друга временами пробега, интенсивностью и формой. В кинематических и динамических характеристиках этих волн и содержится информация о среде. Для георадиолокации это двойные времена пробега электромагнитных волн до границы раздела сред с различной диэлектрической проницаемостью, информация о потерях, связанных с токами проводимости, информация о дисперсии фазовых скоростей в среде. Для сейсморазведки это двойные времена пробега упругих волн до границ раздела сред с различной акустической жесткостью, информация о поглощении энергии за счет неидеальной упругости, информация о дисперсии скоростей упругих волн.

В то же время, кинематика и динамика волнового поля и для электромагнитных волн и для упругих волн описывается одним и тем же волновым уравнением. С большой степенью достоверности в обоих случаях применим лучевой метод и основные законы геометрической оптики.

Единство кинематических моделей среды.

При проектировании методик наблюдения и интерпретации результатов наблюдений применяются одни и те же кинематические модели среды:

- однородно-слоистая среда;
- непрерывная среда;
- однородная среда с локальными неоднородностями и их комбинации.

Отсюда следует, что изображения границ раздела и дифрагирующих объектов в полях электромагнитных волн и упругих волн при одинаковых методиках наблюдения идентичны и временные разрезы (полевые записи) без знания масштаба по оси времен визуально не отличимы.

На рисунке 1.1А представлен результат сейсмических наблюдений над слоистой средой, а на рисунке 1.1Б - результат георадиолокационных наблюдений. И в том и в другом случае видны оси синфазности отраженных волн. Принципиальное отличие этих временных разрезов состоит в том, что на первом по оси ординат отложены миллисекунды, а во втором - наносекунды.

Решение прямых задач.

Прямые задачи в обоих методах решаются с использованием одного и того же математического аппарата. Вычисляется сверточная модель трассы $f(t)$ – результата единичного акта “посылка-прием”.

$f(t) = f_0(t) \otimes g(t)$, где $f_0(t)$ – зондирующий сигнал, а $g(t)$ – импульсная характеристика среды. Или в спектральной области:

$S(j\omega) = S_0(j\omega) * K(j\omega)$, где $S(j\omega)$ - спектр трассы, $S_0(j\omega)$ – спектр зондирующего сигнала, а $K(j\omega)$ – частотная характеристика среды. При этом, $g(t)$ или $K(j\omega)$ рассчитываются по заданной модели среды.

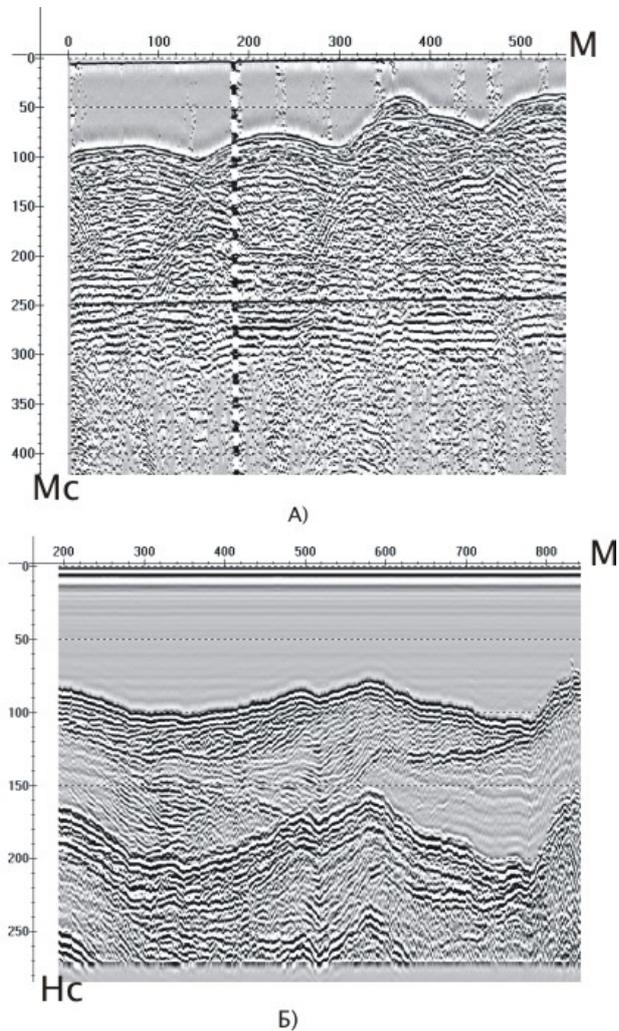


Рис. 1.1 Типичные примеры полевых данных при работе на акваториях:

- А) – методом непрерывного сейсмоакустического профилирования;
- Б) – методом георадиолокации.

Обработка полевых данных и интерпретация результатов.

Использование единого математического аппарата для описания этих двух типов физических полей определяет единый подход и к обработке полевых данных в волновых методах. Набор процедур для преобразования записей с целью выделения полезного сигнала – отраженных и дифрагированных волн на фоне помех един для обоих методов. В общем случае это полосовая фильтрация, деконволюция и преобразования Гильберта для обработки единичных трасс, и двумерные и трехмерные преобразования временного разреза – фильтрация, миграция и суммирование по методу общей глубинной точки. Набор и последовательность процедур в потоке обработки для георадио-

локации и сейсморазведки будут различаться в соответствии со специфичными для каждого из полей видами регулярных помех и случайных шумов.

Единство подходов к решению прямых и обратных задач, идентичность форм отображений отражающих границ и дифрагирующих объектов на временных разрезах обусловило то, что хорошо развитый в сейсморазведке сеймостратиграфический подход к интерпретации результатов обработки полевых данных успешно применяется и в георадиолокации.

Таким образом, несмотря на то, что метод подповерхностного георадиолокационного зондирования является технологически новым, при проектировании методики работ, обработке и интерпретации результатов используются подходы, приемы и программные средства современной сейсморазведки.

Различия в физической природе полей и различия в разведочных возможностях волновых методов.

В то же время, различия в физической природе полей в георадиолокации и в сейсморазведке определяют различия в разведочных возможностях этих двух методов.

Длины волн и затухание, глубинность и разрешающая способность.

В малоглубинной сейсморазведке преобладающие длины волн лежат в пределах от первых метров до первых десятков метров.

Затухание определяется в основном вязкоупругим поглощением и расхождением сферического фронта волны и, например, для песчано-глинистого разреза доходит до 0.5 Дб/м.

Глубинность высокоразрешающих сейсмических исследований с использованием маломощных источников колебаний, в основном молота весом 6 кг, при решении задач малоглубинной геологии и геотехники лежит в пределах от нескольких метров (в меру преобладающих длин волн) до 50-100 метров в зависимости от задачи и свойств разреза. При этом разрешающая способность не хуже половины длины волны, то есть лежит в пределах от 1 метра до 10 метров.

В георадиолокации, в ее основном диапазоне частот от 50 до 3000 МГц, длины волн в геологической среде лежат в пределах от первых сантиметров до 2 метров.

Затухание определяется в основном потерями за счет токов проводимости и расхождением сферического фронта волны и, например, для песчано-глинистого разреза с удельным электрическим сопротивлением не ниже 100 ом.м может доходить до 15 Дб/м.

Глубинность исследований на самых низких частотах не превышает 10-15 метров в средних геологических условиях типа московского разреза. При этом разрешающая способность не хуже половины длины волны, то есть лежит в пределах от 1 сантиметра до 1 метра.

Таким образом, по параметру глубинности методы перекрываются в области примерно 3-15 метров, а по разрешающей способности георадиолокация стоит значительно выше. С ее помощью можно решать многие задачи,

например, локализации мелких и замкнутых неоднородностей, недоступные сейсморазведке.

Скорости распространения волн.

Основным параметром среды, определяющим кинематику полей в волновых методах, является скорость распространения волн.

В георадиолокации при допущении о малости потерь в среде скорость распространения электромагнитных импульсов V напрямую связана с действительной частью относительной комплексной диэлектрической проницаемости среды:

$$V = c/\sqrt{\varepsilon},$$

где c - скорость света в вакууме, ε - действительная часть относительной комплексной диэлектрической проницаемости среды.

Контраст ε в слоях определяет отражательную способность границ и вместе с линейными размерами поверхности локальных объектов, отнесенными к длине волны, определяет способность объектов к образованию дифрагированных волн.

В сейсморазведке скорость распространения волн определяется упругими модулями среды, а отражательная способности границ определяются контрастом акустической жесткости – произведения значения скорости на значение плотности среды. Контраст акустической жесткости и линейные размеры поверхности локального объекта, отнесенные к длине волны, определяют его способность к образованию дифрагированных волн.

Причины наличия в среде контрастов акустической жесткости и диэлектрической проницаемости.

В большинстве ситуаций причины, вызывающие контраст диэлектрической проницаемости, вызывают и контраст акустической жесткости. Так в приповерхностной части разреза эффективная диэлектрическая проницаемость трехкомпонентной среды (воздух, вода, минеральные зерна) определяется пропорцией этих компонент, для которых диэлектрическая проницаемость равна соответственно 1, 81 и 6-9. В свою очередь, пропорцией этих компонент определяется и акустическая жесткость приповерхностной части разреза. Значения скорости распространения упругих волн и плотности для воздуха 330 м/с и 0,0000001 г/см³, для воды 1500 м/с и 1г/см³, а для твердой компоненты лежат в широких пределах 3000-7000 м/с и 2,6-3,8 г/см³ соответственно.

Таким образом, для обоих методов значения их основных параметров в среде определяются в большинстве случаев одними и теми же причинами – структурой, текстурой пород, их обводненностью, которые, в свою очередь, связаны с литологией, степенью нарушенности, пористостью (пустотностью) и другими причинами, имеющими природное или техногенное происхождение.

Степень контрастности среды для каждого из методов.

Степень контрастности среды для георадиолокации и сейсморазведки весьма различна. Эффективные значения диэлектрической проницаемости лежат в пределах 4-25 для широкого набора ситуаций в приповерхностной части разреза, включая водонасыщенность пород. Соответственно, значения скоростей распространения электромагнитных волн лежат в пределах 5 – 15см/нс, то есть могут меняться не более, чем в три раза.

Иначе выглядит тот же разрез для сейсмических волн. Здесь значения скоростей могут варьировать в пределах 10 и более раз. Необходимо отметить, что поверхность земли для поля упругих волн является свободной поверхностью, а для поля электромагнитных волн – лишь одной из границ. Таким образом, для электромагнитных волн приповерхностный разрез является слабоконтрастным, а для упругих волн – весьма контрастным. При этом, для упругих волн естественным является большее или меньшее нарастание скорости с глубиной (переход от более рыхлых отложений к более консолидированным и обводненным), а для электромагнитных волн это необязательно, а скорее наоборот – уменьшение скорости с ростом водонасыщения с глубиной.

Различия в степени контрастности среды и различия в степени затухания упругих и электромагнитных волн определяют различия в структуре волновых полей и, как следствие, методические возможности каждого из методов.

В наземной сейсмике с поверхностным источником колебаний:

- до 80% энергии принадлежит поверхностным волнам, которые чаще рассматриваются как помеха, но могут быть и весьма ценным информационным сигналом;
- используются наблюдения с переменным расстоянием «источник-приемник» - наблюдения на рефрагированных, преломленных и отраженных волнах;
- используются наблюдения на фиксированном расстоянии «источник-приемник» - наблюдения методами отраженных волн « t_0 » и «optimum offset» интенсивное поле регулярных помех могут создавать многократные отражения в контрастной по свойствам слоистой среде.

В георадиолокации:

- в силу отсутствия свободной поверхности поверхностные волны отсутствуют;
- из-за слабой контрастности разреза, отсутствия регулярного нарастания скорости с глубиной и высокой степени затухания не применяются, как правило, наблюдения с переменным расстоянием «источник-приемник» - наблюдения на рефрагированных, преломленных и отраженных волнах;
- в подавляющем большинстве случаев используются наблюдения на фиксированном расстоянии «источник-приемник» -наблюдения методом отраженных волн « t_0 »;

- из-за слабой контрастности разреза поле многократных отражений, как правило, имеет весьма малую интенсивность и не мешает прослеживанию целевых отражений.

Необходимо отметить, что в силу различия природы физических полей, существенно различается чувствительность волновых методов к одним и тем же изменениям свойств среды.

Одним из ярких примеров, иллюстрирующих этот факт является то, что при изменении влажности в песках на 10-15% кинематика и динамика электромагнитных волн изменится весьма значительно за счет изменения условий поляризации, проводимости и диэлектрической проницаемости. В то же время, такое изменение влажности не приведет к существенным изменениям упругих характеристик среды и не вызовет заметных изменений в кинематике и динамике сейсмических волн.

Другим примером различий в чувствительностях волновых методов может служить ситуация с углеводородным загрязнением. Диэлектрическая проницаемость нефтепродуктов по мере повышения степени переработки стремится к 2. При этом по акустической жесткости углеводороды близки к воде. То есть, с помощью георадиолокации можно отличить влагонасыщенную породу от загрязненной углеводородами, а с помощью сейсморазведки нет.

1.2. Электрофизические свойства горных пород

Наиболее важными параметрами, характеризующими возможности применения метода георадиолокации в различных средах, являются удельное затухание и скорость распространения электромагнитных волн в среде, которые определяются ее электрическими свойствами. Первый из них определяет глубинность зондирования используемого георадара, знание второго параметра необходимо для пересчета временной задержки отраженного импульса в глубину до отражающей границы.

Практически все вещества, кроме чистого металла, могут быть отнесены к классу диэлектриков с конечной проводимостью. В связи с этим вводится комплексная относительная (относительно вакуума, где диэлектрическая проницаемость равна ϵ_0) диэлектрическая проницаемость:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'',$$

где ϵ - комплексная относительная проницаемость, ϵ' - действительная часть, связанная с поляризацией диэлектрика под действием приложенного поля, а ϵ'' - мнимая часть, связанная с конечной проводимостью диэлектрика (в Ом/м):

$$\sigma = \omega\epsilon''\epsilon_0,$$

где ω - частота приложенного электромагнитного поля.

Диэлектрические потери характеризуются тангенсом угла - отношением мнимой и действительной частей относительной диэлектрической проницаемости:

$$\operatorname{tg} \delta = \epsilon'' / \epsilon' = \sigma / \omega\epsilon'\epsilon_0.$$

Большое значение для радарных исследований в широком диапазоне частот имеет дисперсия диэлектрической проницаемости, то есть ее зависимость от частоты приложенного электромагнитного поля. Это весьма сложная зависимость, если учесть различные способы поляризации компонент, которые составляют агрегат породы. Для практического использования эта зависимость определяется экспериментально. К сожалению, в настоящее время таких определений очень немного и в основном для минералов или мономинеральных пород (например, льда).

Скорость распространения электромагнитной волны в диэлектрике зависит от его диэлектрической и магнитной проницаемостей, однако, для большинства горных пород значение магнитной проницаемости близко к 1 и не зависит от частоты поля. С учетом этого, фазовая скорость распространения волны будет:

$$V = c / \operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon} = c / \sqrt{\varepsilon'}$$

где c - скорость распространения электромагнитных волн в вакууме. Это одно из наиболее важных для радарных исследований соотношение, поскольку V - измеряемая величина, а ε' - свойство вещества.

При этом коэффициент затухания будет

$$\alpha = (\omega / c) \operatorname{Im} \sqrt{\varepsilon};$$

длина волны в среде будет равна

$$\lambda = c / \omega \sqrt{\varepsilon'};$$

отсюда удельное затухание, то есть затухание волны на единицу длины пути в децибелах на метр (дБ/м) будет

$$\tilde{A} = (54.6 / \lambda) \sqrt{\varepsilon}.$$

Для практического использования эту формулу с погрешностью менее 1% разбивают на две - для случаев с малыми диэлектрическими потерями $\operatorname{tg} \delta < 0.3$ и с большими диэлектрическими потерями. В первом случае

$$\tilde{A} = (27.3 / \lambda) \sqrt{\varepsilon' \operatorname{tg} \delta}, \text{ а во втором случае } \tilde{A} = (38.6 / \lambda) \sqrt{\varepsilon' \operatorname{tg} \delta}.$$

В практически наиболее важном случае малых потерь после соответствующих преобразований формула для оценки удельного затухания электромагнитной волны в среде может быть записана в виде:

$$\tilde{A} = 1637 / (\rho_{\omega} \sqrt{\varepsilon'}),$$

где ρ_{ω} - удельное сопротивление в Ом·м на центральной частоте спектра зондирующего импульса.

При распространении в поглощающей среде гармонические составляющие зондирующего сигнала распространяются с различными фазовыми скоростями. При этом, скорость распространения собственно импульса – групповая скорость волны определяется уравнением Релея:

$$1/V_g = 1/V_{\phi} + (f/c) \operatorname{dn}/df,$$

где n – комплексный коэффициент преломления. В слабо поглощающих средах различия между фазовой и групповой скоростями будут невелики. Так, например, для материкового льда в диапазоне частот 10-100 МГц V_g превышает минимальную фазовую скорость V_{ϕ} примерно на 2 %. Тогда как для

сильно поглощающей среды – морского соленого льда - эти различия составят 10 – 15%.

Этот важный момент необходимо еще раз подчеркнуть. В результате ряда предположений, сделанных ранее, о малости потерь и, соответственно, слабом поглощении, время пробега волны через слой мощностью h определяется не как $2h/V_{\text{ф}}$, а как $2h/V$, где V – скорость пробега зондирующего сигнала в слое. При этом, определяемая из наблюдений величина ϵ' является величиной эффективной для данного слоя - $\epsilon'_{\text{эф}}$.

На самом деле, зависимость комплексной диэлектрической проницаемости от частоты даже для однородного диэлектрика в большой степени определяется временем поляризации τ . Поляризация диэлектриков делится на упругую и релаксационную. Упругая поляризация заключается в смещении упруго связанных зарядов под действием приложенного электромагнитного поля. Время установления такой поляризации лежит в пределах 10^{-12} - 10^{-15} секунды в зависимости от того, что меняет свое положение- электроны, атомы или полярные молекулы.

Релаксационная (тепловая) поляризация характерна для диэлектриков, содержащих слабо связанные частицы, способные менять положение равновесия при тепловом движении. Под действием приложенного напряжения в тепловом движении появляется упорядоченность. Время установления такой поляризации лежит в пределах 10^{-2} - 10^{-11} секунды. Так, например, для воды время поляризации составляет 10^{-11} секунды и ее диэлектрическая проницаемость не меняется до частот порядка 10^{10} герц. Для льда $\tau \approx 10^{-5}$ с и для частот выше 10^8 Гц диэлектрическая проницаемость практически не зависит от частоты.

Таким образом, поведение вещества под действием приложенного переменного электромагнитного поля, скорость его реакции на приложенное поле и, соответственно, необходимый для завершения этой реакции (поворот атомов, ориентировка молекул, упорядочение движения частиц и т. д.) отрезок времени τ определяют зависимость диэлектрической проницаемости от частоты. При этом, особое значение имеют частоты, когда $\omega_{\text{кр.}} = 2\pi f_{\text{кр.}} \approx 1/\tau$. Поведение кривой $\epsilon(\omega)$ в этой области существенно меняется. До $\omega_{\text{кр.}}$ среда успевает реагировать на приложенное поле и значения диэлектрической проницаемости относительно высоки, а для частот выше $\omega_{\text{кр.}}$ диэлектрическая проницаемость резко уменьшается – среда не успевает реагировать на приложенное электромагнитное поле.

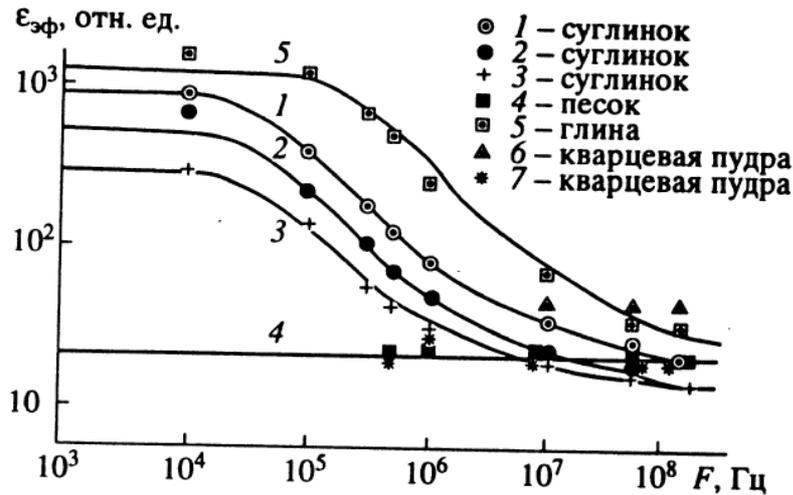


Рис.1.2 Зависимость диэлектрической проницаемости разных пород от частоты [14] .

На рисунке 1.2 показаны несколько экспериментальных зависимостей, где для волн метрового диапазона – $f \approx 10^8$ Гц и более значения диэлектрической проницаемости уже практически не меняются.

Для агрегатов из нескольких веществ, например, минеральных зерен, воды и воздуха, каждое из которых имеет свое время поляризации, можно говорить лишь о некотором эффективном значении τ и ϵ .

Обобщающая дисперсионная зависимость для диэлектриков предложена, в частности, П.Дебаем .

$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} + (\epsilon_0 - \epsilon_{\infty})/(1+j\omega\tau)$, где ϵ_0 – значение диэлектрической проницаемости на частотах много меньших $\omega_{кр.}$, а ϵ_{∞} – на частотах много больших $\omega_{кр.}$.

Так, что

$$\epsilon'(\omega) = \epsilon_{\infty} + (\epsilon_0 - \epsilon_{\infty})/(1+\omega^2\tau^2), \text{ а}$$

$$\epsilon''(\omega) = \omega\tau (\epsilon_0 - \epsilon_{\infty})/(1+\omega^2\tau^2).$$

Таким образом, $\epsilon'(\omega)$ монотонно уменьшается, а $\epsilon''(\omega)$ имеет максимум при $\omega=1/\tau$.

Из материалов многочисленных лабораторных и натуральных экспериментов следует, что в диапазоне метровых волн действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости ϵ' , а следовательно и скорость распространения электромагнитных волн V незначительно зависят от частоты и типа грунтов, но очень сильно зависят от их влажности W (где W - весовая влажность). Для перехода от значений W к значениям ϵ' существует целый ряд эмпирических формул.

Для песков и суглинков: $\epsilon' = 3.2 + 1.1W$;

Для осадочных пород в широком диапазоне изменения влажности 3 - 45 %:

$$\epsilon' = 3.03 + 9.3 W_{об.} + 146 W_{об.}^2 - 76,7 W_{об.}^3,$$

где $W_{об}$ - объемная влажность, $W_{об} = \gamma / 100$ (γ - плотность сухой породы в г/см³).

Для сред с большой влажностью получена зависимость:

$$\epsilon' = 720 / (180 - W).$$

Таким образом, при теоретических расчетах необходимо располагать априорными сведениями о влажности пород, а с другой стороны, по полученным в ходе исследований значениям диэлектрической проницаемости можно оценить влажность пород.

На рисунке 1.3 приведен пример экспериментальных зависимостей диэлектрических свойств от влажности.

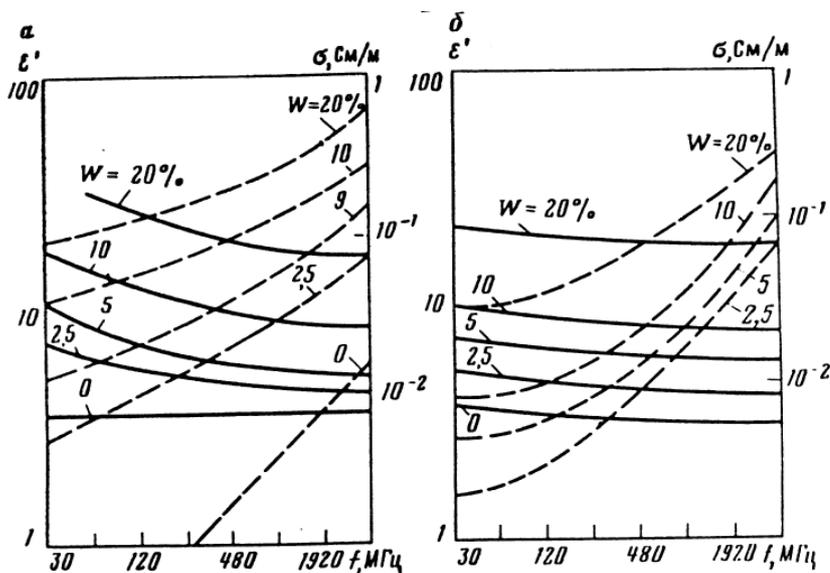


Рис.1.3 Частотная зависимость диэлектрических свойств двух видов суглинка при различной влажности.

Величина удельного сопротивления породы также зависит от частоты электромагнитной волны, типа породы, ее влагосодержания и минерализации. Общей закономерностью является уменьшение удельного сопротивления с ростом частоты, влажности и минерализации воды в породе, глинистости породы. В настоящее время наибольшее количество данных по удельному сопротивлению различных пород накоплено и систематизировано по результатам лабораторных измерений и электроразведки на постоянном токе, в то время как на переменном токе, и в частности в диапазоне метровых волн, таких систематизированных данных явно недостаточно.

В таблице 1.1 [16] представлены интервалы изменения данных по удельному сопротивлению грунтов на постоянном токе и данные по относительной диэлектрической проницаемости в метровом диапазоне волн.

Таблица 1.1 Удельное электрическое сопротивление пород постоянному току и диэлектрическая проницаемость в метровом диапазоне волн.

Тип породы	естественной влажности				водонасыщенных			
	0.1 - 0.4, г/л	0.5 - 0.8, г/л	1.0 - 3.0, г/л	ϵ'	0.1 - 0.4, г/л	0.5 - 0.8, г/л	1.0 - 3.0, г/л	ϵ'
Пески разнозернистые	500-8000	150-2000	30-700	4-9	120-1200	40-400	10-100	16- 25
Супеси	100-5000	40-160	10-50	6-16	60-500	20-70	8-20	16- 25
Суглинки	60-2000	20-50	5-15	9-25	50-500	15-35	3-10	16- 30
Глины	3-60	1-30	0.2-15	16- 30	3-50	1-30	0.2-15	20- 36
Валунно-галечниковые отложения с песчаным заполнителем	1200-50000	1500-20000	300-5000	4-9	600-3000	80-1500	20-1000	10- 20
Валунно-галечниковые отложения с глинистым заполнителем	-	90- 500	20-150	6-16	-	70-300	15-80	10- 25
Песчано-глинистые отложения с гравием, галькой и валунами	300-12000	90-3000	15-700	4-16	80-3000	25-800	7-250	10- 25
Скальные породы неветрелые	-	250-10 ⁸	-	3-6	-	-	-	-
Скальные породы ветрелые, трещиноватые	-	30-400	-	-	-	-	-	-
Известняки крепкие плотные	-	100-10 ⁵	-	4-7	-	-	-	-
Доломиты крепкие плотные	-	50-10 ⁵	-	5-7	-	-	-	-
Мергели	-	20-500	-	20- 30	-	-	-	-
Глинистые сланцы	-	5-5000	-	7-10	-	-	-	-

Опыт отечественных и зарубежных работ показал, что интервал частот 50 - 100 мегагерц (интервал длин волн 6 - 3 метра в воздухе) является оптимальным при выборе компромисса между приемлемой глубиной и достаточно высокой разрешающей способностью для послойной дифференциации верхней части разреза до глубин 10 - 15 метров.

На самом деле лабораторные измерения удельных сопротивлений пород ограничены в области низких частот диапазоном 0 - 100 Гц, но, учитывая плавный характер зависимости удельного сопротивления от частоты в этом диапазоне, можно допустить приближенное равенство между лабораторными измерениями и полевыми исследованиями на постоянном токе. В Таблице 2.2 представлены коэффициенты для перехода от значений удельного сопротивления, измеренных на постоянном токе (ρ_{const}), к значениям для средней частоты зондирования 75 МГц ($\rho_{f=75 \text{ МГц}}$) для разных типов пород.

Таблица 2.2 Коэффициенты перехода от ρ_{const} к $\rho_{f=75 \text{ МГц}}$ для различных типов пород.

Тип породы	$K = \rho_{const} / \rho_{f=75 \text{ МГц}}$
суглинок	3 - 3.5
песчаник	2
известняк	3
уголь	4
торф	2.5

Необходимо отметить, что в среднем этот переводной коэффициент равен 3.

В этом случае формула для оценки удельного затухания в дБ/м на частоте 75 МГц может быть переписана в виде:

$$A = 4911 / (\rho_{const} \sqrt{\epsilon'}).$$

Пример.

Во многих георадарах при использовании зондирующих импульсов с центральной частотой 100 - 150 мегагерц в воздухе допустима регистрация отраженных сигналов в динамическом диапазоне 70 дБ по отношению к излученному импульсу. При размещении антенн вблизи поверхности грунта центральная частота излучения снижается до 80 - 90 мегагерц для песчаных грунтов различной влажности и около 70 мегагерц для влажных торфяных грунтов. Потери энергии зондирующего импульса при отражении от контрастных по диэлектрической проницаемости границ в геологической среде (например, уровень грунтовых вод, контакт между коренными и рыхлыми породами) составляет порядка 20 дБ. Следовательно, для регистрации отраженного сигнала общие потери зондирующего импульса на затухание при его распространении в зондируемой среде не должны превышать 50 дБ. Тогда, опираясь на вышеприведенную формулу, можно оценить предельную глубин-

ность исследований для конкретного грунта с известными удельным сопротивлением на постоянном токе и диэлектрической проницаемостью:

$$h[\text{м}] = 50 / 2 \bar{A} = \rho_{\text{const}} \sqrt{\varepsilon'} / 196.$$

Следовательно, имея сведения о проводимости среды, можно прогнозировать затухание волн и оценивать глубинность будущих георадарных исследований.

Соотношение содержания воздуха и воды в породе будет определять величину ее диэлектрической проницаемости, так как согласно данным Таблицы 3.3 при положительной температуре минимальное значение диэлектрической проницаемости (1) имеет воздух, а максимальное (81) – вода. Не влагонасыщенные, сухие, монолитные, слаботрещиноватые породы будут иметь низкие значения диэлектрической проницаемости, а влагонасыщенные, проницаемые, пористые, трещиноватые породы будут иметь высокие значения диэлектрической проницаемости и низкие значения скорости распространения электромагнитных волн.

Таблица 3.3 Диапазон значений диэлектрической проницаемости, скорости и длин волн (100 МГц).

	воз- дух	лед	песок су- хой	глины	вода
$\varepsilon_{\text{отн}}$	1	3	5	16	81
$V, \text{ см/нс}$	30	17	13	7.5	3.3
$\lambda (f=100 \text{ МГц}),$ м	3	1.7	1.3	0.75	0.3

Таким образом:

- основным признаком для расчленения толщи искусственных или естественных слоев является их контраст по диэлектрической проницаемости;
- для решения инженерных задач необходимо установить связи между диэлектрической проницаемостью и требуемыми характеристиками вещества - влагонасыщенностью, литологией, агрегатным состоянием и т.д., что может быть сделано в каждом конкретном случае с помощью параметрических наблюдений, скважин, лабораторных измерений и т.п.

1.3. Отражение, преломление, дифракция и затухание электромагнитных волн в реальных средах.

Распространение электромагнитных волн метрового диапазона, характерного для георадарных исследований, рассматривается в рамках законов геометрической оптики соответственно для плоских волн на больших удалениях от источника и для сферических волн на малых удалениях от источника.

Предполагается, что в рамках допустимых погрешностей в определении скоростей распространения и амплитуд волн действуют принципы Ферма, Гюйгенса, Френеля и закон Снеллиуса. Предполагается, что в изотропной среде луч перпендикулярен фронту волны и возможны геометрические построения путей волн в среде с последующим вычислением параметров среды по измеренным кинематическим и динамическим характеристикам записей волн (радарограмм) практически так же, как это делается в сейсморазведке.

Отражение электромагнитных волн. Коэффициент отражения при **нормальном** падении волны на границу двух слоев 1 и 2 с различной диэлектрической проницаемостью будет:

$$K_{\text{отр}} = (\sqrt{\varepsilon'_1} - \sqrt{\varepsilon'_2}) / (\sqrt{\varepsilon'_1} + \sqrt{\varepsilon'_2}).$$

Преломление электромагнитных волн. Коэффициент преломления (прохождения через границу) будет равен:

$$K_{\text{пр}} = 1 - K_{\text{отр}} = 2\sqrt{\varepsilon'_2} / (\sqrt{\varepsilon'_1} + \sqrt{\varepsilon'_2}).$$

При двукратном прохождении через границу, например, при отражении от более глубокой границы, суммарное уменьшение амплитуды сигнала будет равно $1 - K_{\text{отр}}^2$

Дифракция электромагнитных волн. Это явление возникает в том случае, когда электромагнитными волнами облучается отражающий объект, размеры которого меньше преобладающей длины волны. Математическое описание процесса дифракции чрезвычайно сложно. Суть явления состоит в том, что в соответствии с принципом Гюйгенса, каждая точка фронта волны представляет собой элементарный вторичный источник волн. На небольшой в сравнении с длиной волны поверхности объекта эти элементарные источники складываются. В итоге весь объект представляет собой вторичный источник электромагнитных волн в среде. Это чрезвычайно важное для георадиолокационных исследований явление, так как поиск локальных объектов сводится к поиску вторичных источников излучения на записях волновых картин, что позволяет не только опознать их на записи, но и определить глубину залегания объекта и скорость распространения электромагнитных волн в среде над объектом.

Затухание электромагнитных волн. Под затуханием чаще всего понимают общее уменьшение амплитуды зондирующего сигнала при прохождении его через среду до отражающей границы и обратно к приемнику. Факторами, вызывающими уменьшение амплитуды, являются следующие:

- отражение и преломление на промежуточных границах (рассмотрено выше);
- потери, связанные с проводимостью среды (рассмотрено выше);
- геометрическое расхождение фронта волны.

Последний фактор имеет значение на небольших удалениях от источника колебаний в первые длины волн, когда волну можно считать сферической и плотность потока энергии от источника убывает обратно пропорционально площади поверхности фронта, а амплитуда, соответственно, обратно пропорционально радиусу сферы или расстоянию до источника:

$$K_{\text{РАСХ}} = 1 / R,$$

где R - расстояние до источника. Для расчета уменьшения амплитуды отраженной волны за счет расхождения сферического фронта R будет равно удвоенной глубине отражающей границы.

На больших удалениях от источника радиус кривизны фронта становится таким, что собственно фронт на площади в десятки квадратных метров можно считать плоским, и влиянием дальнейшего геометрического расхождения можно пренебречь.

Таким образом, если за амплитуду зондирующего сигнала принять величину A_0 на расстоянии 1 метр от источника, то величина сигнала A_n , отраженного от границы на глубине h будет равна:

$$A_n = A_0 K_{\text{ОТР}} \left(\prod_{i=1}^n (1 - K_i^2) \right) \exp(-\bar{A} 2h) / 2h,$$

где \bar{A} - удельное затухание в дБ/м; h - глубина до границы в метрах; $K_{\text{ОТР}}$ - коэффициент отражения от границы на глубине h ; $\prod_{i=1}^n (1 - K_i^2)$ - это произведение учитывает прохождение через промежуточные границы.

В рамках лучевой теории распространения волн в процессе отражения от плоской границы участвует на 90% (по энергии отраженной волны) площадка радиусом

$$r = (1/2\lambda h)^{1/2},$$

где h - глубина до отражающей границы, а λ - длина волны. Этот факт чрезвычайно важен при оценке пространственной разрешающей способности георадарных исследований, что будет обсуждаться ниже в разделе “Методика работ”.

1.4. Сверточная модель трассы, понятие частотной характеристики среды и частотного спектра сигналов.

В соответствии с теорией распространения волн, георадиолокационная трасса в приемнике представляет собой результат операции свертки исходного зондирующего импульса с импульсной характеристикой среды в области времени, или спектр георадиолокационной трассы в приемнике представляет собой результат умножения спектра исходного зондирующего сигнала с частотной характеристикой среды в области частот. То есть среда рассматривается как некоторый четырехполюсник (устройство с двумя входами “+” и “-” и с двумя такими же выходами), на вход которого подан зондирующий сигнал. В случае георадиолокации, как правило, зондирующий импульс представляет собой 2 - 4 периода синусоиды с центральной частотой, соответствующей типу георадара и применяемых антенн. Частотная характеристика среды представляет собой характеристику **фильтра низких частот**, параметры которого определяются свойствами среды и факторами, влияющими на распространение волны, рассмотренными в предыдущем разделе.

На рисунках 1.4 и 1.5 представлены примеры георадиолокационной трассы и ее модуля спектра. Таким образом, существует принципиальная возможность, опираясь на знание спектра зондирующего импульса и спектра георадиолокационной трассы в приемнике, изучать характеристики фильтра-среды, связанные со строением разреза, наличием и свойствами различных отражающих объектов.

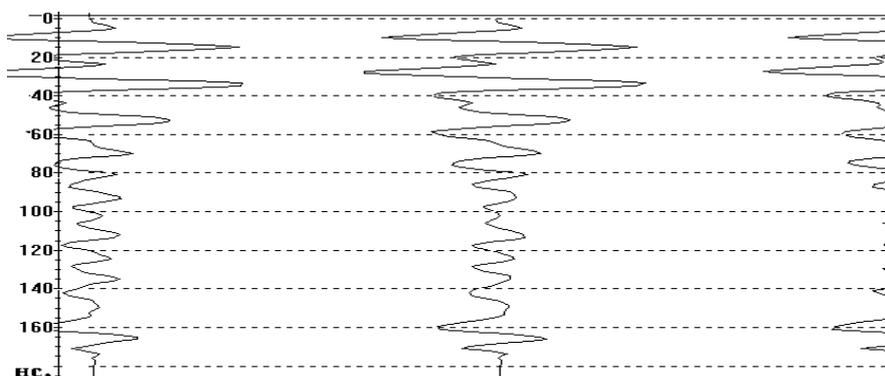


Рис. 1.4. Трасса георадиолокационного сигнала. Амплитуда сигнала - функция времени.

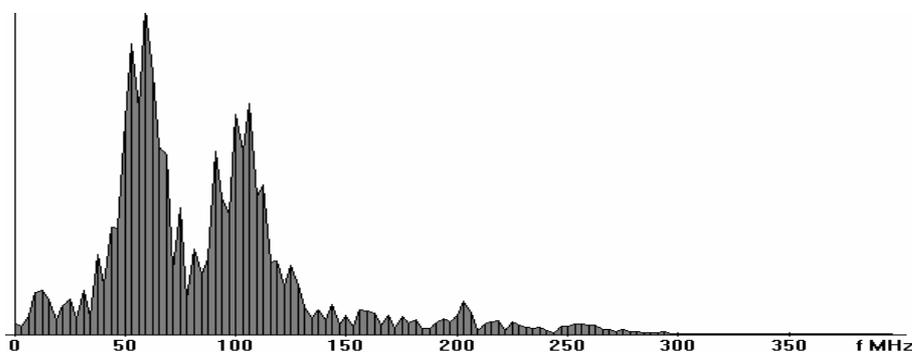


Рис. 1.5. Модуль спектра трассы - интерференция волн в приемнике.

Частотный спектр зондирующего сигнала есть результат прямого преобразования Фурье от зондирующего сигнала и представляет собой комплексную функцию частоты, модуль которой представляет собой амплитудно-частотный спектр сигнала, а фаза показывает фазовые соотношения между гармониками, составляющими зондирующий импульс. Чаще всего исследуют модуль спектра и его основные характеристики - центральную частоту (частоту максимума), правую и левую частоты по уровню 0.5 от максимума, ширину полосы от левой до правой частоты и отношение интервала частот от

левой до правой к значению центральной частоты спектра - ширину спектра. На рисунках 1.6 и 1.7 представлены типичная форма зондирующего импульса и его амплитудно-частотный спектр.

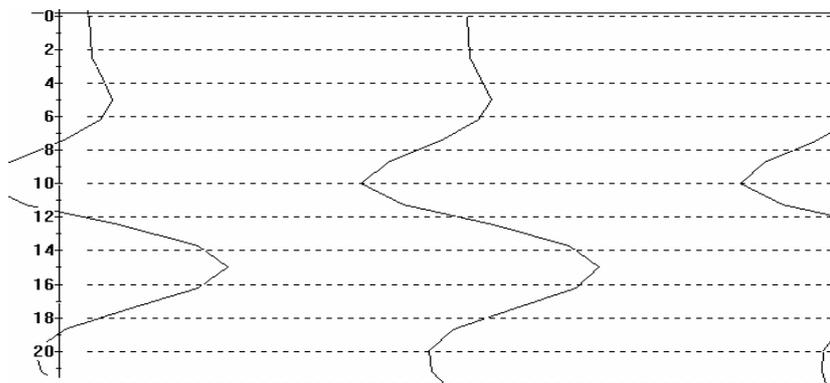


Рис. 1.6. Характерная форма зондирующего сигнала.

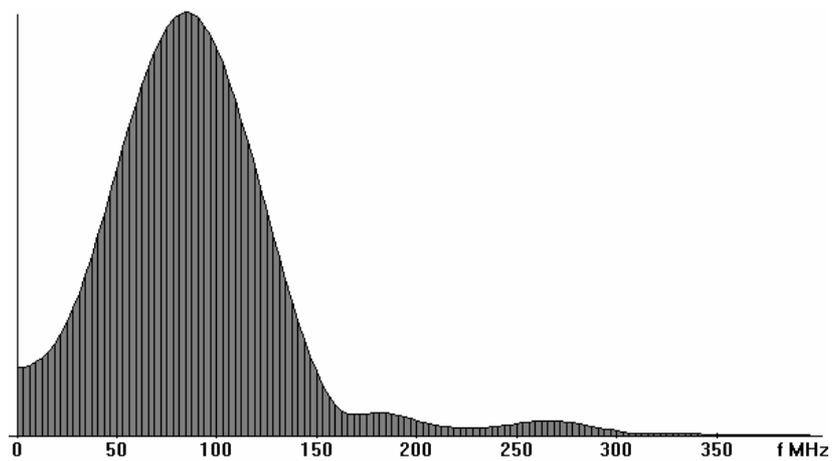


Рис. 1.7. Модуль спектра зондирующего сигнала.

Глава 2. КРУГ ЗАДАЧ, РЕШАЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ ГЕОРАДАРА

[1 - 8, 13, 26].

Все задачи, решаемые с помощью георадара, могут быть разделены на две большие группы с характерными для каждой группы методиками исследований, способами обработки, типами отображения объектов исследования в поле электромагнитных волн и представлениями результата.

2.1. Геологические, инженерно-геологические и гидрогеологические задачи

а) картирование геологических структур - восстановление геометрии относительно протяженных границ, поверхности коренных пород под рыхлыми осадками, уровня грунтовых вод, границ между слоями с различной степенью водонасыщения, поиск месторождений строительных материалов;

б) определение свойств различных отложений по скорости распространения электромагнитных волн, опираясь на связь этих свойств с диэлектрической проницаемостью пород;

в) определение толщины ледяного покрова;

г) определение мощности водного слоя и картирование поддонных отложений;

д) определение мощности зоны сезонного промерзания, оконтуривание областей вечной мерзлоты, таликов;

2.2. Поиск локальных объектов, обследование инженерных сооружений, нарушения штатной ситуации

а) трубопроводов;

б) кабелей;

в) участков разреза с нарушенным естественным залеганием грунта - рекреативированных земель, засыпанных выемок;

г) погребенных отходов и захоронений;

д) подземных выработок, подвалов, карстовых и суффозионных провалов;

е) границ распространения углеводородных загрязнений;

ж) поиск скрытых нарушений в стенах наземных сооружений, шахт, тоннелей, в опорах и перекрытиях;

з) поиск нарушений, возникших в процессе строительства или в процессе эксплуатации в конструкции автомобильных и железных дорог, взлетно-посадочных полос аэродромов и т.д.

Глава 3. АППАРАТУРА ДЛЯ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ [4, 15 - 17, 29, 31].

Принцип действия георадара основан на излучении сверхширокополосных наносекундных импульсов, приеме сигналов, отраженных от границ раздела пород или иных отражающих объектов, стробоскопической обработке принятых сигналов со сжатием их динамического диапазона и последующим измерением временных интервалов между отраженными импульсами. Формирование зондирующих сигналов, имеющих 1.5 - 2 периода колебаний, осуществляется методом ударного возбуждения антенн перепадом напряжения с фронтом наносекундной длительности. Приемное устройство выполняется, как правило, по схеме стробоскопического преобразователя с коэффициентом преобразования временного масштаба порядка 10000 и обеспечивающего трансформацию принятых сигналов в область звуковых частот. Помимо этого, приемный тракт включает в себя широкополосный усилитель с временной автоматической регулировкой усиления (ВАРУ). Наличие ВАРУ обеспечивает сжатие динамического диапазона входных сигналов.

Блок-схема комплекса аппаратуры георадиолокационного зондирования приведена на рисунке 3.1.

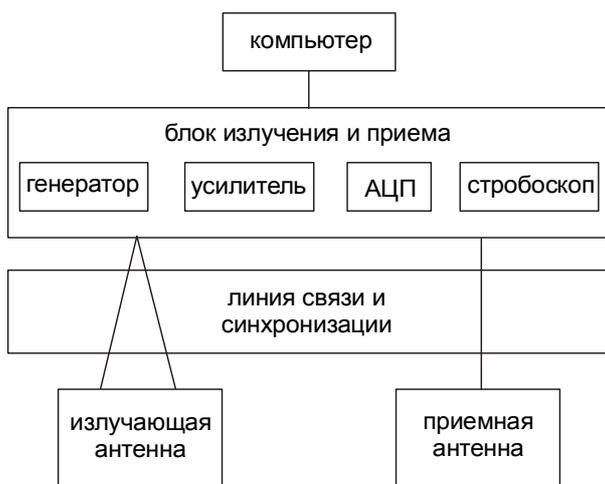


Рис. 3.1. Блок-схема георадара.

Блок излучения и приема осуществляет формирование зондирующего сигнала на излучающей антенне, прием сигнала с приемной антенны, стробоскопическую обработку, запись в память компьютера и визуализацию на экране монитора. Всем процессом осуществления зондирования с регулируемыми параметрами задержек сигнала (если необходимо), интервала времени регистрации (развертки), коэффициента усиления, программируемого переменного во

времени усиления и фильтрации стробоскопированного сигнала управляет компьютер с помощью соответствующей программы сбора и хранения информации.

Антенны для георадаров.

Антенны вообще являются неотъемлемой и важнейшей частью любого устройства, связанного с излучением и приемом физических полей в физической среде беспроводным способом. Георадиолокация не является исключением. Сколько-нибудь полное рассмотрение теории антенн для

излучения и приема электромагнитных волн далеко выходит за рамки данного пособия, а читатель, интересующийся данным вопросом более подробно, может быть отослан к весьма обширной радиотехнической литературе. Ниже приводятся лишь краткие сведения применительно к современным георадарам.

По назначению антенны делятся на излучающие, приемные и приемно-излучающие.

В георадиолокации для излучения и приема используются две одинаковые антенны (бистатическая антенна), либо одна и та же антенна работает сначала в качестве излучающей, а потом в качестве приемной (моностатическая антенна).

По принципу действия антенны, применяемые в георадиолокации, подразделяются на дипольные, щелевые и рупорные.

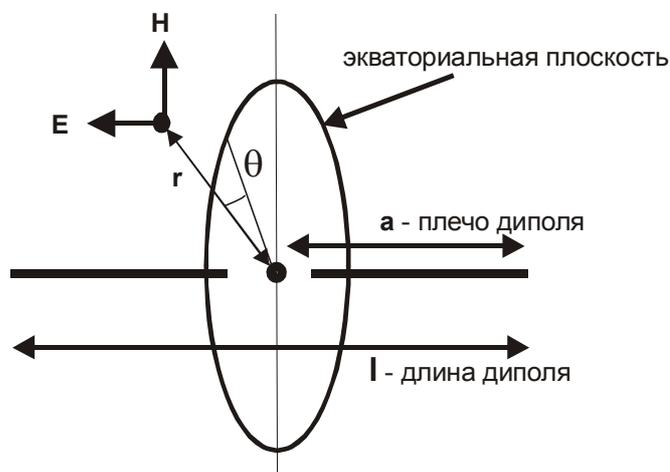


Рис. 3.2. Схематическое изображение дипольной антенны.

Дипольные антенны. Представляют собой резонансную систему - простейший вибратор, состоящий из двух отрезков проводника (в георадарах одинаковых), в которых при подаче импульсного напряжения с генератора протекает импульсный ток, и электромагнитное поле распространяется в окружающую среду, либо под действием внешнего поля в антенне протекает ток, измеряемый приемным устройством. На рисунке 3.2 схематически изображена дипольная антенна. Здесь l – величина диполя ($l/2$ – величина плеча диполя), I - величина тока в антенне, λ - длина волны, возбуждаемая (принимаемая) данной антенной на собственной частоте, r – расстояние от середины диполя до точки наблюдения, θ - угол между направлением на точку наблюдения и экваториальной плоскостью диполя. Значения модулей векторов электрической и магнитной составляющих излучаемого (принимаемого) поля связаны с параметрами антенны следующим образом:

$$E = 60 \cdot \pi \cdot \frac{I \cdot l}{r \cdot \lambda} \sin \theta, \quad H = \frac{I \cdot l}{2 \cdot r \cdot \lambda} \sin \theta.$$

По мере удаления от центра диполя различают три зоны – ближнюю, среднюю и дальнюю.

В ближней зоне, где $r \ll \lambda$, поле имеет реактивный характер, векторы \mathbf{E} и \mathbf{H} сдвинуты друг относительно друга по фазе на 90° и лучевые законы распространения волн не выполняются. Это так называемая неволновая зона.

В дальней зоне, где $r > \lambda$, векторы \mathbf{E} и \mathbf{H} синфазны, применимы лучевые представления, и зона называется волновой.

Средняя зона, где удаление от центра диполя примерно равно длине волны, является границей применимости лучевых представлений о распространении волн.

Энергетическими параметрами излучающей антенны являются мощность излучения P_Σ и сопротивление излучения R_Σ :

$$P_\Sigma = \frac{80 \cdot \pi^2 \cdot l^2 \cdot I^2}{\sqrt{2} \cdot \lambda^2}; \quad R_\Sigma = P_\Sigma \sqrt{2} / I^2 = \frac{80 \cdot \pi^2 \cdot l^2}{\lambda^2}.$$

Соответственно, при распространении поля имеют место потери – мощность потерь P_Π и сопротивление потерь R_Π , которые зависят от свойств среды. Коэффициент полезного действия антенны η определяется как

$$\eta = P_\Sigma / (P_\Sigma - P_\Pi) = R_\Sigma / (R_\Sigma - R_\Pi).$$

Характеристикой частотного диапазона излучаемых или принимаемых антенной сигналов является относительная ширина полосы пропускания.

$$\Delta f_{\text{ПР}}, \% = 100\% (f_{\text{МАХ}} - f_{\text{МИН}}) / f_0,$$

где f_0 – собственная частота антенны. По этому признаку антенны делятся на узкополосные –

$$\Delta f_{\text{ПР}}, \% < 10\%,$$

широкополосные –

$$10\% < \Delta f_{\text{ПР}}, \% < 100\%$$

и сверхширокополосные –

$$\Delta f_{\text{ПР}}, \% > 100\%.$$

В современной георадиолокационной аппаратуре используются в основном сверхширокополосные антенны.

Важнейшей характеристикой дипольной антенны является ее диаграмма направленности – нормированная по максимуму зависимость напряженности поля $f(\Theta)$ от угла Θ между направлением диполя и направлением на точку наблюдения.

Для диполя с равными плечами:

$$f(\Theta) = \frac{\cos(k \cdot l \cdot \cos \Theta) - \cos(k \cdot l)}{\sin \Theta},$$

где $k = 2\pi/\lambda$.

Таким образом, диаграмма направленности антенны зависит от соотношения длин диполя и длины излучаемой (принимаемой) волны. На рисунке 3.3 представлены примеры диаграмм направленности дипольной антенны для различных соотношений l и λ . По форме диаграммы направленности антенны делятся на остронаправленные, где центральный

лепесток максимален по величине и узок, а боковые лепестки незначительны (например, при $l = \lambda$), слабонаправленные и ненаправленные.

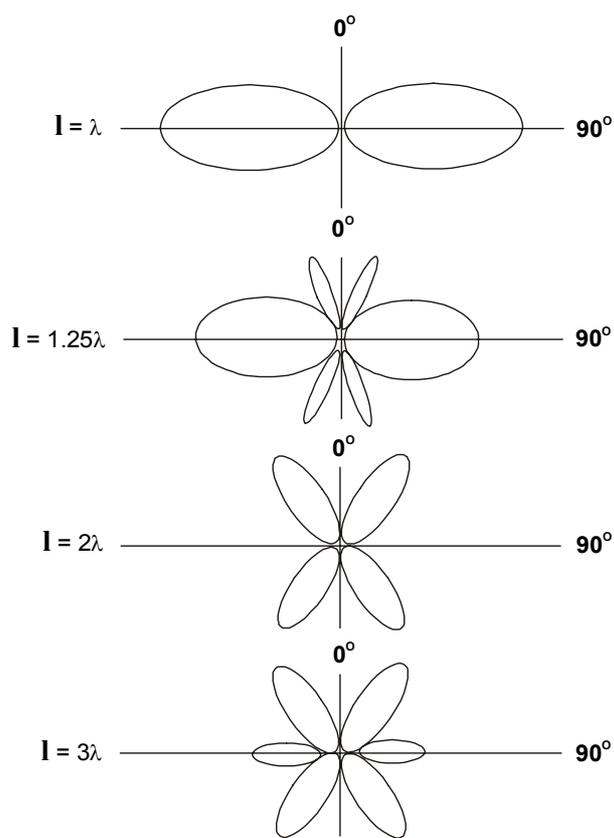


Рис.3.3. Примеры характеристик направленности дипольной антенны для разных соотношений l и λ .

Поскольку для «обострения» характеристики направленности антенны требуется увеличение линейных размеров диполя в соотношении с длиной волны, для более низкочастотных антенн эта задача решается труднее, чем для относительно более высокочастотных антенн.

При размещении антенны над проводящей поверхностью, например, поверхностью, земли диаграмма направленности искажается, как правило, в сторону потери остроты направленности вниз из-за увеличения длины волны в проводящей среде при неизменном размере диполя.

Дипольные антенны наиболее широко применяются в современной георадиолокационной аппаратуре.

Конструктивно они выполняются в двух вариантах.

Первый вариант – металлические трубки, закрепленные в горизонтальном положении в переносной конструкции. Так, например, в георадаре «Зонд-12» устроена сборная антенна с частотами 36, 75 и 150 мегагерц. Такие антенны переносятся над поверхностью земли на высоте 10 - 30 см.

Другой вариант – так называемая «бабочка», когда плечи диполя выполнены в виде двух плоских металлических треугольников (см. рис 3.4.а). В этом случае и излучающая и приемная пара треугольников закреплены на единой подложке, которая протаскивается непосредственно по поверхности грунта.

Так устроены антенны с частотами 300, 500, 900, 1000 и 2000 мегагерц в георадаре «Зонд-12».

Дипольные антенны имеют наиболее широкое применение в георадиолокации.

Щелевые антенны. Щелевая антенна представляет собой прорезь в проводнике. Собственная частота, полоса частот излучаемых и принимаемых волн, характеристика направленности определяются размерами проводника и размерами щели. Ток смещения в щели генерирует электромагнитное поле в окружающем пространстве. На рисунке 3.4.б приведено схематическое изображение щелевой антенны.

Выражения для характеристик возбуждаемого электромагнитного поля для щелевых антенн несколько более сложные, чем для дипольных и здесь не приводятся.

В настоящее время щелевые антенны не имеют широкого применения в георадиолокации, но многие конструкторы георадаров считают, что за ними большое будущее, поскольку формирование остронаправленной характеристики для относительно высоких частот легче осуществить для щелевой антенны, чем для дипольной.

Рупорные антенны. Форма этих антенн соответствует названию и представляет собой конический или пирамидальный металлический рупор, прикрепленный к волноводу, возбуждаемому импульсным напряжением. Собственная частота антенны прямопропорциональна линейным размерам волновода, а острота характеристики направленности прямопропорциональна высоте конуса или пирамиды.

Рупорные антенны рассчитываются на большую мощность излучения и острую характеристику направленности. Применяются редко для относительно низкочастотных исследований и технологически неудобны. Например, рупорную антенну на 75 мегагерц переносят 2 человека.

Другие типы антенн. Сюда относятся антенны с распределенными элементами – длинные линейные конструкции, обеспечивающие острую характеристику направленности и лучшее согласование излучения и приема с поверхностью земли [9]. Такие антенны серийно не производятся и находятся на стадии лабораторных разработок.

Сюда же относятся экранированные антенны. В них обычный дипольный вибратор типа «бабочки» сверху закрыт специальным проводящим и поглощающим полимерным материалом. Цель такой конструкции – подавление излучения в верхнее полупространство и резкое ослабление «воздушных» волн-помех (см. выше). Экранированные антенны позволяют подавить основные регулярные помехи в процессе наблюдений и получать гораздо более качественный полевой материал. В комплекте георадара «Зонд-12» имеются экранированные антенны на 300, 1000 и 2000 мегагерц.

В производстве георадаров в настоящее время сосуществуют две тенденции - построение многощелевых приборов с набором антенн для

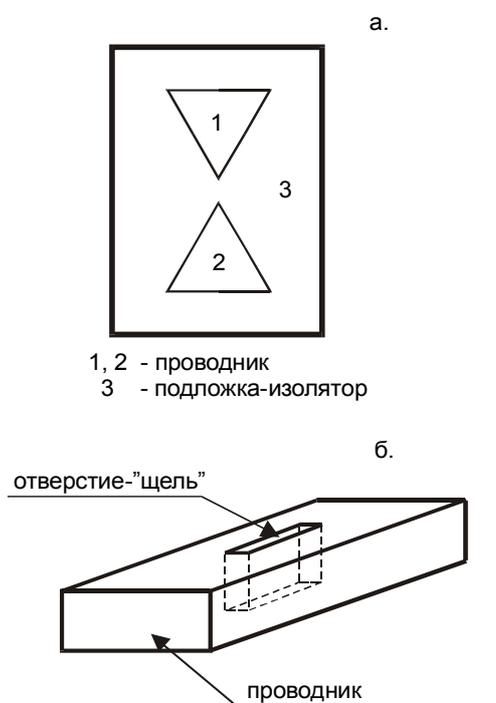


Рис. 3.4. Схемы дипольной антенны-"бабочки" (а) и щелевой антенны (б).

исследований в общем диапазоне частот от 50 до 2500 МГц и создание узкоспециализированных аппаратов для решения конкретных задач, зато в больших объемах, более технологично и с большим успехом.

Ниже, в качестве примера приводятся характеристики многоцелевого прибора «Зонд-12» (Фирма “Radar Inc.”, г. Рига, Латвия). При работе с прибором используется компьютер типа “notebook”, математическое обеспечение сбора информации производства фирмы “Radar Inc.” и система обработки производства «Деко - геофизика».

Технические характеристики прибора следующие:

- динамический диапазон 120 дБ;
- программируемое окно записи 50 - 2000 наносекунд;
- скорость сбора информации 14 трасс в секунду;
- рабочая температура..... от 0 до +40 градусов;
- размеры прибора 35 x 30 x 5.5 см.;
- вес прибора с батареями..... 3 кг.

Георадар снабжен сменными антеннами на 25 - 150, 300, 500, 750, 900, 1000 и 2000 МГц:

- 25 - 150 МГц линейный размер от 2 до 6 м и вес от 2 до 7 кг в зависимости от настройки на конкретную центральную частоту;
- 300 МГц..... 98 x 52 x 4 см, 10 кг;
- 500 МГц..... 69 x 32 x 4 см, 4 кг;
- 900 МГц..... 43 x 22 x 4 см, 2 кг;
- 1000 МГц..... 16 x 32 x 16 см, 1,2 кг.

На фото 1 представлен рабочий момент съемки георадаром «Зонд-12» антеннами на 75 МГц.



Фото 1. Георадарная съемка, рабочий момент.

Из приборов российского производства наибольший интерес в настоящее время представляют георадары серии «ОКО» производства фирмы ООО «ЛОГИС» (фото 2). Ниже приводятся некоторые сведения из описания этих приборов, представленные фирмой на своем сайте.

Состав георадара:

Антенный блок (АБ), включает в свой состав приёмо-передающие антенны, передающие и приёмные устройства и системы обработки информации. Тип антенного блока определяет глубину зондирования и разрешающую способность георадара.

Георадар может комплектоваться несколькими антенными блоками для выполнения разных задач.

Блок обработки, управления и индикации (как правило, ноутбуки различных типов с операционной системой Windows95/98/2000 или карманные компьютеры с операционной системой WindowsCE). Применение карманного компьютера позволяет уменьшить массу, габариты и стоимость комплекта георадара. Использование в карманном компьютере экрана с отражающей технологией обеспечивает высококонтрастное изображение в условиях яркого солнечного освещения.

Блоки питания (БП), используются для питания антенного блока и блока управления. Применяются герметичные батареи свинцовых и никель-металлогидридных аккумуляторов напряжением 12В.

Телескопическая штанга, служит для перемещения георадара.

Датчик перемещения (ДП), позволяет осуществлять точную привязку по расстоянию на местности.

Измеритель пути (ИП), позволяет определять расстояние на пересеченной местности или на воде.

Соединительные оптические кабели, служат для передачи информации и сигналов и позволяют повысить качество радиолокационного сигнала.

Радиомодем, позволяет производить дистанционное управление прибором и осуществлять съём информации с антенных блоков в радиусе до 100 метров.



Антенные блоки АБД и АБ-150.

Фото 2. Антенные блоки георадара «ОКО».

1. Для работы в полевых и неблагоприятных климатических условиях георадар комплектуется термовлагозащищённым вариантом блока обработки и индикации на основе карманного компьютера «Compaq».

Достоинства: малый вес, термовлагозащищён, хорошо виден на ярком солнце, имеет низкое энергопотребление.

2. Все блоки георадара имеют оптическую развязку (приёмник, передатчик, блок управления, датчик перемещения). Это уменьшает собственные помехи системы и даёт более стабильные сигналы при перемещении антенных блоков по пересечённой местности.

3. Радиомодем позволяет производить дистанционное управление прибором и осуществлять съём информации с антенных блоков в радиусе до 100 метров.

4. Высокая прочность – антенные блоки выполнены из алюминиевых сплавов.

5. Высокая надёжность – георадары изготавливают на оборонном предприятии серийно, оборудование производится в соответствии с требованиями ГОСТ.Р.ИСО-9001-96. Разработаны полные КД и эксплуатационный документ.

6. Малое энергопотребление – от одного комплекта аккумуляторов возможна работа в течение 4 - 8 часов.

7. Компактность – комплект прибора перевозится в удобной транспортной сумке. Антенны большого размера АБ - 150, АБ - 250 имеют разборную конструкцию.

8. Широкий температурный диапазон: $-20^{\circ}\dots +60^{\circ}\text{C}$. Все приборы проходят обязательные приёмодаточные испытания, включая климатические (-30° , $+70^{\circ}\text{C}$) и механические испытания.

9. Бесплатное обучение сроком до 3 дней. Методическая поддержка по обработке результатов.

10. Гарантия 18 месяцев, далее сервисное обслуживание.

11. Высокопрофессиональный коллектив разработчиков занимается постоянным совершенствованием георадаров.

12. Программное обучение может индивидуально корректироваться под методические особенности клиентов.

13. Георадар имеет сертификат соответствия (№ 0000517) и гигиенический сертификат (50.99.20.431.П.10178.07.0).

Глава 4. МЕТОДИКА РАБОТ

[1 - 7, 13, 17, 21, 32]

Под параметрами методики работ понимают:

1. Режим работы аппаратуры:

- центральная частота возбуждаемого сигнала - тип антенн;
- усиление;
- фильтрация;
- число накоплений сигналов при записи.

2. Способ перемещения источника и приемника по профилю:

- постоянная или переменная база - расстояние между источником и приемником;
- высота антенн над поверхностью грунта;
- скорость перемещения;
- режим движения - непрерывный или старт-стопный.

Правильно выбранная на основании предварительных расчетов методика должна обеспечить глубинность, разрешающую способность и детальность работ, которые определяются техническим заданием на производство работ.

4.1. Глубинность георадарных исследований. [7]

Глубинностью исследований называется максимальная глубина отражающего объекта, отраженная волна от которого может быть выделена на радарограмме.

Основное ограничение глубинности георадарного метода – ее зависимость от свойств изучаемой среды. Желание преодолеть это ограничение известными способами наталкивается на определенные трудности. Четкое понимание основных факторов изменения динамики электромагнитных волн в поглощающей среде избавляет от необоснованных надежд на достижение на современном уровне техники георадиолокации глубинности в сотни метров в низкоомных разрезах. Поэтому столь большое место уделено именно вопросу оценки глубинности георадиолокации.

При фиксированных параметрах источника глубинность может изменяться от нескольких метров в глинах до нескольких километров в скальных породах. Динамические характеристики регистрируемых при георадарных исследованиях отраженных волн сложным образом зависят от спектра возбуждаемого сигнала, диэлектрической проницаемости и проводимости среды. При этом сами электрические свойства реальных гетерогенных и многофазных сред являются, как было показано выше, функциями частоты, и вид этих функций определяется самыми разнообразными факторами: пористостью, литологией, типом флюида, заполняющего поры, водонасыщенностью, температурой и т.д. В этих условиях строгое решение задачи об изменении интенсивности и формы электромагнитных волн в процессе их распростра-

нения принципиально невозможно. Оценку глубинности георадарных исследований можно проводить только на основе классической теории, заведомо допуская большие отклонения расчетных величин от истинных. Классическая теория показывает, что в проводящих средах существует поглощение и дисперсия фазовых и групповых скоростей распространения электромагнитных волн, что приводит к уменьшению интенсивности и изменению формы электромагнитных импульсов по мере их распространения в поглощающей среде, определяя тем самым практически достижимую глубинность георадарного метода.

На практике общепринятыми методами увеличения глубинности являются *увеличение мощности источника, изменение спектрального состава излучаемых колебаний либо синхронное накопление*. Каждый из этих методов имеет свои ограничения. *Понижение частоты* возбуждаемых колебаний приводит к потере разрешающей способности, а в области частот ниже 20 МГц – к выходу на существенно нелинейную часть дисперсионных кривых, что, в свою очередь, резко сужает область использования полученных при таком возбуждении параметров разреза, т.к. они могут относиться только к узкому частотному диапазону. *Синхронное накопление* имеет ограничения, связанные с разрядностью аналого-цифровых преобразователей и частотой посылок возбуждаемых импульсов. Гораздо быстрее развивается техника в области *увеличения мощности георадаров*, и на этом основании строятся предположения о том, что увеличение мощности георадара в тысячи раз приведет к увеличению глубинности разведки до сотен метров даже в низкоомных высокопоглощающих породах типа глин.

Рассмотрим случай, когда расстояние между приемной и излучающей антеннами много меньше глубин до изучаемых границ. Исходными величинами для расчетов принимаются излучаемая мощность P_0 и форма модуля спектра сигнатуры, т.е. сигнала, который был бы зарегистрирован приемником в случае, когда среда, покрывающая отражающую границу, является идеальным диэлектриком. Первый лепесток спектра сигнатуры достаточно хорошо описывается выражением

$$S_0(\omega) = \sin^3\left(\frac{\pi f}{2 f_0}\right),$$

где f_0 – центральная частота антенны. Глубинность разведки определяется из условия, описанного формулой

$$\frac{P_0 N V^2 (1 + V_0)^2}{16\pi} \cdot \left(\frac{c_1}{f_0}\right)^2 \left[\frac{L(\beta H)}{4H^2}\right] > 4KT\Delta f = 4KT \cdot 0.7 f_0; \quad (4.1)$$

где N – число накоплений, V – коэффициент отражения от изучаемой границы раздела, V_0 – коэффициент отражения от границы «порода-воздух», $(c_1/f_0)^2$ – множитель, учитывающий эффективную площадь антенны, $L(\beta H)$ – фактор, учитывающий потери на поглощение для плоской волны, β – коэффициент поглощения в толще выше изучаемой границы, множитель H^2 учитывает геометрическое расхождение, $K = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град – постоянная

Больцмана, $T \approx 300^\circ \text{ K}$ - температура, Δf - полоса пропускания антенны. В силу указанного выше условия - малости расстояния между антеннами по сравнению с глубиной до границы, коэффициент отражения определяется для нормального падения (угол падения равен 0)

$$V = \frac{\sqrt{\varepsilon(j\omega)_1} - \sqrt{\varepsilon(j\omega)_2}}{\sqrt{\varepsilon(j\omega)_1} + \sqrt{\varepsilon(j\omega)_2}};$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - относительные диэлектрические проницаемости сред по обе стороны границы.

В левой части формулы (4.1) записана мощность волны, отраженной от границы, расположенной на глубине H , в правой части – мощность собственных шумов приемника. Коэффициент поглощения рассчитывается для модели Дебая [32] с задаваемыми параметрами – статической диэлектрической проницаемостью ε_0 , оптической диэлектрической проницаемостью ε_∞ , постоянной времени релаксации τ , электропроводностью σ - и имеет вид:

$$\beta(\omega) = \frac{\omega \sqrt{\varepsilon_\infty}}{3\sqrt{2} \cdot 10^8} \sqrt{a} \sqrt{-1 + \sqrt{1 + \frac{b^2}{a^2}}}; \quad (4.2)$$

$$\text{где } a = 1 + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{\varepsilon_\infty} \cdot \frac{1}{1 + (\omega\tau)^2}; \quad b = \frac{1.13\sigma \cdot 10^{11}}{\omega\varepsilon_\infty} + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{\varepsilon_\infty} \cdot \frac{1}{1 + (\omega\tau)^2}$$

$$\varepsilon(j\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}; \quad - \text{ относительная диэлектрическая проницаемость.}$$

Для диапазона частот, в котором b/a меньше 0.6, коэффициент поглощения принимает вид

$$\beta(\omega) = \frac{60\pi \cdot 1.13\sigma}{\sqrt{\varepsilon_0}} + \left(\frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{\sqrt{\varepsilon_0}} \right) \cdot \frac{\tau\omega^2 \cdot 10^{-8}}{6} \quad (4.3).$$

Для определения потерь, связанных с поглощением, вычислялось отношение амплитуды плоской волны, прошедшей путь $2H$ до отражающей границы и обратно в среде с поглощением $\beta(\omega)$, к амплитуде волны, рассчитанной для расстояния, равного 1м от источника, в идеальной среде. При расчетах форма импульса выбиралась таким образом, чтобы его спектральная характеристика была близка к экспериментальным. Расчет отраженных волн выполнялся в частотной области:

$$S_n(j\omega) = S_0(j\omega)(1 + V_0)X(j\omega),$$

где $S_n(j\omega)$ - спектр отраженной от n-ой границы волны, $S_0(j\omega)$ - спектр сигнатуры, $X(j\omega)$ - функция, описывающая влияние слоистой среды на распространение плоской электромагнитной волны.

$$X_n(j2\pi k\Delta f) = \sum_{k=1}^n \prod_{m=1}^L (1 - V_{m-1}^2(k)) \cdot V_m(k) \cdot \exp\left(-2j2\pi\Delta f \sum_{m=1}^L \frac{h_m}{c_m(k)}\right) \cdot \exp\left[-2\sum_{m=1}^L \beta_m(k)h_m\right] \cdot R(m,k)$$
 Здесь $R(m,k)$ учитывает геометрическое расхождение, c_m - фазовая скорость в слое, Δf - шаг по частоте, остальные обозначения совпадают с приведенными выше. Максимальная амплитуда отраженной волны определялась после обратного преобразования Фурье.

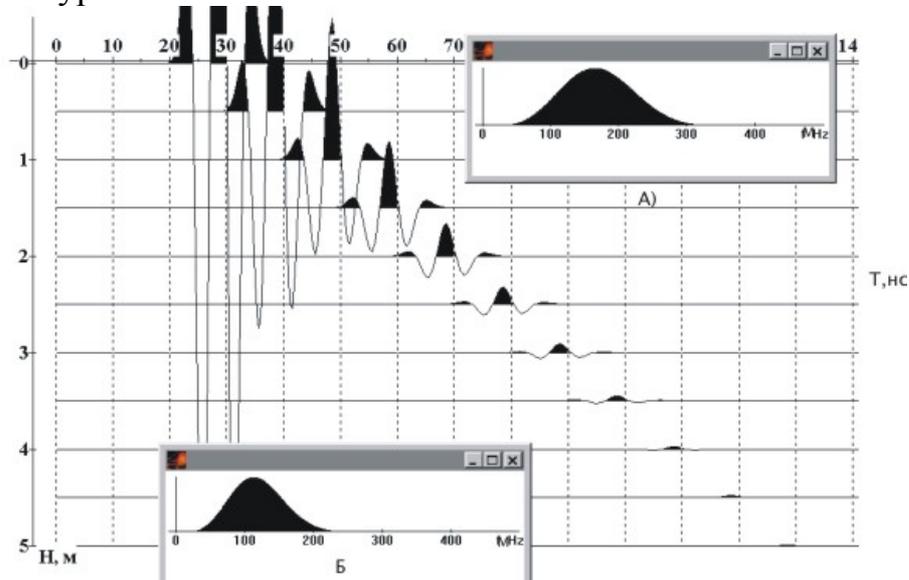
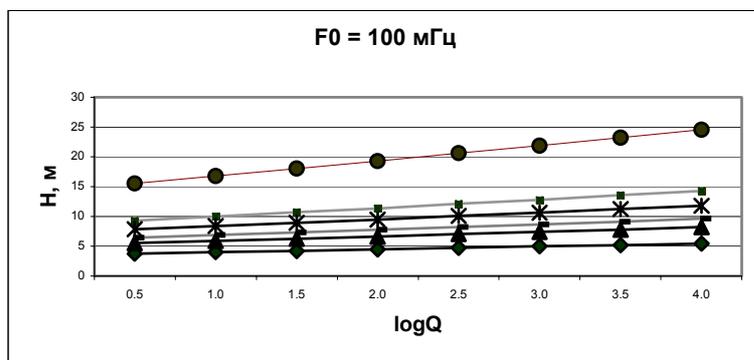


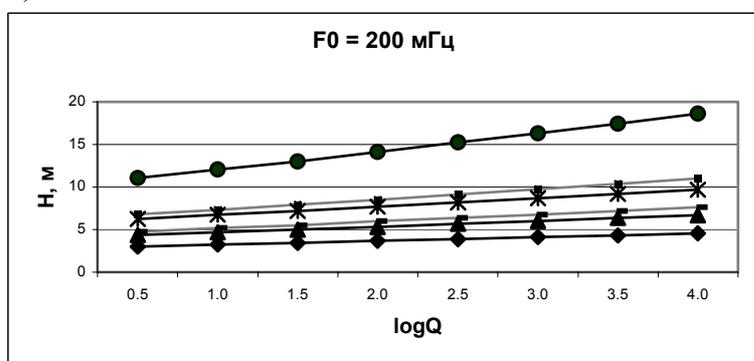
Рис. 4.1. Изменение формы и интенсивности отраженной волны в зависимости от расстояния до отражающей границы. Параметры модели: $\varepsilon_{01} = 9$, $\varepsilon_{\infty 1} = 5$, $\varepsilon_{02} = 9$, $\varepsilon_{\infty 2} = 9$, $\tau = 10^{-10}$ с, $\rho = 1/\sigma = 200$ Ом·м. Центральная частота спектра возбуждаемого сигнала $f_0 = 200$ МГц. А) Амплитудный спектр волны, отраженной от границы, расположенной на глубине 1 м. Б) Амплитудный спектр волны, отраженной от границы, расположенной на глубине 5 м.

На рис.4.1 представлена форма импульса для различных глубин до отражающей границы и амплитудные спектры для минимальной (1м) и максимальной (5м) глубин. На рис. 4.2 (а-в) представлены результаты расчета глубинности исследований как функции десятичного логарифма Q , где $Q = P_0 N V^2$. Отношение $\varepsilon_0 / \varepsilon_\infty$ принято равным 2, $\tau = 10^{-10}$ с, что можно считать типичным для пород верхней части разреза. Расчеты проводились для моделей среды, близких к таким породам, как влажные суглинки ($\varepsilon_0 = 14$; $\rho = 50-100$ Ом·м), приповерхностные влагонасыщенные пески ($\varepsilon_0 = 9$; $\rho = 100-200$ Ом·м) сухой песок ($\varepsilon_0 = 5$; $\rho = 200-500$ Ом·м) [1]. Как видно из рисунков, для любых сред максимальная глубинность разведки прямо пропорциональна $\lg Q$. Линейную зависимость можно продолжить до значения $\lg Q$, равного 5-6 и далее. Полученные результаты имеют исключительно важное прикладное значение. Так, например, рабочая мощность радара типа «Зонд» P_0 примерно равна 200 Вт. При накоплении N , равном 10, и коэффициенте отражения $V = 0.1$, $Q = 20$, $\lg Q = 1.3$. На рис. 4.2а-в показаны значения глубинности исследований для соответствующих значений центральной частоты антенны и

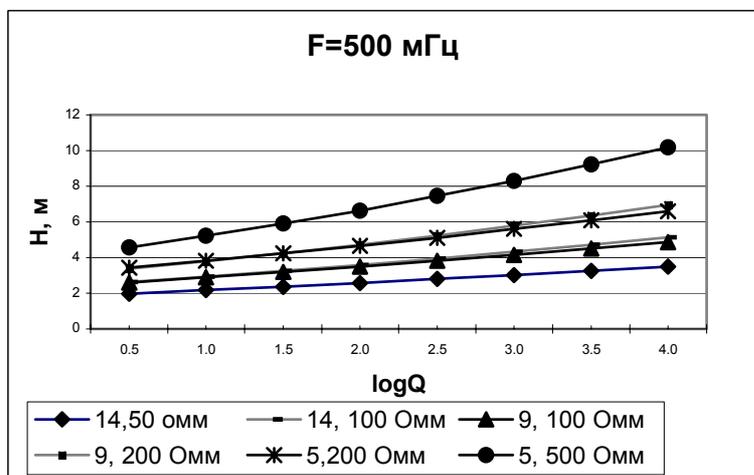
параметров среды. Так, при $\varepsilon_0 = 5$ и $\rho = 1/\sigma = 500$ Омм, максимальная глубинность достигается на частоте 100 МГц и равна 17 метрам,



а)



б)



в)

Рис. 4.2. Графики расчетной глубинности георадарных исследований H (м) в зависимости от десятичного логарифма Q , где $Q = P_0 N V^2$. Параметры моделей среды: $\varepsilon_0 / \varepsilon_\infty \equiv 2$, $\tau \equiv 10^{-10}$ с. $\varepsilon_0=14; \rho=50$ Омм; $\varepsilon_0=14; \rho=100$ Омм, $\varepsilon_0=9; \rho=100$ Омм; $\varepsilon_0=9; \rho=200$ Омм, $\varepsilon_0=5; \rho=200$ Омм; $\varepsilon_0=5; \rho=500$ Омм.

а) $f_0 = 100$ МГц;

б) $f_0 = 200$ МГц;

в) $f_0 = 500$ МГц;

для частоты 500 МГц она составит 5.5 м. Для радара, имеющего мощность 200 000 Вт, при том же коэффициенте отражения от границы $Q = 20000$, $lgQ = 4.3$. Соответственно, как следует из рисунка 4.2, глубинность в этом случае возрастет до 25 м для частоты 100 МГц и до 10 м для частоты 500 МГц. Таким образом, увеличение мощности радара в 1000 раз при данных свойствах среды может привести к увеличению глубинности не более чем в два раза.

Как указано выше, при фиксированном коэффициенте отражения от границы основным фактором, ограничивающим глубинность исследований, является поглощение радиоволн в среде. На рис. 4.3 и 4.4 представлены графики коэффициента поглощения как функции частоты, позволяющие понять специфический вид зависимости глубинности разведки от излучаемой мощности и числа накоплений. На рис. 4.3 показано, как влияет на поглощение уменьшение статической диэлектрической проницаемости ϵ_0 при постоянной оптической диэлектрической проницаемости ϵ_∞ и постоянном времени установления релаксационной поляризации $\tau = 10^{-10}$ с. Из рисунка следует, что в диапазоне частот от 0 до 200 МГц значения коэффициента поглощения остаются практически неизменными, а на более высоких частотах коэффициент поглощения растет тем быстрее, чем выше отношение $\epsilon_0 / \epsilon_\infty$. В то же время изменение времени релаксации очень резко влияет на коэффициент поглощения. Как показано на рис. 4.4, при постоянных значениях статической и оптической диэлектрической проницаемости и проводимости, изменение времени релаксации от 10^{-11} с до 10^{-10} с приводит к росту коэффициента поглощения уже на частоте 200 МГц в 1.5 раза, а на частоте 500 МГц в 3 раза.

Коэффициент поглощения, являющийся главным фактором, ограничивающим глубинность разведки, зависит от проводимости, диэлектрической проницаемости и механизма поляризационных потерь. Каким бы ни был этот механизм, поляризационные потери приводят к появлению второго слагаемого в формуле(4.5), имеющего сложную зависимость от частоты. Это означает, что верхняя граница глубинности может быть определена только при учете собственно проводимости пород. На рис. 4.5 показана глубинность разведки при учете поляризационных потерь ($\tau = 10^{-10}$ с) и без этих потерь ($\tau = 10^{-12}$ с).

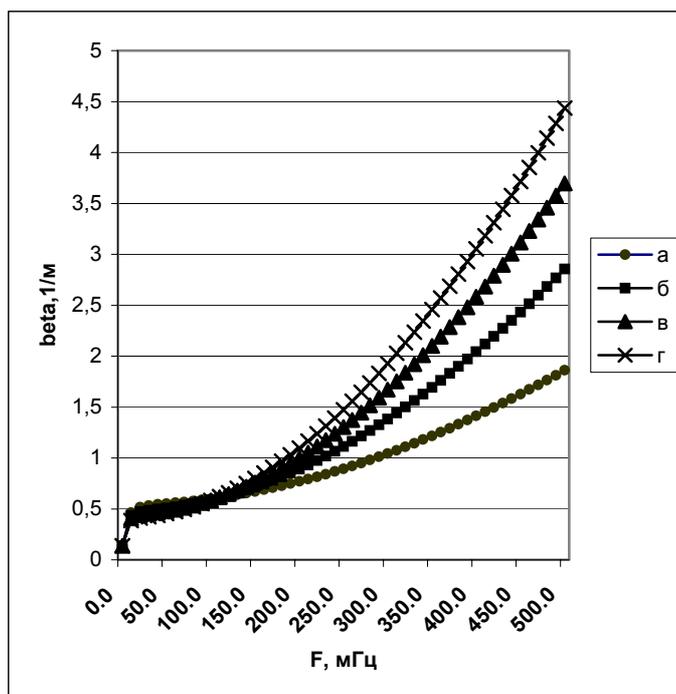


Рис. 4.3. Графики зависимости коэффициента поглощения β от частоты для моделей сред с различными соотношениями $\epsilon_0 / \epsilon_\infty$.

а) $\epsilon_0 = 12$; $\epsilon_{0\infty} = 9$; $\rho = 100$ Ом. $\tau = 10^{-10}$ с.

б) $\epsilon_0 = 15$; $\epsilon_{0\infty} = 9$; $\rho = 100$ Ом. $\tau = 10^{-10}$ с.

в) $\epsilon_0 = 18$; $\epsilon_{0\infty} = 9$; $\rho = 100$ Ом. $\tau = 10^{-10}$ с.

г) $\epsilon_0 = 21$; $\epsilon_{0\infty} = 9$; $\rho = 100$ Ом. $\tau = 10^{-10}$ с.

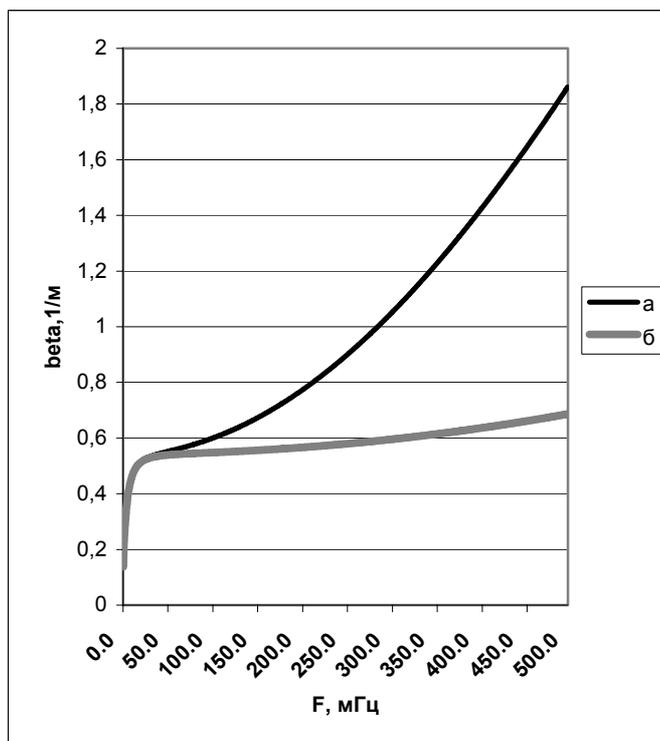


Рис. 4.4. Графики зависимости коэффициента поглощения от частоты для моделей сред с различной постоянной времени релаксации.

- а) $\varepsilon_0=12$; $\varepsilon_{0\infty}=9$; $\rho=100$ Ом·м. $\tau=10^{-10}$ с
 б) $\varepsilon_0=12$; $\varepsilon_{0\infty}=9$; $\rho=100$ Ом·м. $\tau=10^{-11}$ с

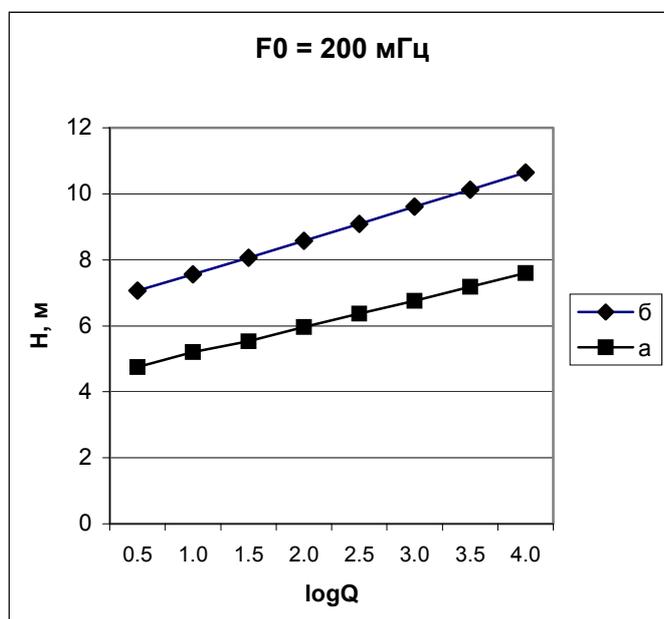


Рис. 4.5. Графики расчетной глубинности георадарных исследований H (м) в зависимости от десятичного логарифма Q при учете поляризационных потерь (а) и без их учета (б).

- а) $\varepsilon_0=14$; $\rho=100$ Ом·м, $\tau=10^{-10}$ с.
 б) $\varepsilon_0=14$; $\rho=100$ Ом·м, $\tau=10^{-12}$ с.

Как следует из рисунка, логарифмическая зависимость глубины разведки от мощности возбуждения сохраняется в обоих случаях, но глубинность увеличивается с уменьшением потерь на поляризацию.

Таким образом:

- максимальная глубинность георадарных исследований прямо пропорциональна десятичному логарифму произведения мощности георадара на число накоплений;
- главным фактором, ограничивающим глубинность, является частотно-зависимое поглощение, которое, в свою очередь, зависит от проводимости породы и механизма поляризационных потерь.

4.2 Разрешающая способность и детальность георадарных исследований

Разрешающей способностью по глубине называют минимальное расстояние по глубине, на котором могут быть различимы два отражающих объекта или их детали.

Пространственной разрешающей способностью называется минимальное расстояние по горизонтали, на котором могут быть различимы два отражающих объекта или их детали.

Пространственная разрешающая способность определяется радиусом первой зоны Френеля (см. выше), то есть размерами площадки, в основном участвующей в формировании отраженного сигнала. Два или более отражающих объектов в пределах этой площадки будут неразличимы на записи.

Детальность или *интервал наблюдений по профилю* зависит как от свойств аппаратуры и способа наблюдений, так и от свойств среды, однако в большей степени она зависит от требований решаемой задачи и определяется двумя характеристиками - количеством сигналов, возбуждаемых и принимаемых в единицу времени, и скоростью перемещения по профилю при работе в движении. При работе в фиксированных точках детальность полностью определяется требованиями задачи исследований. В варианте для решения геологических задач достаточна детальность в десятки сантиметров, а в случае изучения тонкой структуры среды на высоких частотах детальность может достигать 1 - 2 см.

Другие задачи исследований по своим требованиям к глубинности, разрешающей способности и детальности лежат между этими крайними случаями и, соответственно, нуждаются в выборе аппаратуры с необходимой центральной частотой излучения и способа наблюдений в поле.

В ряде случаев детальность делают избыточной с точки зрения пространственной разрешающей способности. Несмотря на то, что это очевидным образом приводит к увеличению объема и удорожанию работ, для лучшего прослеживания слабоконтрастной (с маленьким коэффициентом отражения) и шероховатой границы (что еще уменьшает отражательную способность границы) необходимо обеспечить перекрытие отражающих площадок для пространственного накопления отраженных сигналов и осреднения неровностей границы.

4.3. Наблюдения на постоянной и переменной базах

Полевые наблюдения сводятся к двум принципиально различным способам. Первый и наиболее распространенный состоит в перемещении антенн с постоянным разносом в первые сантиметры для высоких частот и в первые метры для низких частот вблизи поверхности земли или непосредственно по поверхности, если антенны конструктивно это позволяют.

Второй способ состоит в последовательном увеличении разноса между антеннами от десятков сантиметров до 5 - 10 метров. Цель таких наблюдений состоит в получении графика зависимости времени прихода отраженных волн от расстояния (годографа) и получении с помощью последующей обработки сведений о скоростях распространения волн в среде. В случае специально подобранной серии таких профилей с перекрытием результаты могут быть обработаны по известному в сейсморазведке методу общей глубинной

точки (МОГТ), позволяющему определить скорости волн и пересчитать разрез из масштаба времен в масштаб глубин без привлечения априорной информации. Однако, из-за огромных затрат времени и средств на производство работ, такая методика применяется весьма редко в сравнении с профилированием на постоянной базе.

4.4. Проектирование методики наблюдений

Проектирование методики георадиолокационных наблюдений начинается на стадии получения технического задания на производство работ. В оптимальном случае техническое задание включает в себя карту с изолиниями рельефа, геологические сведения о строении разреза (геологическую основу) в виде колонок скважин, результатов шурфовки, геологических разрезов с гидрогеологической нагрузкой, сведения о проводимости и, значительно реже, о диэлектрической проницаемости пород. В случае техзадания на обследование инженерного сооружения или его элементов должны быть чертежи конструкций, данные о материалах элементов сооружения и описание штатного состояния элементов сооружения и сооружения в целом. В техническом задании должны содержаться сведения об объекте исследований - геологической границе, искомых или обследуемых локальных объектах (размеры, форма, материал, глубина залегания) и вмещающем их материале (вид материала, его агрегатное состояние, проводимость, влажность). На основании этих сведений, а если они не полны, то с привлечением справочных данных, строится примерная георадиолокационная модель разреза (объекта).

Сюда входят:

- тип волн, с помощью которых будет обследоваться объект - дифракционные или отраженные;
- максимальная и минимальная предполагаемые глубины до объекта и его предполагаемые размеры (если объект имеет конечные размеры, например, диаметр трубопровода, размеры подземных выработок, подвалов и т.д.);
- примерный коэффициент отражения от объекта, потери на прохождение промежуточных границ, затухание в среде в виде зависимости от длины волны с использованием приведенных выше формул.

Далее, исходя из требуемой по условиям технического задания разрешающей способности или размеров обследуемого объекта, выбирается требуемая длина волны, опираясь на центральную частоту зондирующего сигнала. Например, для достижения разрешающей способности в 0.5 метра необходимо выбрать зондирующий сигнал с преобладающей длиной волны не более 1 метра в грунте для соблюдения условия: разрешающая способность по глубине не менее половины длины волны. Если же речь идет о картировании дифрагирующего объекта, то длина волны должна в два или более раз превышать его характерный размер, например, диаметр трубопровода.

На основе этих расчетов производится выбор центральной частоты исследований и соответствующая антенная система для конкретного георадара,

которая должна обеспечить запись полезного сигнала (соответствующей дифрагированной или отраженной волны), по крайней мере, в пределах указанного в паспорте прибора динамического диапазона записи. Например, если расчеты показывают суммарное ослабление полезного сигнала в 100 дБ для данной центральной частоты сигнала, а паспортный динамический диапазон записи 80 дБ, то выбранная антенная система непригодна для решения задачи, хотя бы и обеспечивала требуемую разрешающую способность.

В ряде случаев приходится жертвовать высокой разрешающей способностью георадиолокационных исследований для достижения требуемой глубины и применять антенную систему с меньшей центральной частотой зондирующего сигнала и, соответственно, большей длиной волны.

Следующим этапом проектирования методики наблюдений является прокладка профилей и выбор скорости перемещения по профилю или шаг между точками наблюдений. При картировании протяженных границ профили прокладываются (если позволяет рельеф, застройка, другие препятствия) от скважины или шурфа в направлении другой скважины или шурфа или иных опорных пунктов определения параметров разреза. Нередко длина и положение профилей указаны в техзадании. При поиске и картировании протяженных объектов, длина которых много больше поперечных размеров, профили располагаются перпендикулярно объекту, например, трубопроводу. При поиске и картировании примерно изометричных в плане локальных объектов проектируется ряд параллельных профилей, покрывающий обследуемую площадь.

Интервал между профилями при этом выбирается исходя из соображений частичного (например, до 50%) перекрытия зон Френеля (см. выше) для отражающих объектов.

Скорость движения по профилю или интервал между точками возбуждения и приема сигналов для обеспечения пространственного накопления сигналов выбираются исходя из 80 - 90% перекрытия зон Френеля. Например, при длине волны 1 метр, глубине целевой границы 4 метра радиус зоны Френеля равен $\approx 1,5$ метра. Перекрытие в 90% даст шаг наблюдений в 20 сантиметров вдоль профиля. При частоте актов "возбуждение-прием" 14 раз в секунду («Зонд-12») такую плотность наблюдений обеспечит скорость перемещения 2.8 метра в секунду. Если ввести суммирование, например по 4 трассы при записи для двукратного улучшения соотношения сигнал/шум, то скорость перемещения станет примерно равной медленному прогулочному шагу.

При пересечении профилем вытянутого дифрагирующего объекта типа трубопровода, шаг наблюдений по профилю или скорость перемещения выбираются с учетом того, что дифрагированные волны прослеживаются, как правило, в интервале 1.5 - 2 глубины заложения верхней кромки объекта в обе стороны от его оси.

Временной интервал записи (развертка) должен, по крайней мере, превышать двойное время пробега до самого глубокого объекта исследований.

Основанием для выбора интервала записи служат сведения о глубинах и предполагаемые или заранее известные значения скоростей распространения электромагнитных волн в среде.

Выбор усиления записи - постоянного коэффициента и ВАРУ (положения соответствующих ручек на панели прибора или соответствующих параметров программы, управляющей посылками и приемом сигналов) - осуществляется непосредственно в начале полевых наблюдений. Антенны размещают в рабочем положении в начале профиля и производят пробные посылку и прием сигналов, обеспечивая индикацию на экране дисплея в режиме "трасса", то есть индикацию каждой трассы методом отклонений. При этом обращается внимание на возможную ограниченность наиболее интенсивных сигналов в начальной части записи и распределение интенсивности на всем интервале записи. Оптимально подобранные параметры усиления должны обеспечить запись без ограничения по амплитуде и сравнимые интенсивности сигналов в начале и в конце интервала регистрации.

Рекомендации по выбору параметров фильтрации стробоскопированных сигналов при записи содержатся в описании работы каждого конкретного георадара.

4.5. Волновая картина и способы ее изображения, оси синфазности, годографы

Волновая картина (радарограмма) представляет собой ансамбль записей сигналов (трасс), пришедших к приемной антенне в интервал времени от 0 - момента посылки зондирующего импульса, до конца интервала записи (развертки), выставленного оператором. Горизонтальная ось радарограммы - ось **X**, ось профиля в метрах. Начальные точки трасс располагаются на этой оси с тем шагом, с которым они были записаны на профиле. Вертикальная ось волновой картины - ось времени с началом $t = 0$ - моментом посылки зондирующего импульса и концом t_{\max} , соответствующим концу интервала записи (развертки). Различия в способах изображения волновой картины состоят в различном изображении амплитуды сигнала в каждый момент времени.

Первый способ - изображение амплитуд отклонениями, то есть чем больше амплитуда сигнала, тем больше отклонение трассы от нулевого положения. При этом отклонения вправо соответствуют положительным амплитудам, а отклонения влево соответствуют отрицательным амплитудам сигнала (см. рис. 4.6).

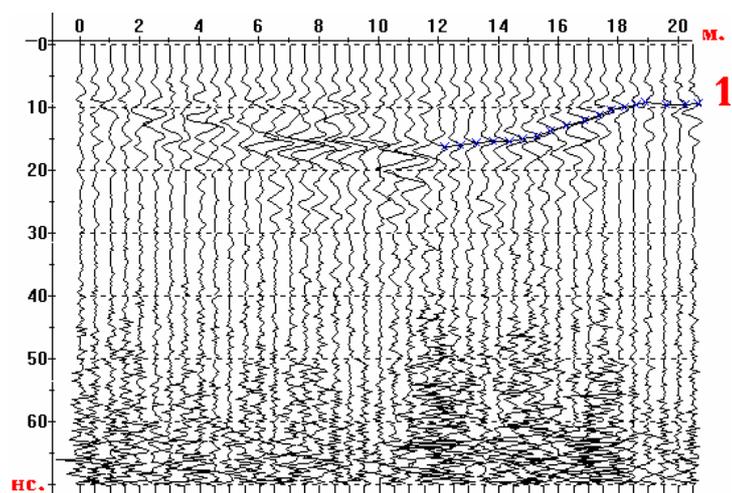


Рис.4.6. Отображение радарограммы методом отклонений. 1 - пример прокоррелированной оси синфазности отраженной волны.

Второй способ - представление трассы методом отклонений с зачернением положительных амплитуд (отклонений вправо). Этот способ помогает выделять на соседних трассах одноименные фазы, например, положительные или отрицательные фазы импульсов, отразившихся от соседних участков границы (рис. 4.7).

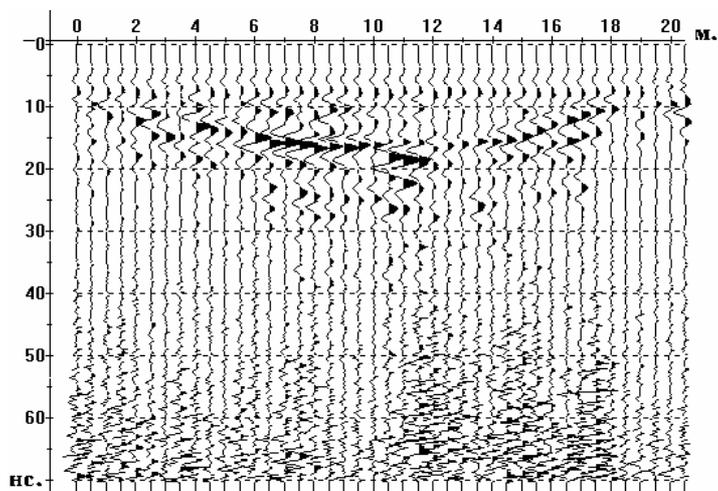


Рис. 4.7. Отображение радарограммы методом отклонений с зачернением.

Третий способ - изображение методом переменной плотности, то есть когда нулю амплитуды сигнала соответствует серый фон, положительным амплитудам соответствуют все более темные тона вплоть до черного, а отрицательным амплитудам сигнала соответствуют все более светлые тона вплоть до белого. В этом случае трасса на экране дисплея занимает вертикальную полосу шириной в одну точку, и на экране (в зависимости от его типа) может быть размещено до 640 трасс (рис. 4.8).

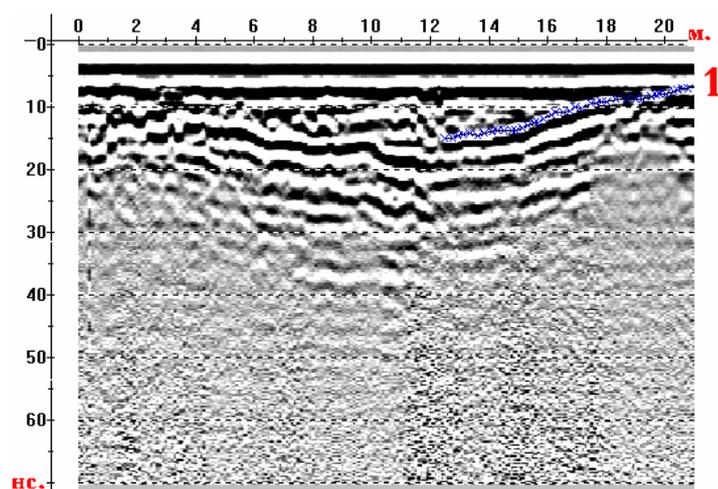


Рис. 4.8. Отображение радарограммы методом переменной плотности. 1 - подчеркнута ось синфазности отраженной волны.

Ось синфазности - линия равных фаз одинаковых сигналов на соседних трассах. Например, линия, соединяющая максимумы отраженной от границы раздела волны, линия, соединяющая максимумы (минимумы) волны дифракции от трубопровода и т.д. (рис. 4.6 и 4.8).

С помощью выделения таких линий строится изображение объекта исследований на волновой картине.

В случае отражающей границы ось синфазности практически повторяет ее форму и при знании скорости распространения волн в среде (или диэлектрической проницаемости) может быть перестроена непосредственно в отражающую границу в масштабе глубин.

В случае дифракции от локального объекта, например, трубопровода, ось синфазности имеет форму гиперболы, с помощью которой можно определить глубину до дифрагирующего объекта и скорость распространения волн в толще пород над объектом (см. ниже). Пример приведен на рисунке 4.9.

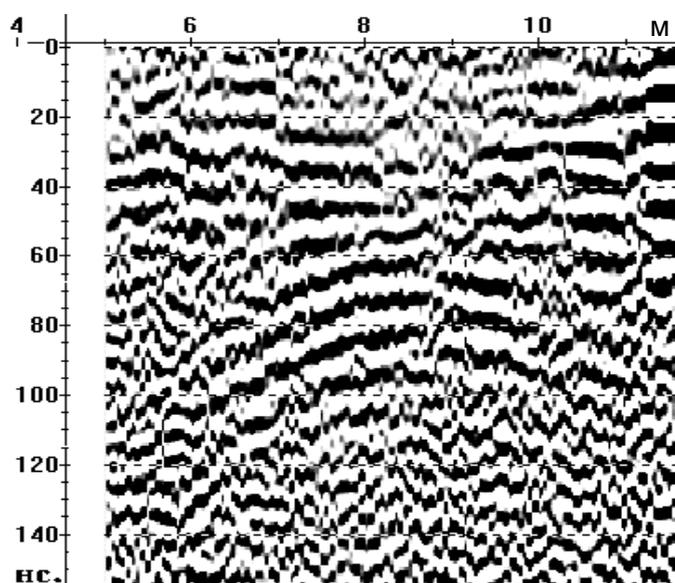


Рис. 4.9. Пример гиперболической оси синфазности волны, дифрагированной от объекта на глубине 2.9 метра при средней скорости волн 10 см/нс.

При работе с неподвижной излучающей антенной и перемещающимся приемником ось синфазности отраженной волны также имеет форму гиперболы и может быть использована для определения скорости распространения волн в среде над отражающей границей.

Годографы волн - графики зависимости времени прихода волны в данную точку профиля в зависимости от координаты положения точки на профиле. Практически годограф строится по выбранной оси синфазности волны и полностью повторяет ее форму. Необходимость построения годографов возникает лишь в случае работ с увеличивающимися разностями между источником и приемником, либо при работе с дифрагированными волнами для использования уравнений годографов при определении скоростей распространения волн.

Уравнение годографа отраженной волны:

$$t = (\sqrt{x^2 + 4h^2}) / V,$$

где t - время точки на оси синфазности, снятое с радарограммы, h - глубина до отражающей границы, x - расстояние от излучающей антенны до приемной, V - скорость распространения волн в слое над границей.

Уравнение годографа дифрагированной волны:

$$t = (2\sqrt{x^2 + h^2}) / V,$$

где t - время точки на оси синфазности, снятое с радарограммы, h - глубина расположения дифрагирующего объекта, x - расстояние от точки над объектом до точки приема, V - скорость распространения волн в слое над объектом.

На волновой картине (радарограмме) представлены три вида волн: полезные волны, волны-помехи и шум.

Полезные волны. Сюда могут относиться волны разных типов в зависимости от поставленной в техническом задании задачи исследований. Чаще всего это могут быть однократные отражения от целевых горизонтов и дифрагированные волны от целевых объектов.

Волны-помехи. Это волны, не представляющие интереса с точки зрения задачи исследований, но присутствующие на записи, образующие интерференционную картину с полезными волнами и затрудняющие выделение полезных волн. Сюда относятся аппаратные помехи типа прямого проникновения сигнала из источника в приемник, многократные отражения от неглубоких границ, множество дифрагированных волн от трещин, валунов и т.д., затрудняющих расшифровку волновой картины, распространяющиеся по воздуху отраженные и дифрагированные волны от стен и углов зданий, объектов на поверхности земли и над ней (рис. 4.10).

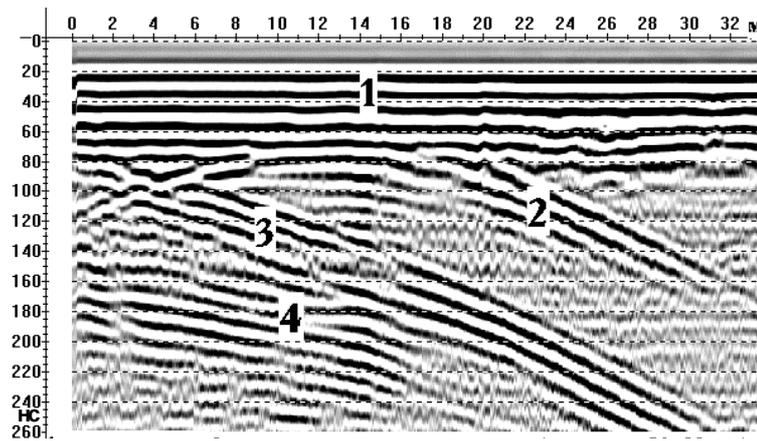


Рис. 4.10. Пример записи с волнами помехами: прямая волна (1), волна в воздухе от проводов - гипербола, $V = 30$ см/нс (2), волна в воздухе от стены здания (3), полезные отраженные волны (4).

Шум. Представляет собой нерегулярную компоненту волновой картины, где невозможно выделить какие-либо оси синфазности.

Причиной образования шума являются нерегулярные электромагнитные процессы в самой аппаратуре георадиолокационного зондирования и внешние электромагнитные поля естественного и искусственного происхождения. Амплитудные и энергетические соотношения сигнал/шум на волновой картине определяют в большинстве случаев степень сложности обработки и общую эффективность георадиолокационных исследований.

4.6. Математическое моделирование радарограмм.

Решение прямой задачи георадиолокации также как и решение прямых задач в сейсморазведке и других геофизических методах имеет одной из главных целей прогнозирование волнового поля. Если эта задача более или менее успешно решается, то ее результаты используются для оценки возможностей решения поставленной геологической и (или) инженерной задачи с помощью георадиолокации, для расчета методики наблюдений, для построения графа обработки будущих полевых данных.

Задача математического моделирования разбивается на несколько этапов. Прежде всего – это построение георадиолокационной модели разреза по набору данных о среде. Помимо геологических сведений о породах, слоях, их мощностях, чередовании, характере границ необходимы сведения об электрофизических свойствах – проводимости и диэлектрической проницаемости, которые, как это было показано выше, связаны с воздухо- и влагонасыщением, температурой и т.д. Степень генерализации модели, то есть упрощение, отказ от частных особенностей, таких как неровности границ, неидеальная форма дифрагирующих тел, трехмерный характер разреза, изменчивость свойств по латерали – зависят от возможностей собственно инструмента моделирования. Так в наименьшей степени перечисленные упрощения требу-

ются при моделировании волновых полей методом конечных разностей. Однако, в георадиолокации этот прогрессивный метод математического моделирования еще не нашел широкого применения.

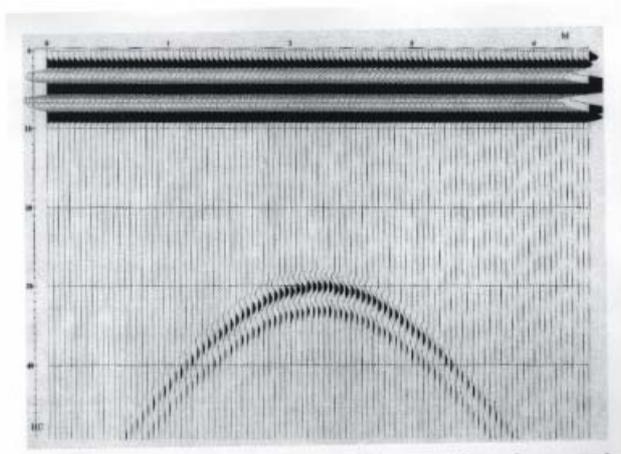
Другой подход, реализованный в широких масштабах в сейсморазведке, состоит в расчете каждой трассы на радарограмме в соответствии с лучевым подходом к распространению радиоволн в геологической среде и в соответствии с описанным выше взглядом на трассу как на свертку исходного импульса с импульсной характеристикой среды или результат обратного преобразования Фурье от произведения спектра исходного импульса с частотной характеристикой среды.

Специфическими особенностями математического моделирования в радиолокации в отличие от сейсморазведки являются задание коэффициентов отражения на границах слоев и задание выражения для учета поглощения электромагнитных волн. Отдельно и иначе, чем в сейсморазведке следует рассматривать вопросы дифракции электромагнитных волн на локальных неоднородностях.

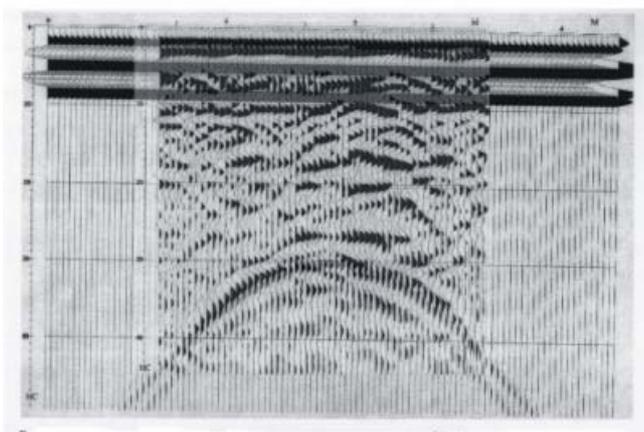
Несмотря на ряд упрощений модели разреза и упрощенных взглядов на распространение электромагнитных волн в сложнопостроенной среде, результат такого математического моделирования может быть весьма полезен. Критерием того, что сделанные допущения и упрощения не свели на нет собственно идею получения синтетической радарограммы, может служить сравнение полевых радарограмм с синтетическими, рассчитанными для модели среды, где получены полевые записи. На основании близости кинематических и динамических характеристик двух записей можно судить о том, что данный способ моделирования (способ задания модели среды, использованная теория распространения волн, вычислительная схема) пригоден для решения прямой задачи георадиолокации.

В качестве примера математического моделирования ниже приводится рисунок, на котором результат моделирования сопоставлен с полевой записью (4.11).

Таким образом, приведенный пример показывает возможности математического моделирования для приблизительной оценки кинематики и динамики дифрагированных волн от дифрагирующих объектов типа труб различного диаметра, расположенных в однородной среде. По результатам таких расчетов можно оценивать относительную интенсивность дифрагированной волны, определять ее зону прослеживаемости вдоль профиля, что важно для выработки параметров методики будущих полевых наблюдений.



1



2

Рис. 4.11 Синтетическая радарограмма над моделью разреза (1) – труба диаметром 0,6 м на глубине 1,2 м в песчаных отложениях с влажностью 23% и проводимостью 0,008 См/м и она же, совмещенная с полевой записью (2) над разрезом, по которому составлена модель для расчетов синтетики.

Глава 5. ОБРАБОТКА ДАННЫХ

[6, 7, 13, 15 – 17, 19]

Сущность обработки георадиолокационных данных состоит, прежде всего, в выделении полезного сигнала (осей синфазностей полезных волн) на фоне помех и шума. А затем уже полезные волны, их оси синфазности, амплитуды, частотный состав, общий вид записи и т.д. используются для получения параметров среды. Для выделения полезных сигналов используют отличие их характеристик от соответствующих характеристик шума и волн-помех. Опираясь на эти отличия, с помощью разнообразных приемов преобразования сигналов, волны-помехи стараются ослабить, удалить с записи или хотя бы опознать их на записи и не принимать за полезные волны.

Ниже приводится описание основных приемов анализа и преобразования сигналов для выделения полезных волн на фоне помех и шумов и улучшения отображения особенностей реального разреза на радарограмме.

Это описание проводится на примере обрабатывающей системы «RadExPro» (продукт фирмы «Деко - геофизика»)

5.1. Ввод-вывод данных. Формат записи

Ввод данных - первая процедура в любой системе обработки. Ввод осуществляется, как правило, с дискет, на которые были скопированы полевые данные из памяти компьютера георадара. Полевые данные записаны в формате, принятом в фирме-производителе данного георадара. Это может быть один из международных форматов типа SEG-Y, SEG-2 и т.д., либо формат, принятый только в данной фирме. В общем случае такой формат называется “user format”.

Собственно формат записи цифровых данных в виде одномерного массива, где числа, соответствуют амплитуде сигнала в каждый момент времени, представляет собой правило формирования файла данных, состоящее из внешней характеристики формата и его описания (если оно требуется).

Внешняя характеристика формата состоит из четырех позиций:

1. числа байт, отводимых на паспорт файла записи;
2. числа байт, отводимых на паспорт каждой трассы;
3. числа точек в каждой трассе;
4. указания типа чисел, последовательность которых составляет трассу - простые действительные R4, целые двухбайтовые I2 и т.д.

Паспорта файла и трассы могут содержать информацию о параметрах сбора данных - профиле наблюдений, усилениях, фильтрациях, дате работ, метках оператора и т.д.

Описания паспортов файлов и трасс - это многостраничные тексты. Опираясь только на характеристику формата, можно ввести записи в программу обработки, не расшифровывая паспорта файла и трасс. Если есть необходимость воспользоваться информацией, содержащейся в паспортах, то

система обработки должна быть снабжена соответствующей данному формату процедурой чтения информации в паспортах.

Вывод промежуточных или окончательных результатов обработки в цифровом виде производится в формате, который позволяет задать данная система обработки.

Вывод промежуточных или окончательных результатов обработки на принтер не требует задания формата вывода в указанном выше смысле, но требует соответствующих установок режима печати в соответствии с требованиями программной среды, в которой существует система или программа обработки георадарных данных (DOS, WINDOWS и т.д.).

Пример характеристики "user format":

256, 0, 512, I2,

где

- 256 байт отведено на паспорт файла;
- 0 байт отведено на паспорт трассы (его нет);
- 512 слов (точек) записано в каждой трассе;
- каждое слово представляет собой целое двухбайтовое число.

5.2. Просмотр и редактирование данных

Цель этой операции состоит в подготовке данных к последующей обработке. Нередко полевые данные не нуждаются в редакции, но всегда производится их просмотр. Для этого введенные радарограммы визуализируются на экране компьютера, прежде всего методом переменной плотности в максимально сжатом виде - по трассе на каждую точку экрана по горизонтали. Это позволяет осмотреть сразу максимальный объем материала. Определяются следующие параметры:

- наличие участков записи, не подлежащих включению в процесс дальнейшей обработки - записи калибровочных сигналов, пропуски на записи, бракованные в результате аппаратурных сбоях участки записи;
- выбирается интервал времени для последующей обработки, который может быть равен или меньше интервала времени при записи в поле;
- выбирается количество трасс на единицу длины профиля исходя из условий задачи исследований;
- выбирается количество трасс на экране для будущей печати результатов обработки - печати в заданном горизонтальном масштабе.

На основании просмотра и при необходимости производится редакция данных:

- удаление отдельных трасс или групп трасс;
- уменьшение интервала времени для обработки;
- прореживание или интерполяция в соответствие с новым шагом по профилю;

- выделяются в самостоятельные объекты обработки части файлов полевых записей или производится объединение нескольких файлов полевых записей в единый файл.

5.3. Коррекция амплитуд

Коррекция амплитуд возможна в двух видах. Во-первых, это изменение коэффициента усиления записи - единого множителя для всех отсчетов вдоль трассы (по оси времени) и по профилю (для всех трасс). Операция производится для того, чтобы сделать волновую картину более “яркой”, или для того, чтобы, дискретно уменьшая величину общего коэффициента усиления, увидеть, как относительно слабые отражения “исчезают” с волновой картины.

Во-вторых, возможно производство операций с целью выравнивания динамического диапазона записи волнового поля. Это введение коэффициента усиления, линейно или экспоненциально растущего с увеличением времени вдоль трассы, - фактически, это аналог ВАРУ при записи в поле. При этом позже приходящие отражения с больших глубин становятся большими по амплитуде и сравнимыми с волнами в начале записи. Параметрами такой регулировки усиления являются величина начального коэффициента усиления, скорость роста коэффициента усиления со временем и закон увеличения коэффициента усиления со временем. Параметры регулировки задаются, как правило, в системе обработки в соответствии с инструкцией пользователя.

Автоматическая регулировка усиления (АРУ) также служит для выравнивания или сжатия динамического диапазона записи.

Выполняется она следующим образом: в выбранном скользящем окне высокоамплитудные сигналы ослабляются, а низкоамплитудные усиливаются. В результате на выровненной записи могут быть прокоррелированы оси синфазности слабых отражений. Параметрами автоматической регулировки усиления являются ширина окна выравнивания амплитуд, степень выравнивания в окне, шаг скольжения окна вдоль трассы и величина интервала времени, где действует АРУ.

Эти параметры процедуры также устанавливаются пользователем.

Примеры регулировок амплитуд приведены на рисунках 5.1 - 5.3.

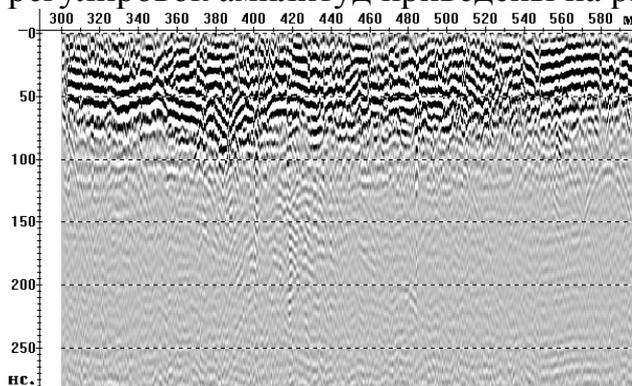


Рис. 5.1. Запись без регулировки усиления.

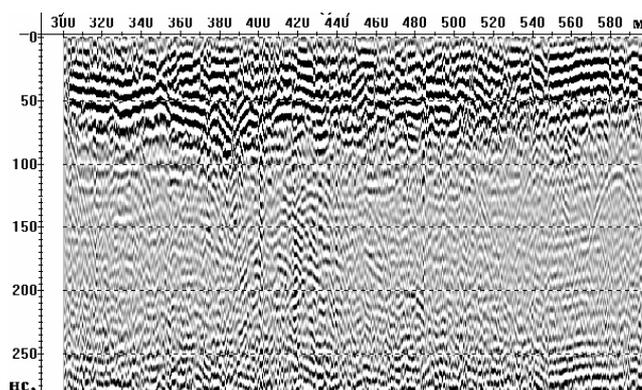


Рис. 5.2. Запись с программной регулировкой усиления по экспоненте 80 дБ / мкс.

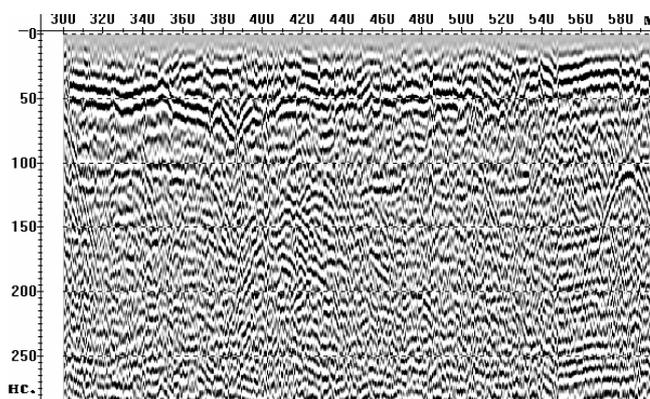


Рис 5.3. Запись с автоматической регулировкой усиления в скользящем окне 50 точек.

5.4. Линейная обработка сигналов (фильтрация)

Эта процедура производится в тех случаях, когда частотный спектр помехи или шума занимают на оси частот интервал, отличный или лишь частично перекрывающийся с частотным диапазоном сигнала. В этом случае частотная фильтрация позволяет ослабить помеху и (или) шум, практически без ослабления и искажения сигнала. В тех случаях, когда частотные диапазоны помехи и полезного сигнала значительно перекрываются или совпадают, частотная фильтрация может не приводить к улучшению результата с точки зрения обнаружения или более уверенного прослеживания осей синфазности полезных волн. Выполняется процедура следующим образом: в системе или программе обработки имеется набор фильтров со своими параметрами, из которых конкретный вид фильтра выбирается пользователем, затем трасса подвергается прямому преобразованию Фурье, полученный комплексный спектр трассы умножается на комплексный спектр фильтра, и результат подвергается обратному преобразованию Фурье.

Результат процедуры - весь набор трасс, составляющих радарограмму, каждая из которых подвергнута вышеописанной процедуре. Параметрами

процедуры фильтрации являются вид фильтра (например, полосовой с трапецидальными срезами, Баттерворта, Ормсби и т.д.), полоса частот фильтра, крутизны срезов частотной характеристики фильтра. Все параметры задаются пользователем в соответствии с инструкцией к соответствующей системе или программе обработки.

Пример полосовой фильтрации приведен на рисунках 5.4 и 5.5

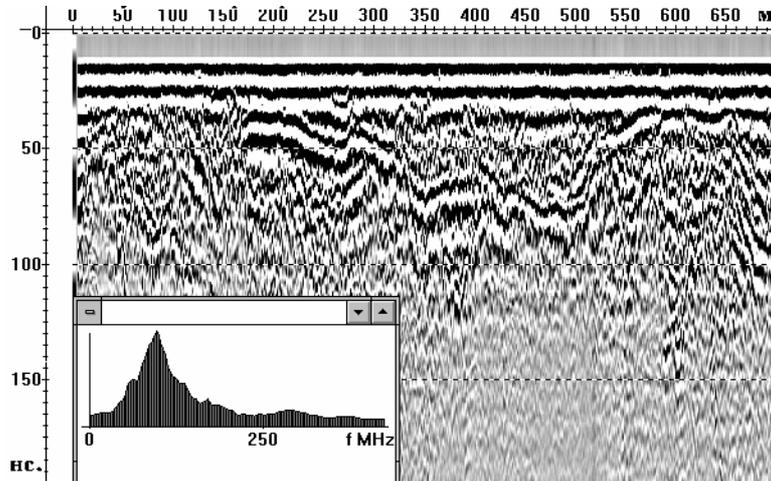


Рис. 5.4. Полевая запись и модуль спектра трассы.

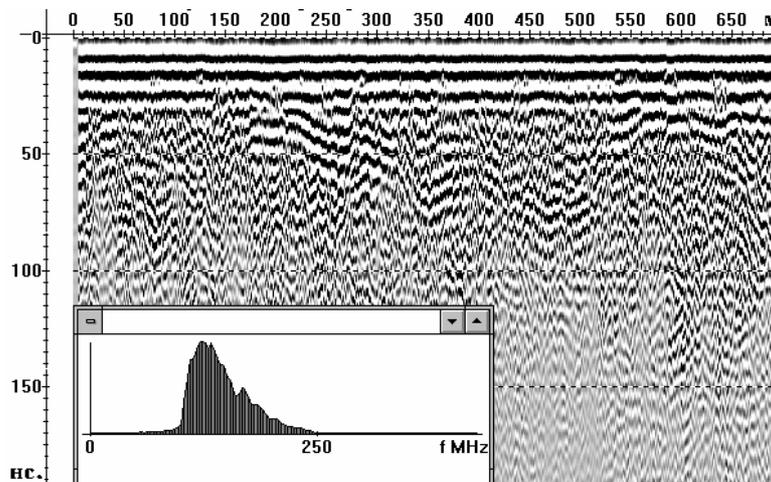


Рис. 5.5. Результат высокочастотной фильтрации и модуль спектра трассы.

5.5. Повышение разрешающей способности (деконволюция)

Процедура служит для сжатия зондирующего импульса, с которым получена радарограмма, уменьшения его длительности, соответствующего уменьшения интервала на трассе, "закрытого" отраженной волной, и тем самым повышения возможности выделить на записи оси синфазности отраженных волн от близких границ или объектов.

Процедура может быть выполнена в двух видах - в виде импульсной деконволюции или в виде предсказывающей деконволюции. Импульсная деконволюция использует форму зондирующего импульса, на комплексный спектр которого делится комплексный спектр трассы. В идеальном случае на результате обратного преобразования Фурье должны остаться узкие пики, положение которых соответствует временам прихода отражений. Практически же на результирующей трассе остаются многофазные импульсы, но более короткие по времени, чем исходный зондирующий сигнал. Это связано с тем, что все перечисленные операции могут быть выполнены только в ограниченной полосе частот, где спектр зондирующего импульса не обращается в нуль.

Предсказывающая деконволюция не требует знания формы зондирующего сигнала, который может меняться вдоль профиля из-за изменений электрофизических свойств приповерхностного слоя грунта, а использует автокорреляционную функцию собственно трассы в некотором задаваемом скользящем окне для “сжатия” отраженных импульсов. Параметрами этой процедуры являются величина скользящего окна, шаг предсказания (изменения отсчетов на трассе) и допустимая степень высокочастотных искажений результирующего сигнала (уровень добавленного шума).

Как правило, в системах обработки отдается предпочтение именно предсказывающей деконволюции как более гибкому инструменту в сравнении с импульсной деконволюцией.

Пример применения деконволюции приведен на рисунках 5.6 и 5.7.

После применения деконволюции стали отчетливо видны оси синфазности отражений от поверхности влагонасыщенного песка, ранее скрытые прямой волной, и сложная структура нижней границы.

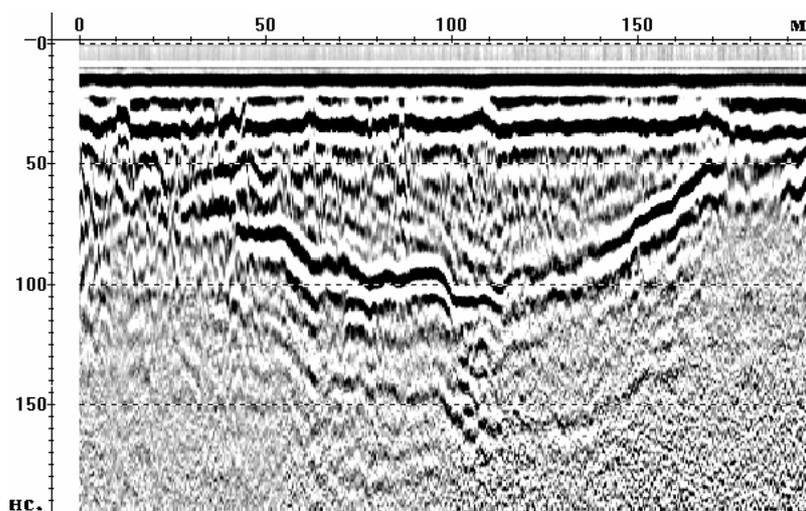


Рис. 5.6. Полевая запись с частотой зондирования 75 МГц.

На рисунке 5.6 представлен результат прослеживания подошвы песка, заполняющего выемку.

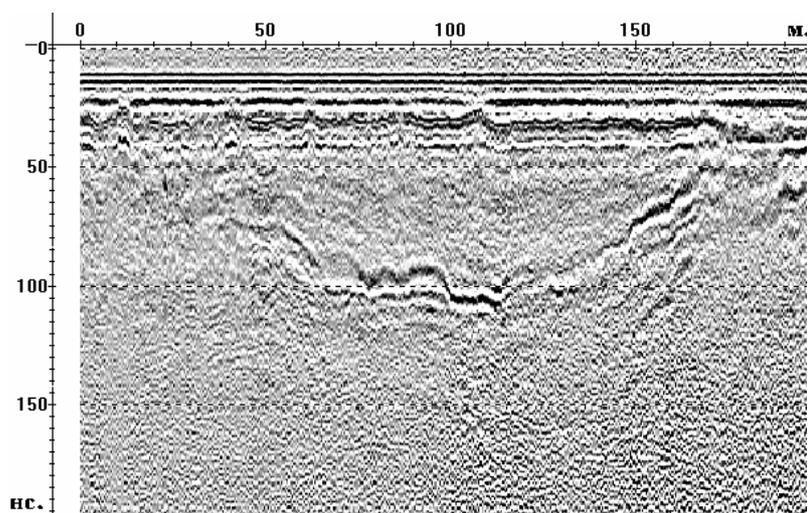


Рис. 5.7. Радарограмма после предсказывающей деконволюции.

5.6. Восстановление местоположения и формы локальных объектов (миграция).

Идея этой процедуры обработки основана на принципе Гюйгенса - каждая точка волнового фронта является вторичным источником колебаний. Отсюда следует три вывода:

- ось синфазности отражений от границы является огибающей вершин гиперболических осей синфазности, порожденных вторичными источниками - элементами границы;

- каждая трасса является суммой восходящих к приемнику волн, пришедших не только вертикально снизу, но и под разными углами с боков от других элементов границы;

- положение и наклон элементов оси синфазности волн, отразившихся от криволинейной границы, может не точно соответствовать положению и наклону элементов границы в вертикальном сечении профиля.

Задача миграции состоит в том, чтобы все волны (не видимые на поле-вом материале) от элементарных источников просуммировать по своим гиперболическим осям синфазности, то есть собрать энергию колебаний в вершину гиперболы - истинное местоположение элементарного источника колебаний.

При этом истинные отражающие элементы границы займут свое настоящее местоположение в плоскости разреза "расстояние по профилю - глубина". Очевидно, что для выполнения этой процедуры необходимо задать скорость распространения волн в среде для правильного задания формы гипербол суммирования сигналов с соседних трасс. В случае неправильного задания значения скорости полученный результат будет еще дальше от истинного разреза, чем исходный ("перемигрированные" разрезы, если скорость завышена и "недомигрированные" разрезы, если скорость занижена).

Если на радарограмме имеют место ярко выраженные гиперболические оси синфазности дифрагированных волн от локальных объектов - трубопро-

водов, углов фундаментов или подземных сооружений, то применение миграции позволит “стянуть” гиперболу в небольшую область с интенсивным сигналом, соответствующую местоположению верхней точки трубопровода или угла сооружения и освободить оставшуюся запись от дифрагированных волн.

Параметрами процедуры являются, прежде всего, скорость распространения волн и размеры (интервалы по времени и по профилю) скользящего окна, в котором осуществляется суммирование по гиперболической оси.

На рисунках 5.8 и 5.9 показан пример применения миграции, причем скорость распространения волн в среде выше дифрагирующих объектов определена по радарограмме с использованием осей синфазности дифрагированных волн (см. следующий раздел).

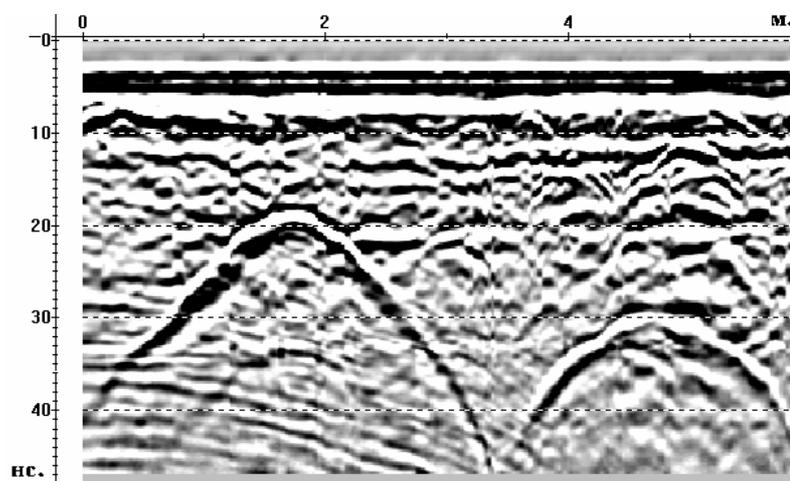


Рис. 5.8. Полевая запись. Дифрагированные волны от труб на глубинах 0.8 и 1.2 м. Скорость $V=8.2$ см/нс.

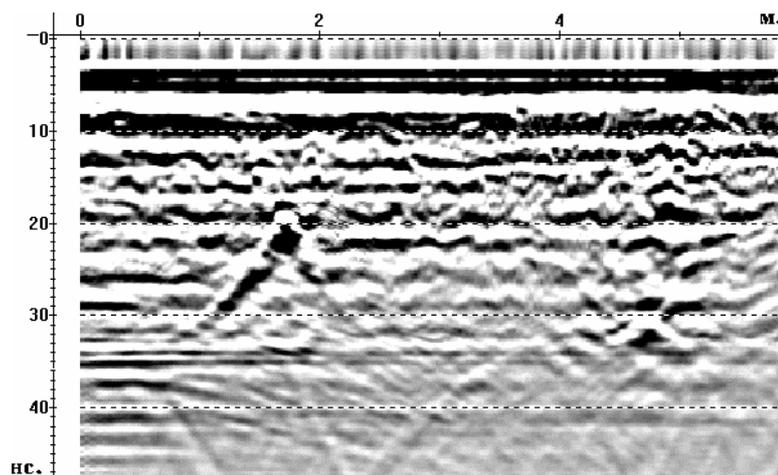


Рис. 5.9. Результат миграции - дифрагированные волны подавлены.

5.7. Определение скорости распространения волн

Независимое от других методов, результатов лабораторных измерений и априорных данных определение скорости распространения электромагнитных волн в среде при георадарных исследованиях возможно с использовани-

ем двух приемов. Первый из них и самый распространенный основан на использовании дифрагированных волн. В большинстве систем обработки этот способ предусмотрен в следующем виде. На экран компьютера вместе с радарограммой вызывается теоретическая гипербола, параметры которой и местоположение на экране регулируются пользователем. Теоретическая гипербола накладывается на ось синфазности на экране (рис. 5.8) и ее параметры регулируются до полного совмещения с реальной. Таким образом, путем сравнения (компарационный метод измерений) определяются скорость распространения волн в толще от поверхности до дифрагирующего объекта, глубина его залегания и место проекции на профиль.

Второй прием основан на использовании результатов наблюдений на временной базе (см. выше) с использованием уравнения годографа отраженной волны. Технически этот прием может быть реализован в системе обработки подобно предыдущему, с той лишь разницей, что теоретическая гипербола построена на основании уравнения годографа отраженной, а не дифрагированной волны. Этот прием бывает необходим при отсутствии в разрезе дифрагирующих объектов и какой либо иной возможности получения сведений о скоростях распространения волн в среде.

5.8. Ввод статических поправок

Цель процедуры состоит в учете рельефа поверхности вдоль профиля и (или) в удалении задержки сигнала при записи, введенной оператором.

При вводе статической поправки каждая трасса смещается по времени на интервал, соответствующий двойному пробегу волны в воздухе по вертикали от линии приведения, выбранной пользователем, до поверхности грунта, или на интервал, соответствующий величине задержки сигнала при записи.

Параметрами процедуры являются значения задержки при записи, значения относительных превышений точек профиля.

На рисунке 5.10 приведена радарограмма с введенными статическими поправками за рельеф дневной поверхности.

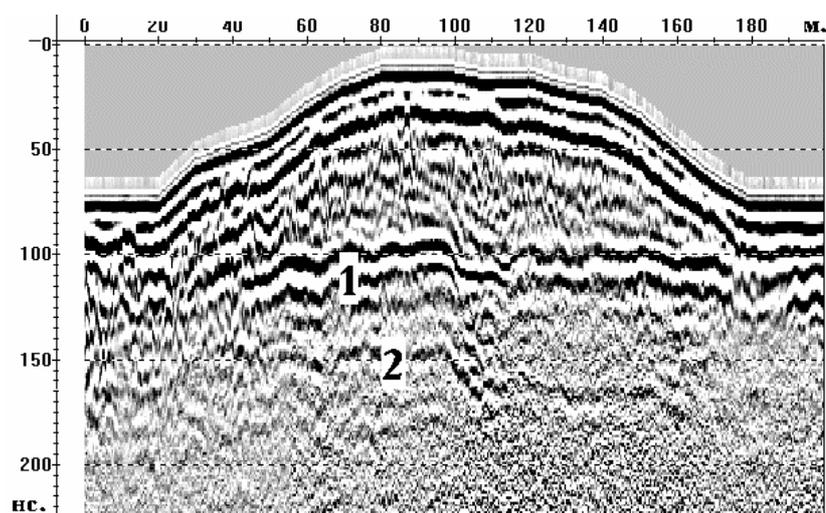


Рис. 5.10. Холм водонасыщенного песка на слое глины: отражение от поверхности глины (1); неполнократная волна - результат вторичных отражений от поверхности водонасыщенного песка и поверхности глины (2).

5.9. Преобразование Гильберта (огибающая, фаза, частота).

Эта процедура предназначена для преобразования каждой трассы в один из трех новых видов в соответствии с комплексным преобразованием Гильберта, сводящимся к тому, что трасса - действительная функция времени - представляется в виде комплексной функции со своими модулем и фазой.

Вычисляются именно эти величины как функции времени и в дополнение к ним амплитуда Гильберт-преобразования как функция времени. В результате радарограмма превращается в ансамбль трасс - результатов соответствующего преобразования.

Смысл этого преобразования состоит в следующем.

Мгновенная амплитуда (амплитуда Гильберт-преобразования) соответствует огибающей исходного сигнала. Такое представление бывает полезным при необходимости выделить или подчеркнуть на радарограмме области с характерным типом записи, отличающимся от соседних областей радарограммы более высокой или более низкой энергией сигнала, например, участки повышенной влажности, не имеющие четких отражающих границ, участки неровных и плохо отражающих границ, где трудно проследить ось синфазности из-за того, что отражения на соседних трассах имеют разную форму и т.д. Пример мгновенных амплитуд Гильберт-преобразования приведен на рисунке 5.11 (исходная радарограмма на рисунке 5.10).

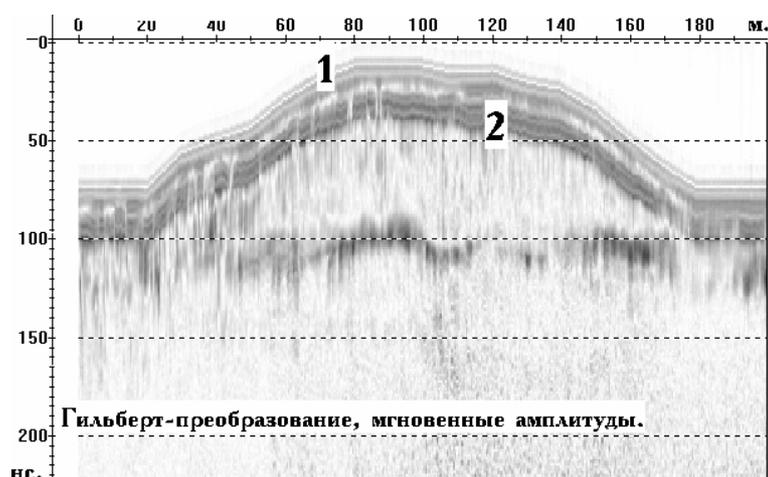


Рис. 5.11. Гильберт-преобразование, мгновенные амплитуды (1 - прямая волна; 2 - отражения от поверхности водонасыщения).

Мгновенная частота указывает на участки записи с различным частотным составом записи, что не всегда можно увидеть на исходной радарограмме по видимым периодам колебаний. Это могут быть участки записи, соответствующие отражениям от областей разреза с другой структурой пород, например, рекультивированных земель с нарушенной естественной микрослоистостью, засыпанных выемок, погребенных речных отложений, отложения с повышенной поглощающей способностью типа линз влажного торфа и т.д.

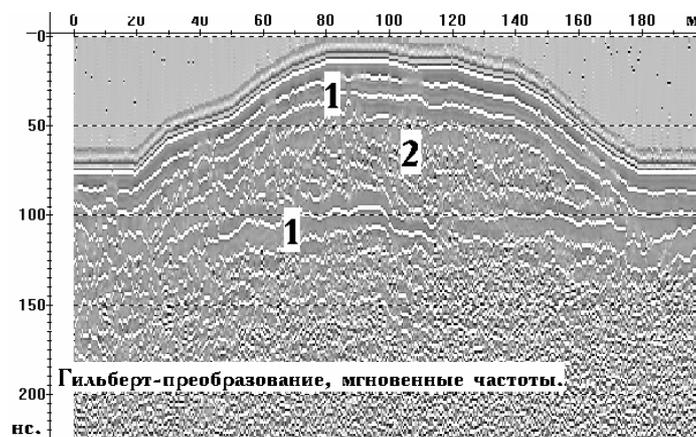


Рис. 5.12. Гильберт-преобразование, мгновенные частоты (1 - области регулярных отражений; 2 - область отражений с хаотическими фазами).

Мгновенная фаза может помочь выделить на радарограмме область отражений, не отличающихся заметно ни амплитудой, ни частотным составом, но имеющих существенные фазовые сдвиги в сравнении с окружающей этот участок записью. Как правило, причины, вызывающие такие фазовые искажения записи, имеют те же причины, что и в случае искажения частотного состава (рис. 5.13).

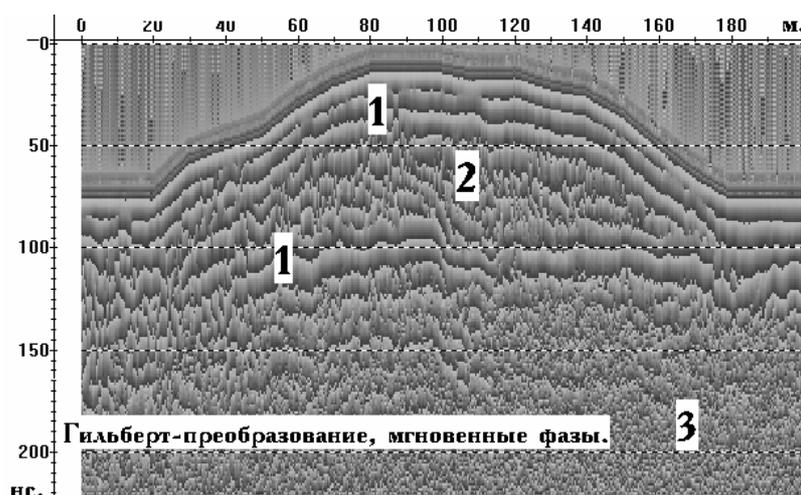


Рис. 5.13. Гильберт-преобразование, мгновенные фазы (1 - области регулярных отражений; 2 - область отражений с хаотическими фазами; 3 - область некоррелированного шума).

В большинстве случаев это преобразование может помочь при анализе радарограммы по типу сейсмостратиграфического (см. ниже).

Параметром процедуры является конкретный вид Гильберт-преобразования.

5.10. Пикирование границ и объектов

Процедура состоит в постановке пользователем на радарограмме маркирующих знаков (точек, звездочек, кружочков и т.д.) в качестве выделителей объекта на радарограмме, например, выбранной оси синфазности отраженных волн, границ выделенной области на временном разрезе и тому подобное. В зависимости от конкретной реализации в системе обработки, результат пикировки может быть либо просто выведен на принтер вместе с радарограммой, либо запомнен в отдельном файле и представлен отдельно уже без радарограммы, на фоне которой был создан, либо при указании скорости в разрезе преобразован в глубинный разрез, где выделенные объекты займут истинное положение по профилю и по глубине. В системах, оснащенных блоком интерпретации, предусматривается возможность нанесения уже на глубинный разрез с результатами пикировки крапа, отражающего природу выделенных объектов, и дополнительных сведений типа данных по геологическим скважинам и результатам других видов исследований.

5.11. Печать радарограмм

В простейшем виде может быть осуществлена в виде копии экрана на принтер, однако такой вид не является предпочтительным, поскольку полученная картина будет фактически “слепой” - не будет нести никакой информации кроме набора трасс в том или ином виде. Предпочтительнее насытить

картину необходимой для дальнейшего рассмотрения информацией. Сюда входят, прежде всего, подписанные оси координат - ось времени, проградуированная в наносекундах, и ось расстояний по профилю, на которой могут быть нанесены реперные точки, пикеты, местоположение выделенных объектов. При выводе на печать необходимо произвести подпись будущего рисунка. Как правило, средства системы обработки позволяют организовать на экране одну или несколько текстовых строк, с помощью которых такие подписи можно осуществить. В подпись входят сведения об участке и районе работ, наименование профиля наблюдений, сведения о произведенной обработке в виде перечня процедур (иногда с указанием параметров), сведения о скорости распространения волн в разрезе и т.д. В тех случаях, когда известна или определена скорость распространения волн в разрезе, вместо шкалы времени может быть нанесена шкала глубин. Нередко наносят две шкалы - шкалу времен и линейную шкалу глубин в пересчете времени с использованием средней скорости в разрезе. Такое представление бывает полезным для оценки взаимного расположения объектов по глубине.

Особое внимание при печати радарограмм следует обращать на горизонтальный масштаб в результате печати. Собственно горизонтальный масштаб задается для результатов георадарных исследований на основании технического задания на производство работ. На экране компьютера масштаб подбирается с помощью числа трасс, вызываемых на экран при известном шаге между трассами по профилю. Насколько сохранится этот масштаб в результате печати зависит от конкретного переводного коэффициента между экраном компьютера и средствами печати. Обычно и с достаточно высокой точностью этот коэффициент подбирается опытным путем.

5.12. Примерные последовательности обработки при решении некоторых задач.

Картирование протяженных границ типа уровня грунтовых вод или поверхности коренных пород под наносами.

1. Ввод данных.
2. Анализ спектров прямой волны, отражений в области искомым отражений и шума (частей записи на больших временах).
3. Скользящее суммирование для удаления синфазной помехи (если необходимо) с панелью суммирования порядка 10% от общего числа трасс на экране.
4. Частотная фильтрация.
5. Регулировка амплитуд.
6. Введение статических поправок на основании данных о рельефе профиля и задержке сигнала при записи.
7. Интерполяция записей вдоль профиля в соответствии с масштабом съемки.
8. Пикирование выделенных осей синфазности.

9. Преобразование временной оси в ось глубин на основании сведений о средней скорости распространения волн в разрезе или сведений о глубине залегания границы по скважинным данным.

10. Вывод результата обработки в цифровом виде и на печать.

Картирование границ маломощных слоев типа углеводородных загрязнений на поверхности грунтовых вод.

1. Ввод данных.

2. Анализ спектров прямой волны, отражений в области искомым отражений и шума (частей записи на больших временах).

3. Скользящее суммирование для удаления синфазной помехи (если необходимо) с панелью суммирования порядка 10% от общего числа трасс на экране.

4. Предсказывающая деконволюция.

5. Частотная фильтрация.

6. Регулировка амплитуд.

7. Введение статических поправок на основании данных о рельефе профиля и задержке сигнала при записи.

8. Интерполяция записей вдоль профиля в соответствии с масштабом съемки.

10. Пикирование выделенных осей синфазности.

11. Преобразование временной оси в ось глубин на основании сведений о средней скорости распространения волн в разрезе или сведений о глубине залегания границы по скважинным данным.

12. Вывод результата обработки в цифровом виде и на печать.

Поиск и картирование локальных объектов, не являющихся источниками дифрагированных волн, типа карстовых полостей, линз, отличных по составу от вмещающих пород.

1. Ввод данных.

2. Анализ спектров прямой волны, отражений в области искомым отражений и шума (частей записи на больших временах).

3. Скользящее суммирование для удаления синфазной помехи (если необходимо) с панелью суммирования порядка 10% от общего числа трасс на экране.

4. Частотная фильтрация.

5. Регулировка амплитуд.

6. Преобразование Гильберта.

7. Введение статических поправок на основании данных о рельефе профиля и задержке сигнала при записи.

8. Интерполяция записей вдоль профиля в соответствии с масштабом съемки.

9. Пикирование выделенных осей синфазности.

10. Преобразование временной оси в ось глубин на основании сведений о средней скорости распространения волн в разрезе или сведений о глубине залегания границы по скважинным данным.

11. Вывод результата обработки в цифровом виде и на печать.

Картирование локальных объектов - источников дифрагированных волн типа трубопроводов, подземных сооружений, захороненных предметов.

1. Ввод данных.

2. Анализ спектров прямой волны, отражений в области гипербол и шума (частей записи на больших временах).

3. Скользящее суммирование для удаления синфазной помехи (если необходимо) с панелью суммирования порядка 10% от общего числа трасс на экране.

4. Частотная фильтрация.

5. Регулировка амплитуд.

6. Введение статических поправок на основании данных о рельефе профиля и задержке сигнала при записи.

7. Интерполяция записей вдоль профиля в соответствии с масштабом съемки.

8. Скоростной анализ выделенных гиперболических осей синфазности.

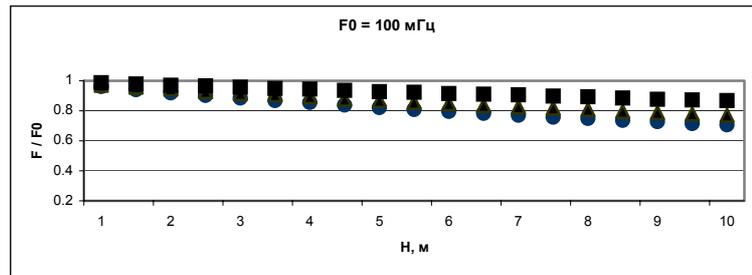
9. Миграция с определенной по гиперболам скоростью (контроль определения скорости, анализ осей синфазности, ранее “закрытых” дифрагированными волнами).

10. Преобразование временной оси в ось глубин на основании определенной средней скорости распространения волн в разрезе.

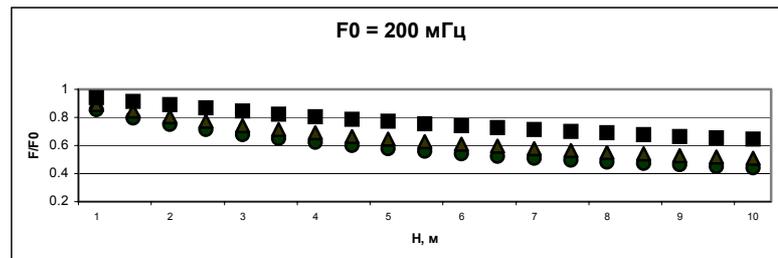
11. Вывод результата обработки в цифровом виде и на печать.

5.13 Определение поглощающих свойств разреза по георадиолокационным данным [7].

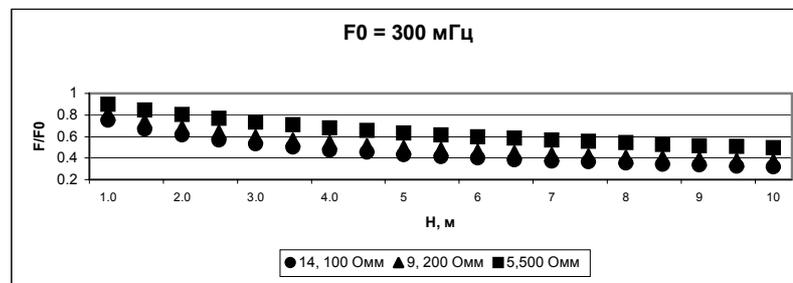
Определение поглощающих свойств среды представляет практический интерес при георадиолокационных исследованиях, т.к. коэффициент поглощения характеризует состав и состояние породы. Так, например, при замещении воды в песчано-глинистых отложениях углеводородами происходит резкое уменьшение поглощающих свойств. Талые и в разной степени мерзлые породы одного состава в высокочастотном электромагнитном поле отличаются прежде всего по величине и характеру зависимости поглощения от частоты. При анализе экспериментальных данных истинная интенсивность импульсов отраженных волн является неустойчивым параметром, будучи связана с условиями возбуждения и приема. В то же время смещение максимума спектра отраженных волн в зависимости от времени регистрации, не зависит от интенсивности и может быть легко определено и использовано для оценки поглощающих свойств изучаемой среды.



а)



б)



в)

Рис. 5.14. Графики зависимости смещения максимума спектра отраженной волны f/f_0 от глубины до отражающей границы H . Параметры моделей среды: $\varepsilon_0/\varepsilon_\infty \equiv 2$, $\tau \equiv 10^{-10}$ с. $\varepsilon_0 = 14$; $\rho = 100$ Омм, $\varepsilon_0 = 9$; $\rho = 200$ Омм, $\varepsilon_0 = 5$; $\rho = 500$ Омм.

а) $f_0 = 100$ МГц; б) $f_0 = 200$ МГц; в) $f_0 = 300$ МГц;

На рис. 5.14 приведены расчетные графики зависимости смещения максимума спектра от глубины до отражающей границы H (при этом волна проходит путь $2H$).

Из рисунка следует, что чем выше частота и проводимость среды, тем больше смещение максимума спектра в область низких частот. При отсутствии поляризационных потерь смещение максимума спектра в зависимости от времени регистрации будет ничтожно мало.

Таким образом, смещение максимума спектра в область низких частот характеризует поглощающие свойства среды и позволяет оценить состав и состояние породы.

Часть 2. МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ. [7, 13]

После математической обработки георадиолокационные данные поступают к интерпретатору, хотя и на стадии обработки участие интерпретатора также является весьма желательным. Обработка, как правило, улучшает полученные данные, однако начинать интерпретацию все же необходимо с просмотра полевых материалов. Некоторые важные особенности волновой картины в процессе обработки становятся менее заметны, о чем будет сказано в разделах, посвященных анализу конкретных материалов.

Георадиолокация, также как и сейсморазведка, является волновым методом [7], поэтому неудивительно, что основные методические приемы, которые используются при геологической интерпретации сейсмических данных, стали применяться и при анализе материалов георадиолокации. В сейсморазведке эта методика, разработанная для поиска нефтегазовых ловушек неантиклинального типа, получила название сейсмической стратиграфии [13]. Данная методика основана на анализе динамических и кинематических особенностей всей волновой картины – как сильных, так и слабых отражений. За последние годы значительно улучшилось качество сейсмических данных, что наряду с привлечением для интерпретации огромного материала по бурению способствовало повышению доверия к сейсмическим данным, в том числе и у специалистов, занимающихся инженерной геологией. Аналогичный процесс происходит сейчас и в георадиолокации. Анализ публикаций как отечественных, так и зарубежных исследователей показывает, что самые незначительные изменения волновой картины на радарограммах обусловлены теми или иными особенностями строения разреза.

При интерпретации георадиолокационных данных можно выделить два основных направления. Первое связано с поиском или обнаружением разнообразных объектов как естественного, так и искусственного происхождения. К ним относятся трубопроводы различного назначения, кабели, коллекторы, карстовые пустоты, археологические объекты и т.д. Второе направление связано с детальным изучением разреза – литологии, структуры отложений, гидрогеологических особенностей и т.д. В первом случае сведения о строении разреза довольно часто напрямую не используются, т.е. специальные геологические знания интерпретатору практически не нужны. Геологическую же интерпретацию без априорной информации об общей геологической и особенно гидрогеологической ситуации в районе работ провести на достаточно высоком уровне, как правило, невозможно. Следует однако подчеркнуть, что опыт проведения георадиолокационных работ в различных условиях показал, что и при решении задач поиска и обнаружения разнообразных объектов знание особенностей геологии района существенно повышает не только качество интерпретации, но и позволяет правильно планировать полевые наблюдения.

Геологическая интерпретация проводится в четыре этапа. На первом этапе необходимо убедиться, что все выделяемые оси синфазности отраженных волн на радарограммах являются полезными отражениями, т.е. связаны с реальными отражающими границами в разрезе.

На втором проводится выделение основных элементов разреза, которые получили название георадарных комплексов.

Третий этап заключается в детальном анализе волновой картины внутри выделенных георадарных комплексов – т.е. выделяются и анализируются так называемые георадарные фации.

На заключительном четвертом этапе производится построение глубинного геологического разреза, на котором могут отображаться инженерно-геологические и гидрогеологические особенности строения. На этом этапе обработки большое значение имеет изучение скоростных особенностей разреза для достоверного определения мощностей отдельных толщ. При построении окончательного разреза желательно отказаться от терминов, используемых на втором и третьем этапах (т.е. георадарный комплекс и георадарная фация) и перейти к употреблению общепринятых в геологии терминов.

Глава 6. ВЫДЕЛЕНИЕ ВОЛН – ПОМЕХ

Анализ волновой картины начинается с выделения осей синфазности отраженных волн, которые не связаны с наличием реальных границ в разрезе, а являются волнами-помехами. Если таковые имеются, то их необходимо исключить из дальнейшего рассмотрения. Волны-помехи можно разделить на два основных типа. К первому типу относятся так называемые воздушные отражения, образование которых связано с отражением от объектов, находящихся над поверхностью земли, т.е. эти отражения являются боковыми. Волны-помехи второго типа аналогичны кратным и неполнократным волнам, часто встречающимся на сейсмограммах при сейсмоакустических работах по методу t_0 , особенно на мелководе.

Воздушные волны-помехи часто встречаются при работах в городских условиях, в лесу и при исследованиях внутри помещений. В последнее время все более широко используются экранированные антенны, которые значительно ослабляют эти волны-помехи, но иногда они все же довольно интенсивны и могут значительно осложнять анализ волновой картины. При выделении воздушных волн-помех на радарограммах в первую очередь необходимо обращать внимание на участки, где наблюдается пересечение осей синфазности различной формы. В подавляющем большинстве случаев одна из систем осей синфазности является волной – помехой. По форме на радарограммах воздушные волны-помехи делятся на три типа. В зависимости от формы объекта оси синфазности этих волн-помех могут иметь вид либо дифрагированной волны, либо прямолинейную форму, либо быть комбинацией из них. Одним из основных признаков для их распознавания является их значительно большая интенсивность по сравнению с осями синфазности полезных волн, которая, как правило, мало уменьшается с увеличением времени. Дифрагированные волны-помехи образуются от проводов, столбов, деревьев, углов зданий и т.д. Прямолинейная форма характерна для стен зданий, оград и других объектов, которые находятся либо сбоку от линий наблюдения, либо непосредственно на профиле. При наличии наклонных или дифрагированных осей синфазности, которые предположительно могут быть воздушными отражениями, необходимо оценить скорость распространения электромагнитных волн. Эта процедура входит практически во все современные программы обработки (см. Часть 1). Если скорость составляет около 30 см/нс (т.е. равна скорости в воздухе), то данные оси синфазности являются волнами-помехами. В случае, если оси синфазности от реальных границ раздела в разрезе и волны-помехи имеют одинаковый наклон, выделение последних может быть существенно затруднено (например при субгоризонтальном строении разреза и профилировании вдоль протяженных объектов, таких как здания, ограды и т.д.). Объекты, которые могут быть причиной появления на радарограммах воздушных отражений, необходимо отмечать на стадии проведения исследований с измерением расстояний до них, что значительно облегчит в дальнейшем интерпретацию. Как уже упоминалось выше, применение

экранированных антенн позволяет существенно снизить, а иногда полностью подавить воздушные волны-помехи. Таким образом, по кинематическим и динамическим признакам на радарограммах можно уверенно отделить оси синфазности полезных отражений от воздушных волн-помех. На рис. 6.1, 6.2 представлены примеры воздушных волн-помех.

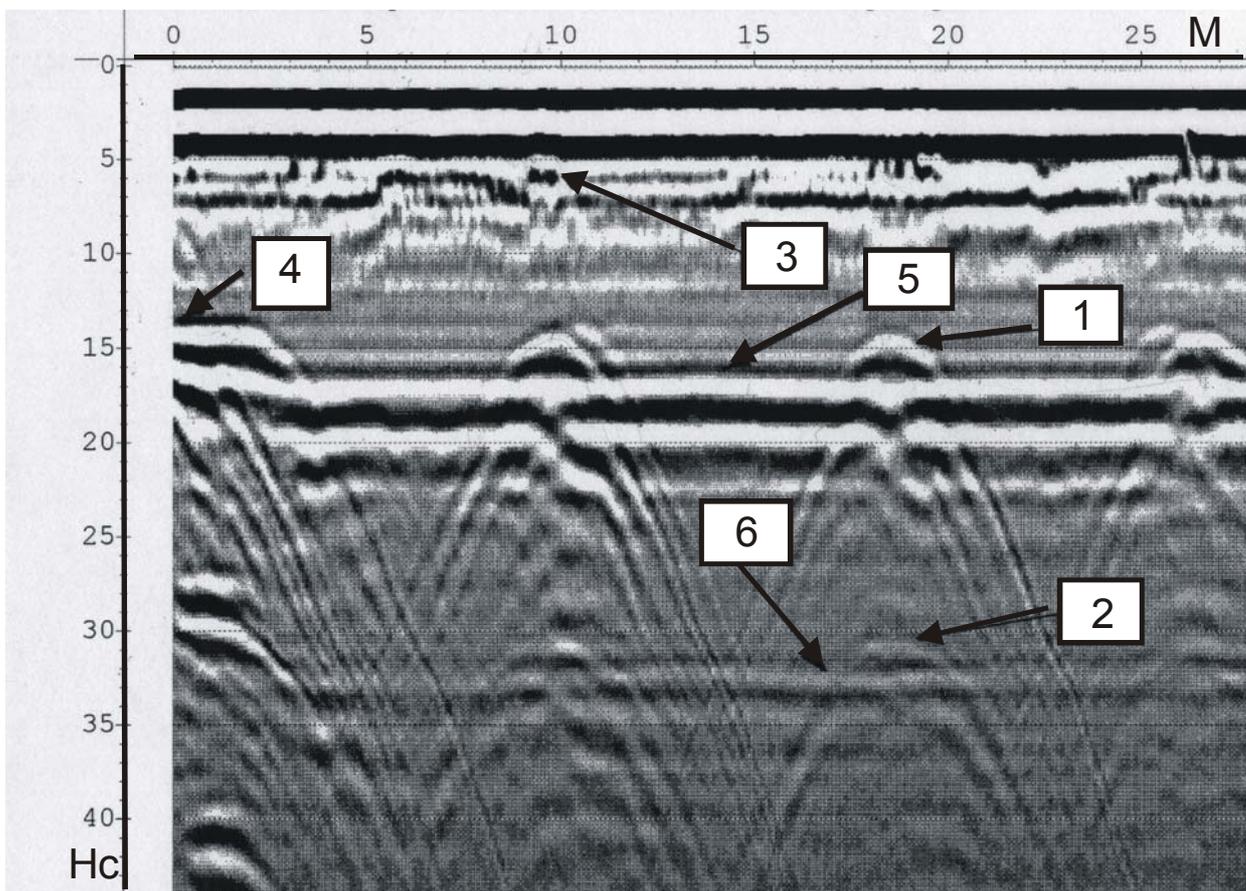
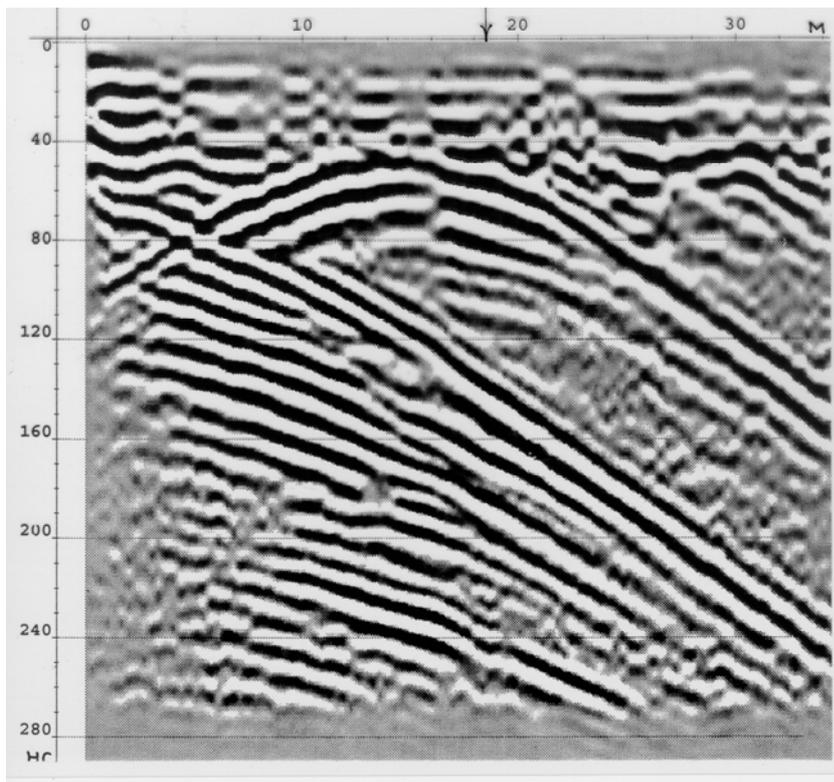
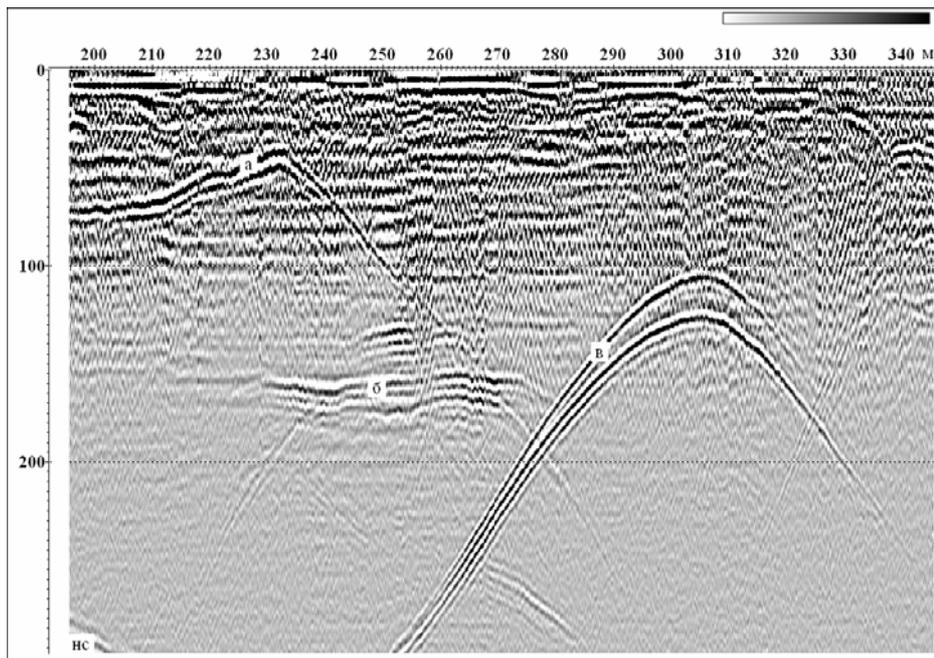


Рис. 6.1. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного внутри подземного гаража. Слева и справа от профиля находятся колонны. Использовалась антенна 1 ГГц (экранированная, воздушная). 1,2 – воздушные отражения от ближнего (1) и дальнего (2) ряда колонн; 3 – ленточный фундамент между колоннами; 4 – выступ фундамента; 5, 6 – соответственно однократное и двукратное воздушные отражения от потолка. Высота потолка равна: $16 \text{ нс} / 2 \times 30 \text{ см/нс} = 2,4 \text{ метра}$.



А)



Б)

Рис. 6.2. Фрагменты радарограмм (не экранированные антенны) с различными типами воздушных волн-помех: А) от объектов, находящихся в плоскости профиля (гиперболические оси синфазности – от проводов, высота которых над землей 6 метров; наклонные оси – от стены здания). Б) от объектов, находящихся сбоку от профиля: а – от металлической ограды, б – от здания, в – от металлического столба.

Волны-помехи второго типа (кратные и неполнократные) также часто присутствуют на георадиолокационных записях, особенно при работах на реках и озерах. Для их образования, кроме границ грунт-воздух, вода-воздух и грунт-вода необходимо наличие хотя бы одной «сильной» отражающей границы в разрезе. По динамическим и кинематическим признакам кратные и неполнократные волны на радарограммах и сейсмограммах практически ничем не отличаются. На рис. 6.3 а,б изображены схемы кратных и неполнократных отражений, наиболее часто встречающихся при георадиолокационных наблюдениях.

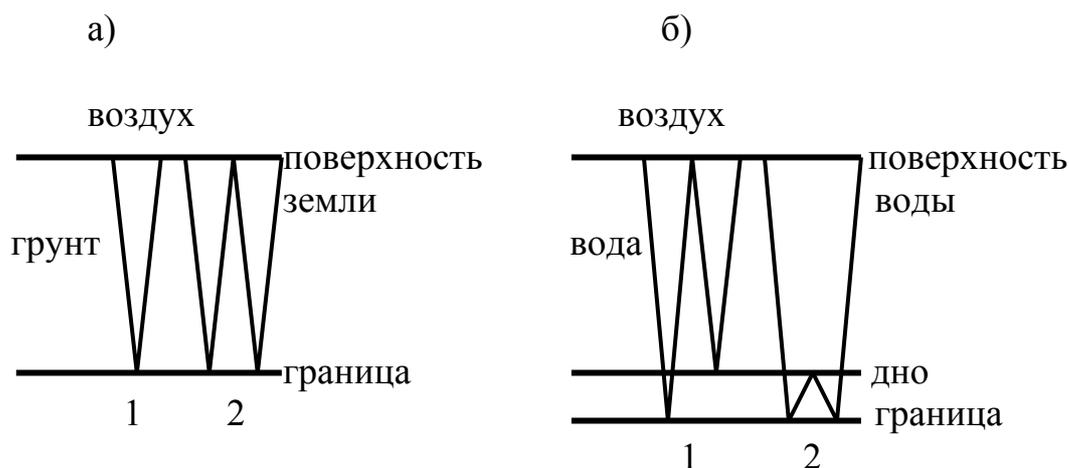


Рис. 6.3. Схемы формирования наиболее часто встречающихся кратных и неполнократных волн при работах на суше (а) и воде (б):

а) 1 – однократная и 2 – двухкратная волны (могут наблюдаться также 3-х, 4-х кратные и т.д.)

б) 1 – неполнократная в водном слое и 2 – неполнократная в слое (здесь не показаны кратные отражения от дна и поддонной границы, которые также будут присутствовать).

Наиболее часто границами, на которых образуются кратные и неполнократные волны при работах на суше, являются кровля коренных пород и уровень грунтовых вод (УГВ). Следует отметить, что при исследованиях на суше эти волны встречаются не так часто, тогда как при работах на воде оси синфазности кратных и неполнократных волн присутствуют всегда и они очень интенсивные. Основным признаком многократных отражений (2-х, 3-х кратных и т.д.) является кратное увеличение времени прихода отраженной волны. Конфигурация осей синфазности кратных отражений определяется морфологией реальной границы, от которой они образуются. При образовании неполнократных отражений их конфигурация зависит уже от рельефа двух границ. Так, например, при формировании неполнократной в водном слое волны ее

рельеф будет определяться рельефом и дна и поддонной границы. Примеры кратных и неполнократных волн на радарограммах приведены на рисунках 6.4, 6.5 и 6.6.

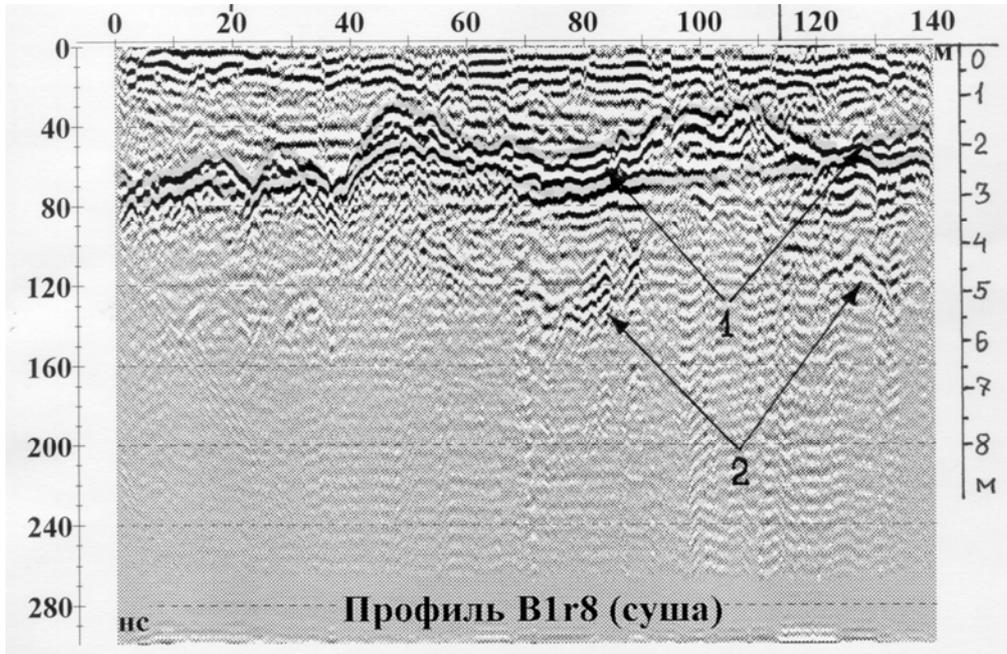


Рис. 6.4. Фрагмент радарограммы, полученной на суше. Использовалась антенна 300 МГц (экранированная): 1 – оси синфазности однократных отражений от кровли коренных пород (гнейсогранитов); 2 – оси синфазности кратной волны.

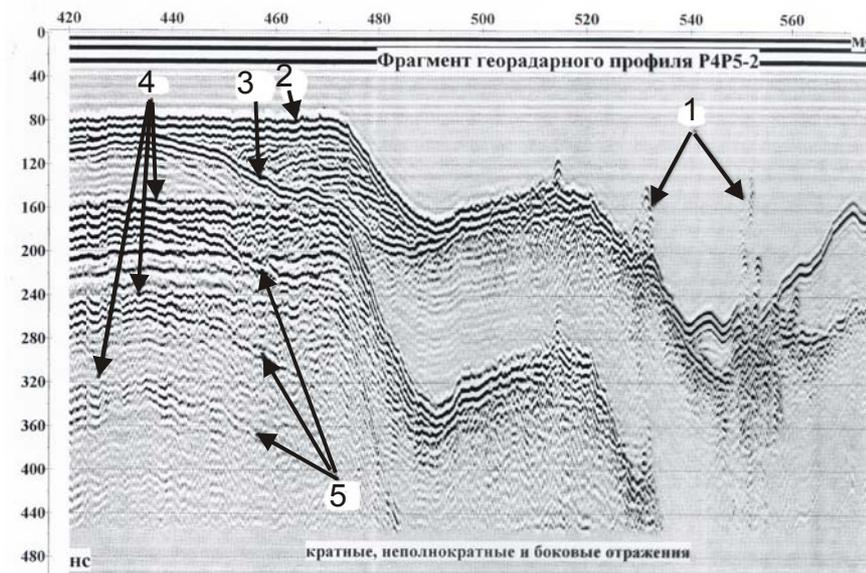
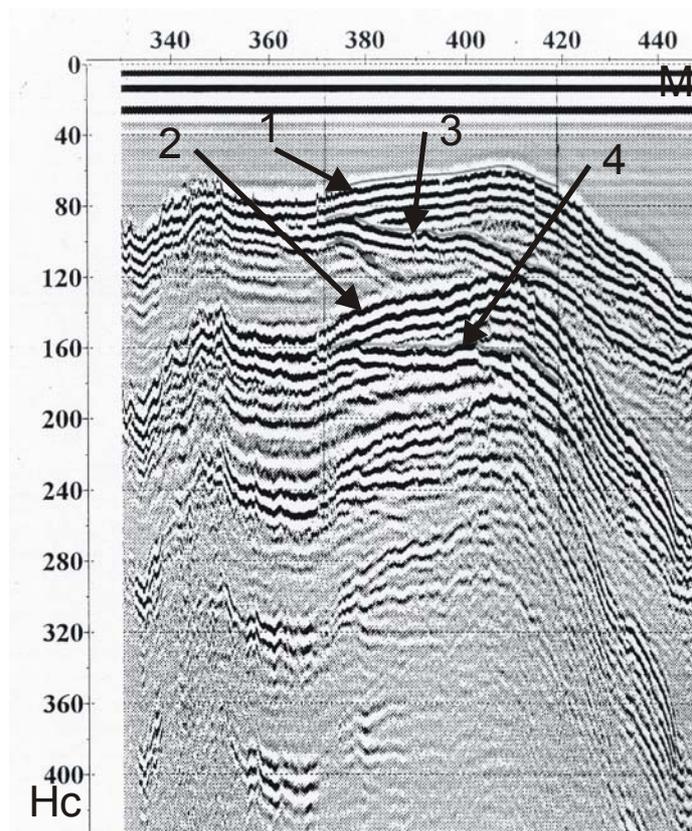
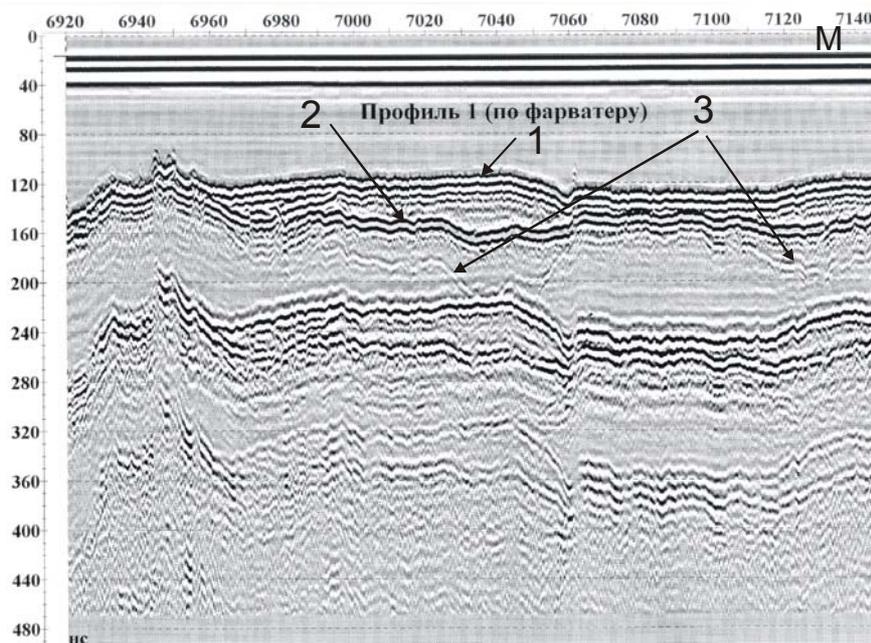


Рис. 6.5. Фрагмент радарограммы, полученной на реке с экранированной антенной 300 МГц. 1- боковые отражения; 2-дно; 3-кровля коренных пород; 4-2,3 и 4 кратная от дна; 5- неполнократные в водном слое отражения от кровли коренных. При горизонтальном дне неполнократные отражения имеют ту же форму, что и реальная граница (граница 3).



а)



б)

Рис. 6.6. Фрагменты радарограмм с примерами неполнократных отражений в воде и в слое. Использовалась экранированная антенна 300 МГц. а – неполнократная волна в водном слое: 1-дно; 2-кратная от дна; 3-кровля коренных пород; 4-неполнократное отражение в водном слое от кровли коренных пород (см. рис. 6.3б). б – неполнократная волна в слое (см. рис. 6.3б): 1-дно; 2-кровля коренных пород; 3-неполнократная волна от кровли коренных пород в слое.

На рис. 6.5 отчетливо видно, что кратные отражения от дна (4) при горизонтальном дне также имеют горизонтальную форму, тогда как неполнократные отражения (5) от кровли коренных пород (3) полностью повторяют рельеф кровли коренных. При работах на воде иногда могут возникать и боковые отражения (1) от объектов, находящихся сбоку от линии профиля. Такими объектами могут быть большие валуны, выступы коренных пород и т.д.

На рис. 6.6а показан пример неполнократной от кровли коренных пород (3) волны в водном слое, когда наклоны поверхности дна (1) и кровли коренных (3) не совпадают. В этом случае форма неполнократного в водном слое отражения будет определяться рельефом как той, так и другой границы. На данном рисунке углы наклона дна и кровли коренных таковы, что неполнократная имеет горизонтальную форму (4).

Довольно редко можно наблюдать и неполнократные отражения внутри слоя. На рис. 6.6б выделяется неполнократная волна, образовавшаяся в слое между дном и кровлей коренных пород. Следует только отметить, что амплитуды этих волн значительно меньше, чем у однократных отражений.

Прогнозировать возможное образование воздушных волн-помех необходимо на стадии проведения работ. При этом производится измерение расстояний до объекта, который может быть причиной их возникновения. Это может значительно облегчить в дальнейшем идентификацию этих помех.

Глава 7. ВЫДЕЛЕНИЕ ГЕОРАДАРНЫХ КОМПЛЕКСОВ.

[3, 11, 13, 33]

После обработки и выделения волн-помех радарограммы готовы к интерпретации. Целью интерпретации георадиолокационных данных в самом общем виде является либо детальное расчленение разреза, либо поиск или обнаружение разнообразных объектов. В некоторых случаях при исследованиях требуется и то и другое. Детальное изучение разреза основано на тех же методических приемах, которые были разработаны и опробованы в сейсморазведке при поиске ловушек нефти и газа неструктурного типа [11]. Разрез в этом случае представляется сложным серией осадочных комплексов разного возраста. Под осадочным (или седиментационным) комплексом понимается стратиграфическая единица, сложенная относительно согласной последовательностью генетически взаимосвязанных слоев, ограниченная в кровле и подошве несогласиями либо эквивалентными им согласными поверхностями (рис. 7.1). При выделении осадочного комплекса анализируются только физические взаимоотношения между самими слоями. Многочисленные данные бурения показали, что оси синфазности отраженных волн на сейсмических разрезах в основном приурочены либо к литологическим границам, либо к границам несогласий, поэтому выделение комплексов на сейсмограммах сводится к выделению границ несогласий. В этом случае комплексы получили название сейсмических. Данная методика разделения разреза весьма успешно применяется и при анализе георадиолокационных данных. Выделенные при этом комплексы можно называть георадарными [3, 13].

Накопленный к настоящему времени опыт показывает, что и в случае георадиолокационных наблюдений оси синфазности отраженных электромагнитных волн, как правило, приурочены к границам слоев с различной литологией. Исключение составляют границы раздела, обусловленные различной степенью водонасыщения (в первую очередь уровень грунтовых вод - УГВ). Тогда при наклонном залегании слоев могут возникать ситуации, когда на радарограммах все пересекающиеся оси синфазности будут реальными границами, только горизонтальные оси будут приурочены к УГВ, а наклонные оси синфазности – к литологическим границам (рис. 7.2). Следует однако помнить (см. Главу 6), что при наличии пересекающихся осей синфазности одна из систем осей может быть волной – помехой. Если на радарограмме все оси синфазности залегают субгоризонтально, то выделение границы УГВ представляется довольно сложной задачей и требует дополнительной информации. Этот вопрос будет рассмотрен в других разделах.

Таким образом, чтобы выделить комплекс, необходимо установить и проследить в его кровле и подошве несогласные границы. Несогласной называется поверхность эрозии (размыва) или перерыва в осадконакоплении. Среди множества типов несогласий на радарограммах реально можно выделить два типа – угловое и параллельное (стратиграфическое).

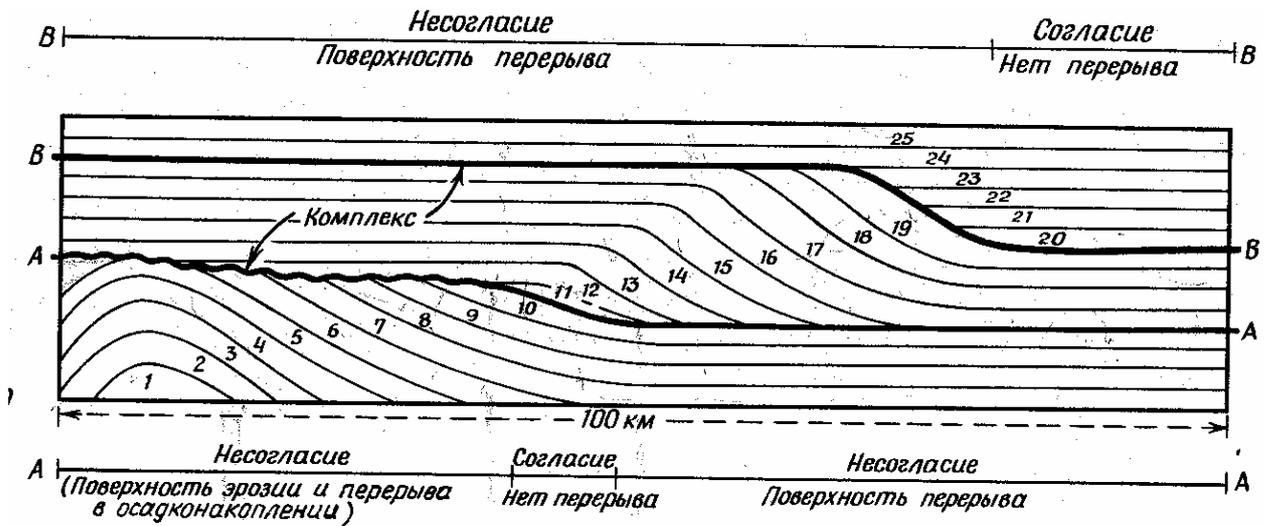


Рис. 7.1. Основные элементы осадочного комплекса [11]. Его границами являются поверхности А и В, которые по латерали постепенно переходят из несогласных в согласно залегающие поверхности раздела. Отдельные слои (от 1 до 25) прослежены по поверхностям напластования.

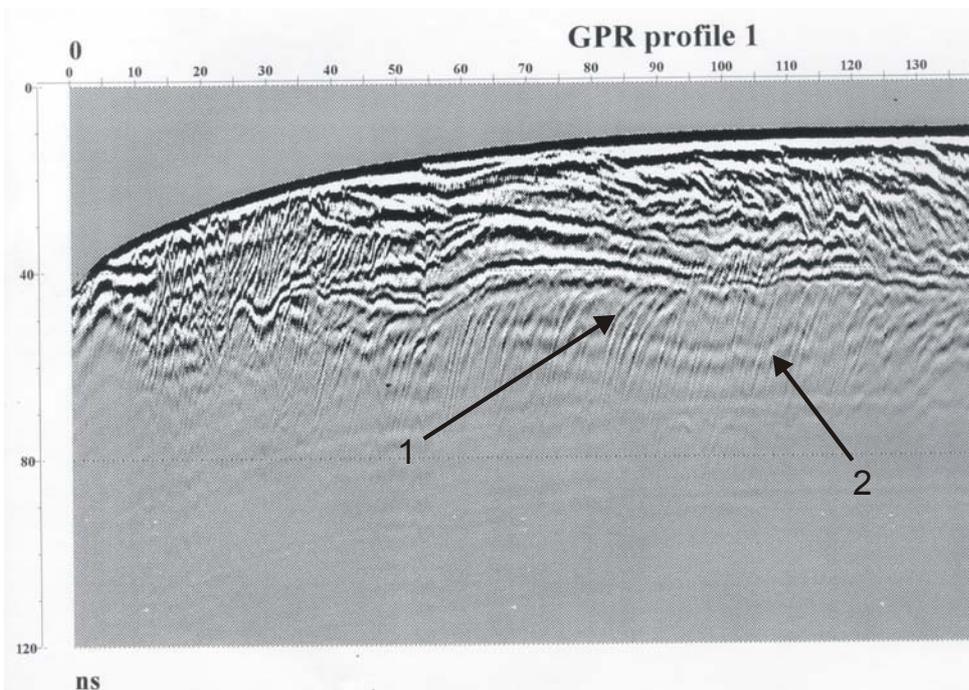


Рис. 7.2. Фрагмент георадиолокационного профиля через прибрежные валы (побережье Каспийского моря). Использовалась экранированная антенна 300 МГц. 1 – оси синфазности от наклонных границ в косослоистой толще; 2 – уровень грунтовых вод (УГВ).

Обнаружение углового несогласия, как правило, не вызывает затруднения. При наличии несогласия наблюдается прекращение прослеживания одной системы осей синфазности на другой (рис. 7.3, 7.4).

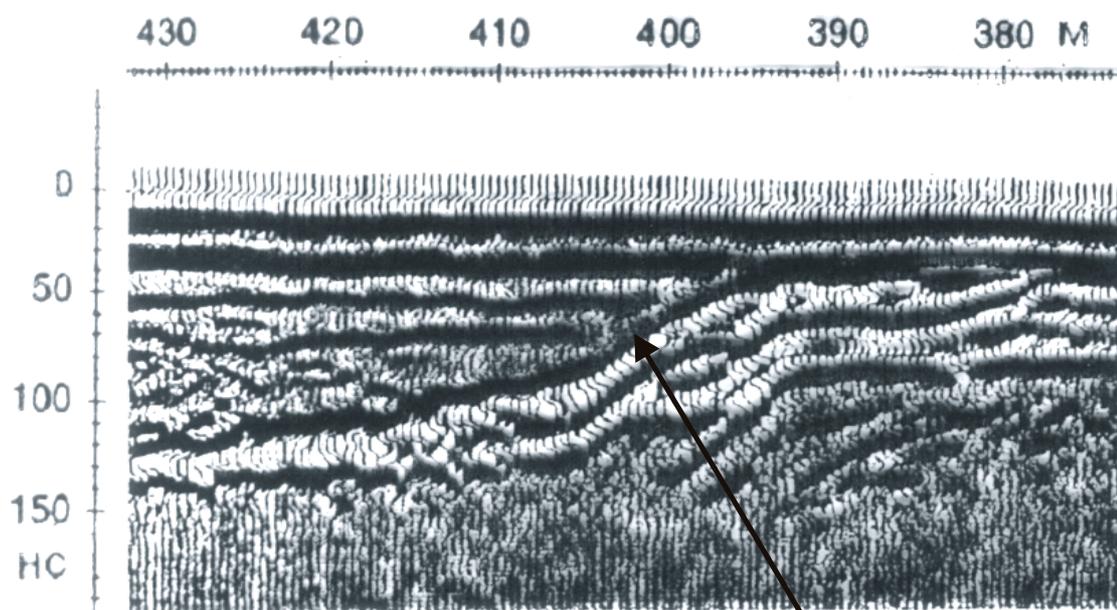


Рис. 7.3. Пример записи углового несогласия в подошве верхнего георадарного комплекса (показано стрелкой).

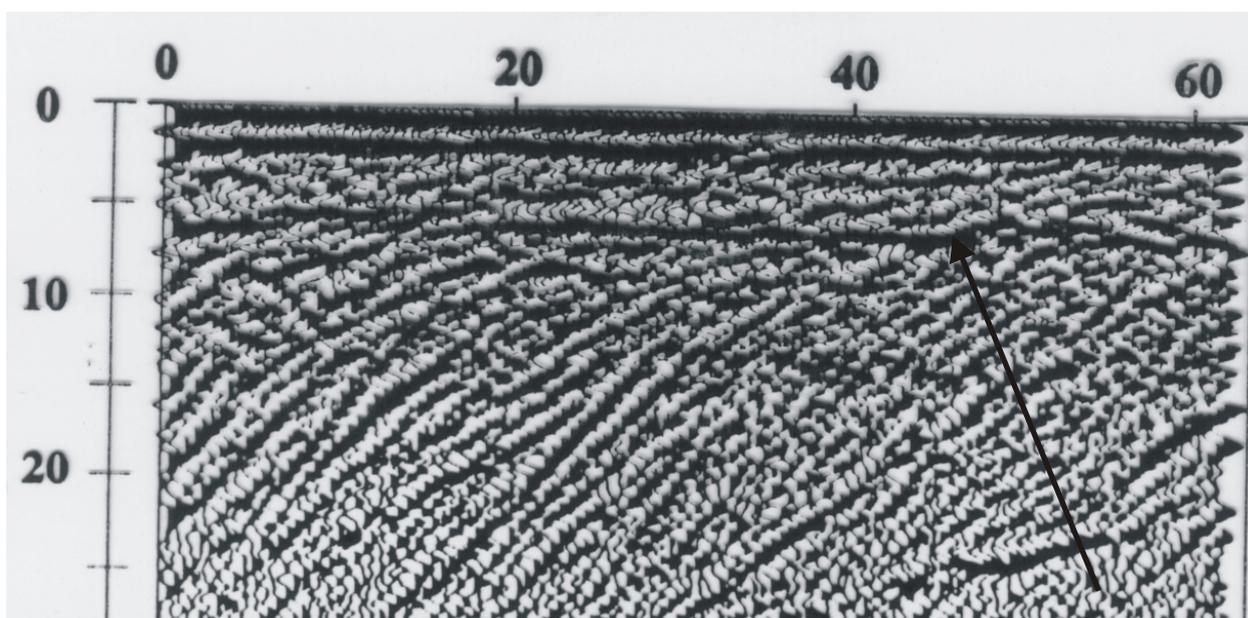


Рис. 7.4. Пример записи углового несогласия в кровле нижнего косослоистого комплекса (показано стрелкой). В верхнем георадарном комплексе короткие оси синфазности расположены субгоризонтально [33].

Виды угловых несогласий в кровле и подошве комплекса схематично изображены на рис. 7.1 и 7.6.

Более сложным и зачастую неоднозначным является выделение стратиграфических или параллельных несогласий, когда оси синфазности от несогласия и границ имеют одинаковую форму. Такая ситуация возникает при субгоризонтальном залегании, когда часть слоев размыта или в течение длительного промежутка времени осадконакопления не происходило. Подобная картина отмечается, например, в левой части кровли осадочного комплекса (рис. 7.1), когда на слое 17 залегает слой 24 (отсутствует 6 слоев), а наклон границ напластования выше и ниже границы несогласия одинаков. На сейсмограммах в случае слоистого разреза (горизонтально- или косослоистого) и отсутствия признаков углового несогласия границы между комплексами проводятся по наиболее интенсивным осям синфазности отраженных волн, которые, как было неоднократно подтверждено бурением, являются границами параллельных несогласий. Опубликованные георадарные данные российских и иностранных исследователей, а также наш собственный опыт показывают, что и в георадиолокации подтверждаются эти закономерности - интенсивные оси синфазности отраженных волн приурочены к границам стратиграфических несогласий. Пример такого несогласия показан на рис. 7.5. При отсутствии угловых и (или) параллельных несогласий (представленных интенсивными осями синфазности) граница между комплексами проводится по смене волновой картины (рис. 7.5, граница между средним и верхним комплексами).

Для сейсмических данных разработана классификация видов залегания слоев на верхней и нижней границах комплекса [11], которую можно использовать и при интерпретации георадарных данных (рис. 7.6). Примеры некоторых видов несогласий на реальных материалах показаны на рис. 7.3, 7.4, 7.7: налегание в подошве (рис. 7.3) – первоначально горизонтально залегающие слои постепенно выклиниваются у первоначально наклонной поверхности; эрозионный срез (рис. 7.4) – слои в кровле нижнего комплекса размыты; прилегание в подошве (рис. 7.7) – в основании верхнего комплекса первоначально наклоненных слоев наблюдается их выклинивание по падению у изначально наклонной поверхности.

На рисунках 7.5 и 7.8 представлены фрагменты георадиолокационных профилей с выделенными георадарными комплексами. На первом из них комплексы выделены по отличиям в волновой картине и протяженным осям синфазности, наблюдаются только стратиграфические несогласия. На рис. 7.8 имеется несколько видов угловых несогласий. Второй комплекс на этом рисунке, представленный косослоистой толщей, очевидно, был сформирован при преобладающем латеральном разносе терригенного материала.

Выделение комплексов на георадиолокационных профилях проводится практически без априорной геологической информации, анализируются только физические взаимоотношения между осями синфазности отраженных волн и различия в волновой картине. Осадочные комплексы, выделенные по

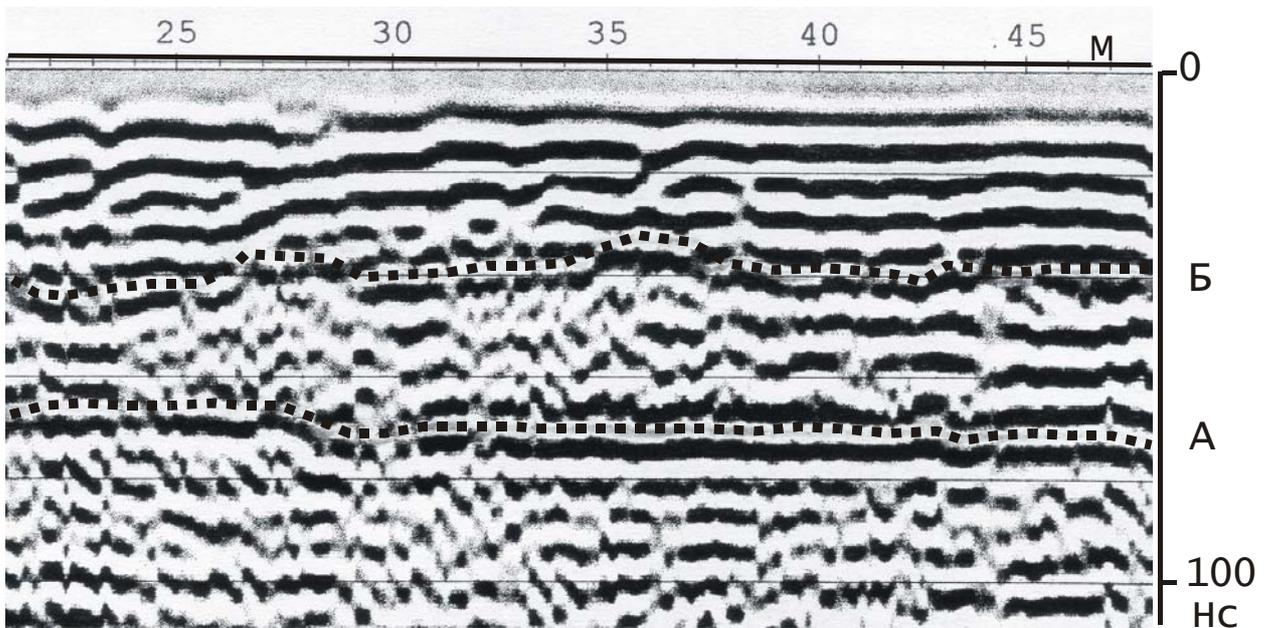


Рис. 7.5. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного с не экранированной антенной 150 МГц. Выделено три георадарных комплекса, разделенных границами А и Б. Граница между нижним и средним комплексами (А) проведена по интенсивным осям синфазности, между средним и верхним – по смене волновой картины. По данным бурения нижний комплекс представлен юрскими глинами, средний – аллювиальными отложениями среднего плейстоцена, верхний – современными техногенными отложениями.

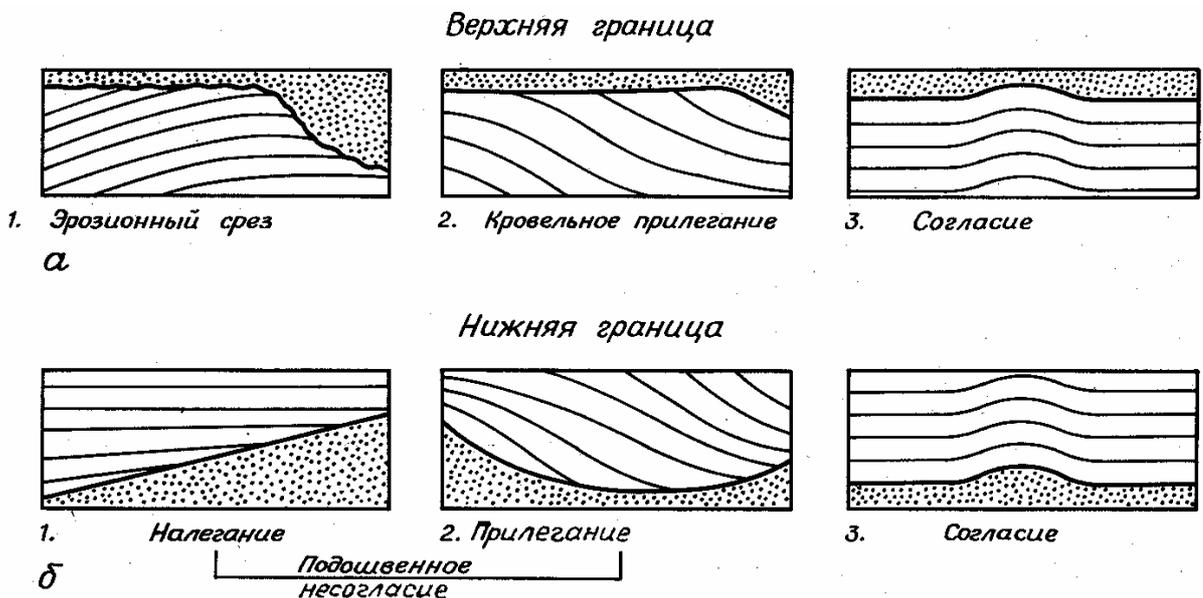


Рис. 7.6. Виды залегания слоев по отношению к границам осадочного комплекса. а – по отношению к верхней границе (к кровле): 1- эрозионный срез (часть толщи размыта); 2-кровельное прилегание (встречается в дельтах рек); 3-согласие в кровле. б – по отношению к нижней границе (к подошве): 1-налегание в подошве; 2-подошвенное прилегание; 3-подошвенное согласие.

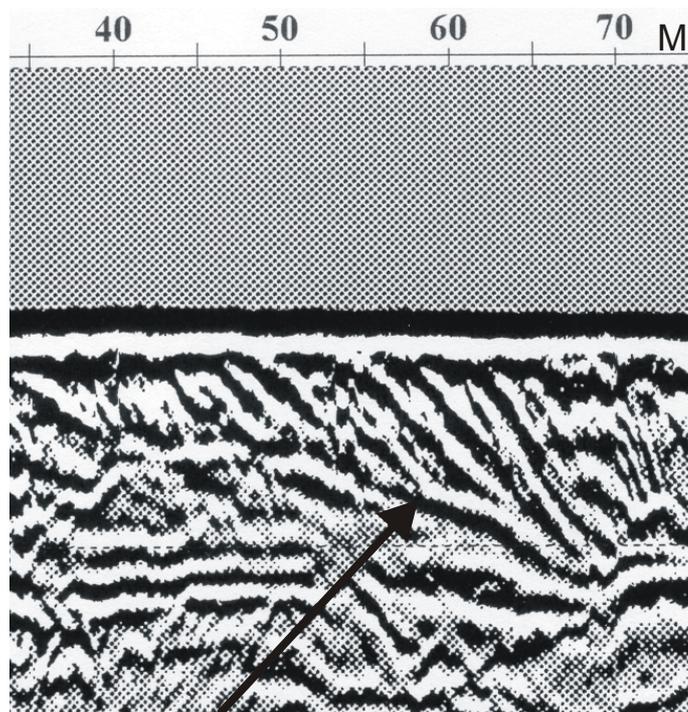


Рис. 7.7. Фрагмент радарограммы, полученной с экранированной антенной 300 МГц. Пример подошвенного прилегания (показано стрелкой). В подошве комплекса первоначально наклоненных слоев наблюдается постепенное их исчезновение вниз по падению у изначально наклонной (либо горизонтальной) поверхности.

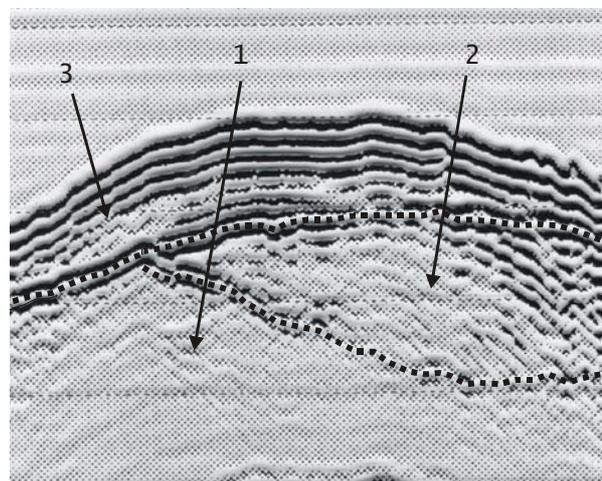


Рис. 7.8. Фрагмент радарограммы, полученной с экранированной антенной 300 МГц. Выделено три георадарных комплекса (показаны цифрами со стрелками). Границы между комплексами проведены штрихпунктирными линиями. В нижнем комплексе (1) отсутствуют оси синфазности отраженных волн. Средний комплекс (2) залегает на нижнем по схеме подошвенного прилегания и представлен наклонными осями синфазности. Самый молодой верхний комплекс (3) с угловым несогласием залегает на 1 и 2 комплексах и характеризуется наличием протяженных интенсивных осей синфазности.

данным георадиолокации, имеют большое значение в геологии, так как они представляют собой части разреза, отложившиеся в течение определенного геологического этапа развития района. Возраст каждого комплекса определяется возрастом границ комплекса на тех участках, где они представлены согласными поверхностями.

При георадиолокации можно изучать осадочные комплексы мощностью от первых десятков сантиметров до первых десятков метров (в зависимости от типа антенны и строения разреза), хотя в действительности их мощность может достигать и многих сотен метров. По латерали они также протягиваются на различные расстояния. Следует отметить, что зачастую приходится проводить наблюдения на ограниченном пространстве и в пределах одного комплекса. Иногда целесообразно георадарный комплекс разделять на ряд подкомплексов по наличию локальных угловых несогласий (т.е. несогласий на небольших участках), например, при изучении техногенных грунтов или аллювиальных отложений.

После расчленения разреза на комплексы, если не требуется более детального изучения его структуры, проводится геологическая привязка выделенных георадарных комплексов, с использованием всей доступной гидрогеологической и геологической информации. Методика привязки будет описана ниже в специальном разделе, здесь же отметим только, что при окончательном представлении полученного материала необходимо перейти на общепринятую геологическую терминологию.

Глава 8. ВЫДЕЛЕНИЕ ГЕОРАДАРНЫХ ФАЦИЙ.

[11, 18, 28, 29, 33, 34]

После выделения на радарограммах комплексов часто возникает необходимость в более детальном изучении их внутреннего строения. При интерпретации сейсмических данных эта методика получила название сейсмофациального анализа [11]. В геологии под фацией понимаются отложения определенных условий или ландшафтов, т.е. геологических тел тех или иных ландшафтно-генетических типов (вопрос об определении фации достаточно сложный и неоднозначный, см. [18]). Выделение фаций внутри георадарного комплекса (по аналогии с сейсморазведкой) основывается на детальном анализе волновой картины, который может проводиться как на качественной (визуальной) основе, так и с использованием способов, базирующихся на количественной оценке параметров с применением ЭВМ. В настоящее время при георадиолокационных работах используется в основном визуальный анализ, при котором исследуются те же параметры волновой картины, что и при интерпретации сейсмических данных. Основными из них являются следующие:

1 – конфигурация осей синфазности отраженных волн (например, параллельные, волнистые, хаотические и т.д.);

2 – интенсивность осей синфазности (амплитуда отражений);

3 – частотный состав записи;

4 – протяженность осей синфазности;

5 – скорость распространения волны.

Последний параметр (скорость) используется в тех случаях, когда его удается определить или получить из каких-либо источников. Таким образом, под георадарной фациальной единицей понимается трехмерное тело, образуемое группой отражений, которые характеризуются набором параметров (перечисленных выше), отличным от параметров соседних фациальных единиц. Для выделения фаций достаточно отличий хотя бы одного из них.

Каждый параметр несет определенную информацию о геологическом строении данной части разреза. Конфигурация отражений позволяет определить основные типы напластования, на основании которых можно делать выводы о процессах седиментации, направлении сноса терригенного материала, воссоздать пространственную форму фациальных единиц. Амплитуда отражений зависит от изменения литологии, наличия различных флюидов и используется при прогнозировании латеральной изменчивости отложений. На частотный состав записи влияет взаимное расположение отражающих границ, наличие флюидов и т.д. Протяженность отражающих горизонтов указывает в основном на характер распространения и напластования выделенных толщ и на процессы осадконакопления. В тех случаях, когда отличия перечисленных параметров незначительны, выделение георадарных фаций может производиться по изменению скорости

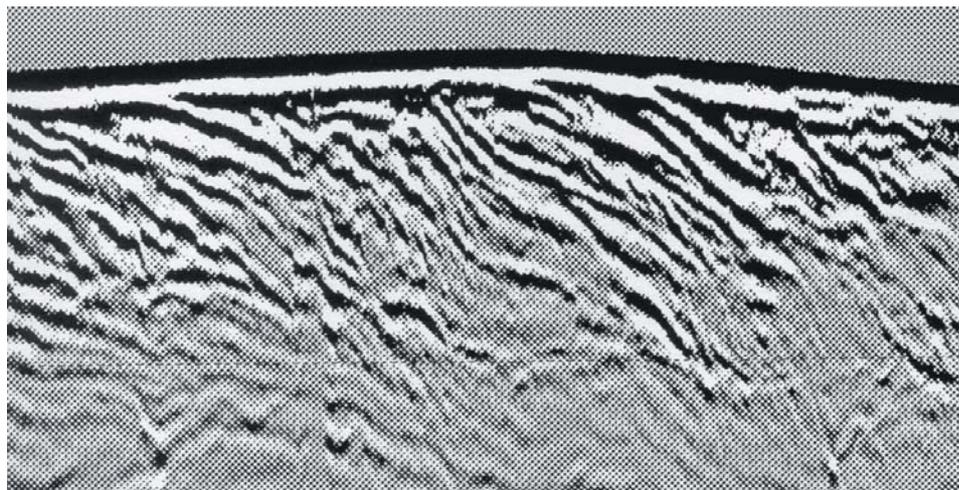
распространения электромагнитных волн (если таковые данные имеются). В результате подобного анализа можно достаточно детально восстановить обстановку осадконакопления на изучаемом участке. Некоторые примеры фациального анализа по георадарным данным, полученным в различных геологических условиях, приведены в работах [28, 29, 34].

Конфигурация осей синфазности является наиболее очевидной и поддающейся прямому анализу характеристикой волновой картины при георадиолокационных исследованиях. На рис. 7.5 (см. Главу 7) показан фрагмент георадарного профиля, на котором выделено 3 комплекса. В нижнем и верхнем георадарных комплексах, представленных соответственно глинами и современными техногенными отложениями, волновая картина довольно однообразна. В среднем, сложенном аллювиальными отложениями по данным бурения, отчетливо наблюдаются изменения волновой картины. В правой части этого комплекса оси синфазности интенсивные, протяженные, субгоризонтальные. На пикетах около 35-37 метров происходит постепенное изменение волновой картины и в левой части комплекса конфигурация осей синфазности становится более сложной, амплитуда отражений резко меняется на небольших расстояниях (рис. 7.5, Глава 7). Известно, что аллювиальные отложения характеризуются, как правило, значительной литофациальной неоднородностью, что, по-видимому, и нашло свое отражение в отмеченных изменениях волновой картины. По этим признакам имеются все основания выделить две георадарных фации в среднем комплексе и границу между ними провести в районе пикетов 35-37 метров.

В отличие от сейсмических наблюдений, когда исследования проводятся, как правило, на больших площадях, георадиолокационные работы зачастую выполняются на ограниченных участках и их глубинность значительно меньше. Поэтому нередко возникают ситуации, когда на изучаемой площадке не наблюдается очевидных изменений волновой картины внутри выделенных комплексов, т.е. провести фациальный анализ не представляется возможным. Тем не менее имеющиеся материалы показывают, что и при георадиолокационных исследованиях отличия в волновой картине, также как и при сейсмических работах, могут быть значительными. На рис. 8.1-8.3 представлены несколько основных типов волновых картин и указаны отложения, которым они соответствуют. Как было указано выше, морфология осей синфазности отраженных электромагнитных волн на радарограммах довольно часто указывает на генезис изучаемых отложений, однако необходимо подчеркнуть, что прямого соответствия между типом волновой картины и типом отложений не существует. На рис. 8.1б, 8.2а и 8.3б показаны типы волновых картин, которые получены при изучении песчаных осадков. Как видно, записи сильно отличаются друг от друга. Из этого следует, что определение состава отложений без привлечения других данных (бурения или материалов других методов) может привести к значительным ошибкам.

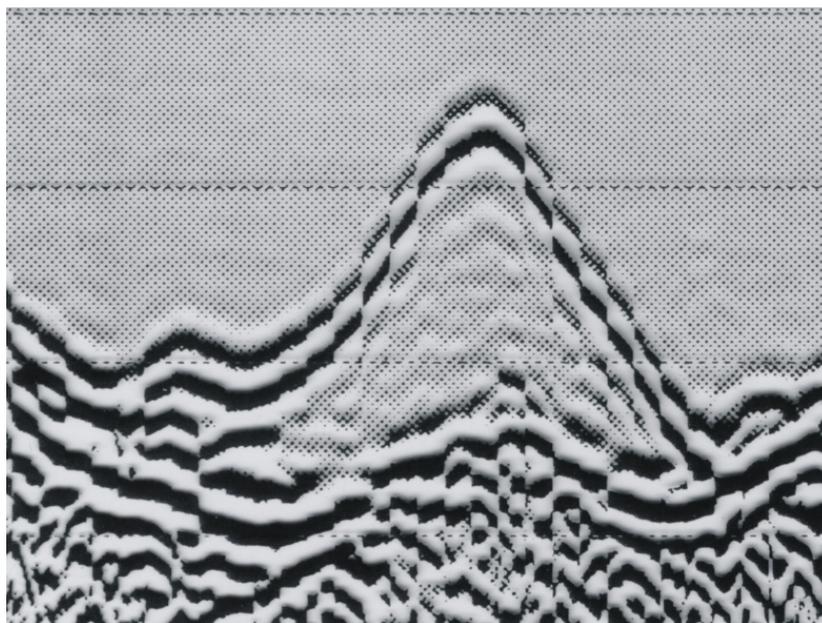


А

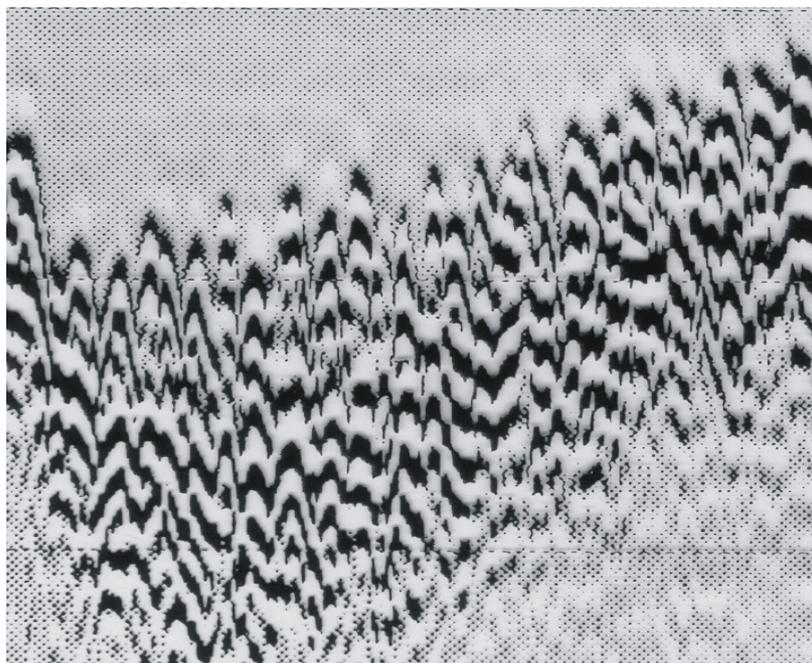


Б

Рис. 8.1. Фрагменты радарограмм с различными типами волновых картин: А – параллельные оси синфазности (отложения по данным бурения представлены известняками); Б – наклонные оси синфазности (косослоистый тип, отложения представлены прибрежно-морскими песками).

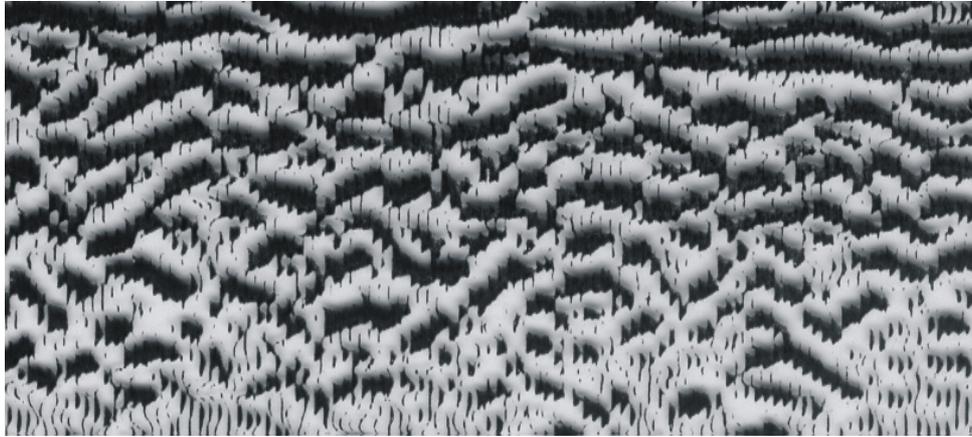


А

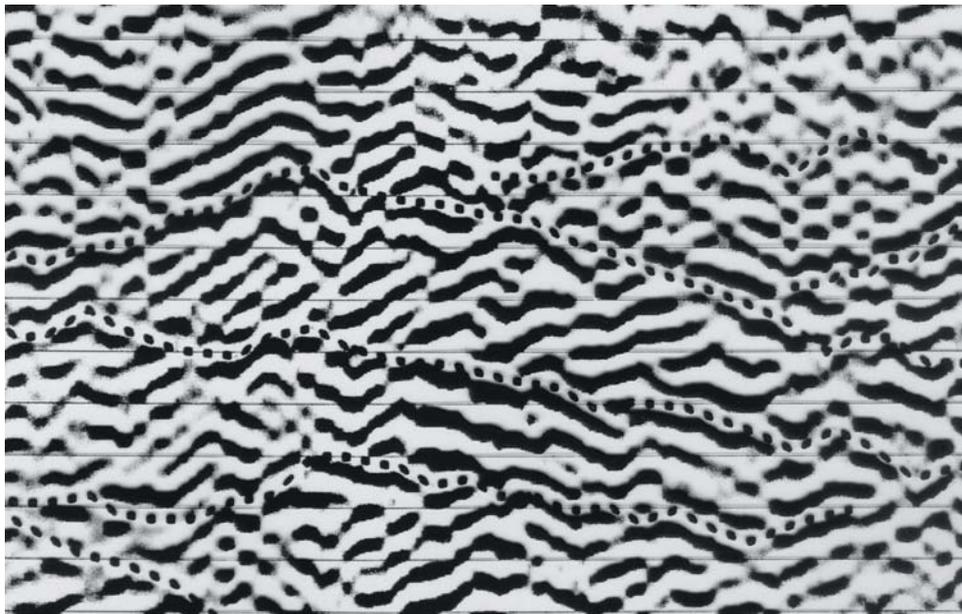


Б

Рис. 8.2. Фрагменты радарограмм с различными типами волновых картин: А – «прозрачный» тип (отложения представлены песками); Б – «хаотический» тип (преимущественно гравийно-галечниковые отложения).



А



Б

Рис. 8.3. Фрагменты радарограмм с различными типами волновых картин: А – бугристый (отложения представлены алевритами); Б – линзовидный (отложения представлены преимущественно песками).

Натурные исследования, проведенные нами, показывают, что образование различных осей синфазности на радарограммах, полученных при изучении песчаных отложений, обусловлено изменением гранулометрического состава как самих песков, так и присутствием глинистого материала.

При региональных работах (т.е. на протяженных профилях) проведение фациального анализа существенно облегчается, так как изменение состава осадков встречается гораздо чаще. На рис. 8.4 показан фрагмент профиля, выполненного на реке. Разрез представлен здесь коренными отложениями (гранитами), перекрытыми тонким покровом терригенных осадков. На радарограмме терригенные отложения выделяются как верхний георадарный комплекс, в пределах которого наблюдаются три типа волновой картины (слева направо 3, 4 и 5), причем переходы между ними довольно постепенные – от субгоризонтальных (5) осей синфазности до отчетливых гиперболических (3). Опробование показало, что на дне здесь обнажаются чистые пески (зона 5), галечники (зона 4) и преимущественно крупновалунные отложения (зона 3).

При проведении детальных одноканальных сейсмоакустических наблюдений на акваториях на частотах в сотни герц и выше глубинность исследований часто зависит от присутствия в разрезе газонасыщенных отложений, которые из-за большого поглощения иногда полностью «экранируют» нижележащие осадки. Аналогичное по сути явление отмечается и в георадиолокации, когда в разрезе присутствуют сильно поглощающие электромагнитные волны слои глины или плотного суглинка (особенно увлажненные), вследствие чего также наблюдается эффект «экрана». На рис. 8.5а показан георадиолокационный профиль, выполненный на участке добычи песчано-гравийных отложений. Варианты интерпретации представлены на рис. 8.5б,в: б - без привлечения дополнительных данных; в - с привлечением дополнительных материалов. Вариант интерпретации на рис. 8.5б с точки зрения анализа волновой картины не вызывает возражений, однако наличие в левой части данного профиля слоя глины (5) приводит к указанному выше эффекту («экранированию») и не совсем правильной геологической интерпретации в этой части профиля (ср. варианты б и в). Таким образом, значительные изменения глубинности по профилю, как в рассматриваемом случае, могут указывать на присутствие в разрезе так называемых «экранирующих» слоев, т.е. будет выделяться только их кровля. Наиболее часто роль таких прослоев играют глинистые толщи. В подобных ситуациях необходимо привлекать данные других методов (особенно электроразведки) или бурения. Подобный «фациальный» анализ данных георадиолокации должен проводиться с привлечением всех доступных геологических, гидрогеологических и геофизических материалов. Как уже отмечалось выше, на заключительном этапе интерпретации необходимо перейти к общеупотребительным в геологии терминам и отказаться от

использования таких терминов как георадарный комплекс и георадарная фация.

В зависимости от целей георадиолокационных исследований, кроме построения разрезов (и при наличии площадной съемки) можно строить карты распространения выделенных комплексов и (или) фаций, и на их основании делать выводы об их генезисе.

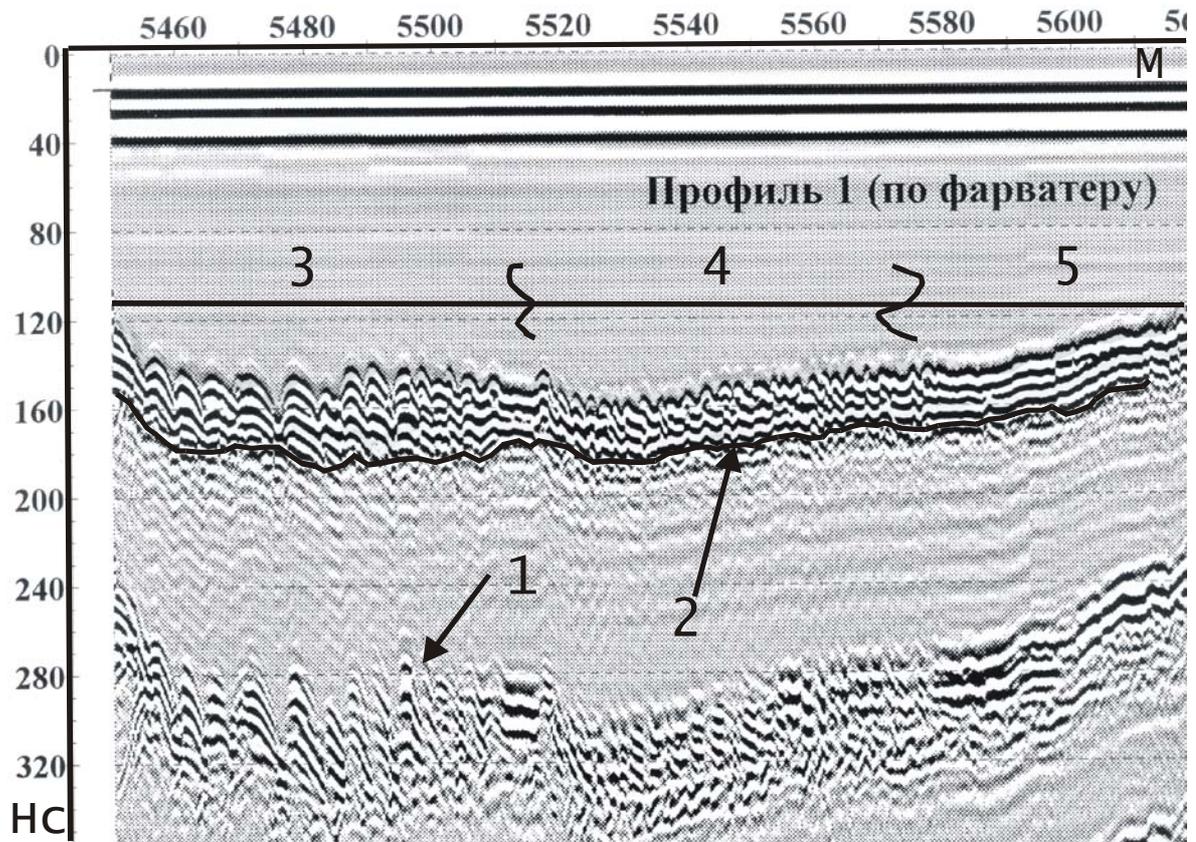


Рис. 8.4. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного на реке с экранированной антенной 300 МГц.

1 – кратная от дна; 2 – кровля коренных отложений, представленных гранитами; 3 – участок дна, сложенный преимущественно крупными валунами; 4 – участок дна, сложенный преимущественно галечниками; 5 – участок дна, сложенный чистыми песками.

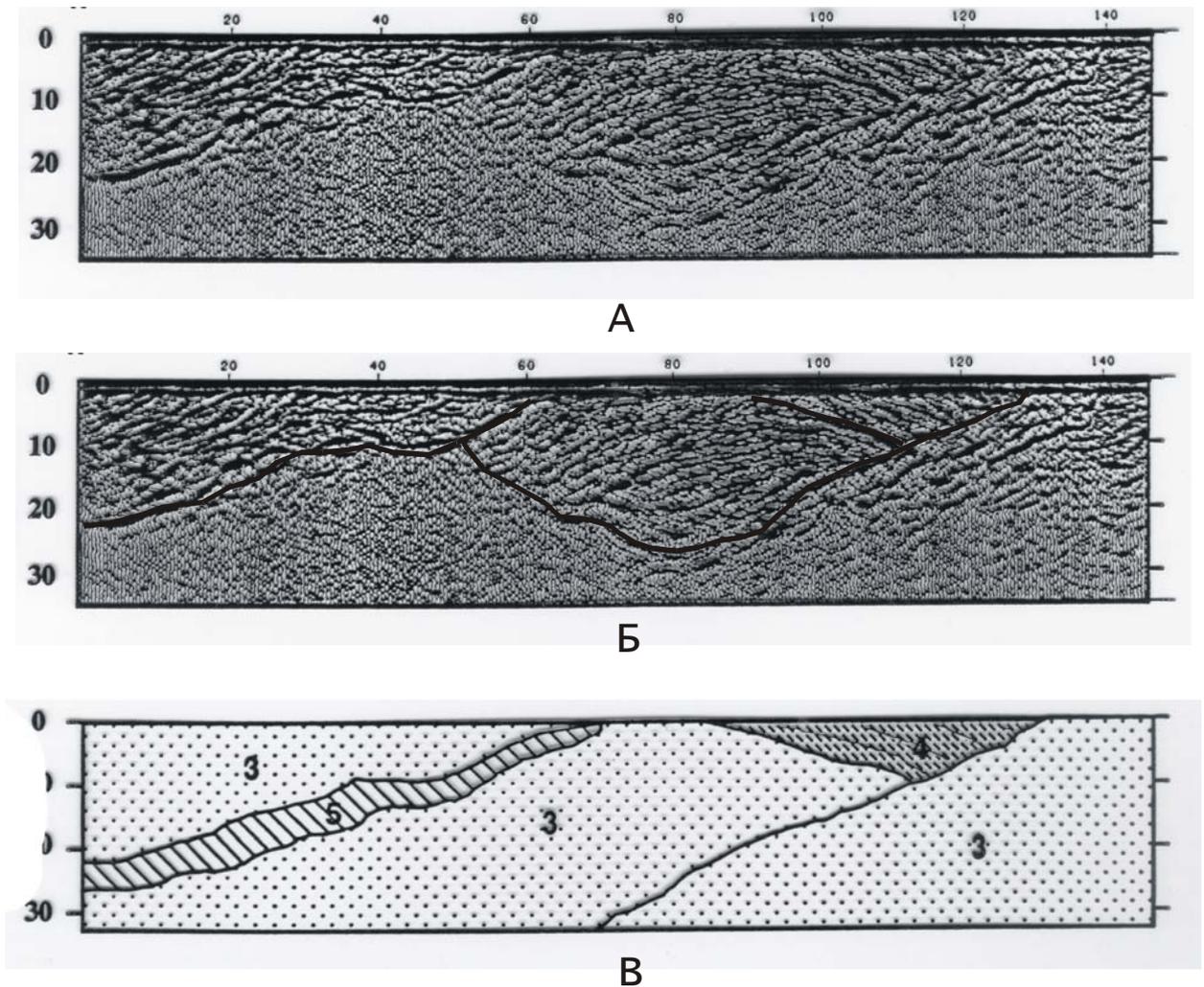


Рис. 8.5. Георадиолокационный профиль, выполненный на участке добычи песчано-гравийных отложений (по [33] с дополнениями авторов):
 А – георадиолокационный профиль;
 Б – вариант интерпретации без привлечения дополнительных данных (проведены только основные отражающие горизонты);
 В – вариант интерпретации с привлечением данных бурения: 3, 4 – песчано-гравийные отложения; 5 – слой глины.

Глава 9. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПРИВЯЗКА ГЕОРАДАРНЫХ КОМПЛЕКСОВ И ФАЦИЙ. [3, 23, 28]

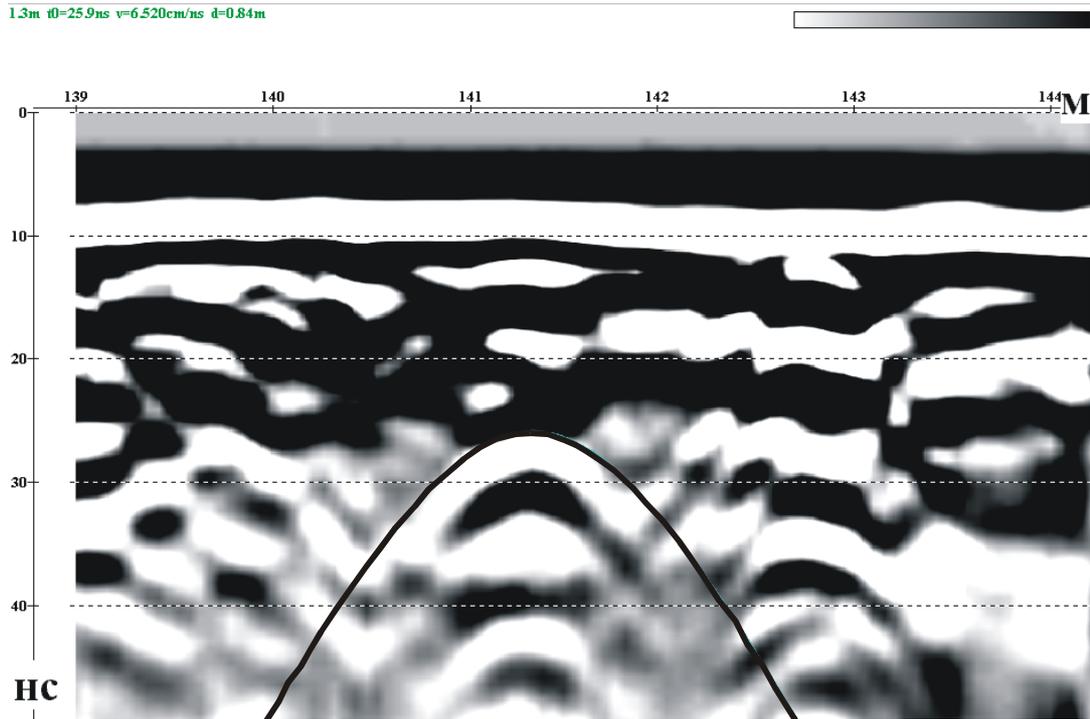
Изучение геологического (в широком смысле) строения верхней части разреза методом георадиолокации проводится в два этапа. Первый этап заканчивается расчленением разреза на георадарные комплексы и фации. На втором этапе необходимо выяснить их литологический состав, мощности и положение уровня грунтовых вод, для чего, как правило, используются данные бурения. Если они отсутствуют, привязка может осуществляться по имеющимся в районе работ обнажениям и по разрезам шурфов. Однако даже при наличии скважин на профиле возникает ряд проблем, одной из которых является определение скоростей распространения электромагнитных волн, необходимых для пересчета из временного в глубинный масштаб.

9.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

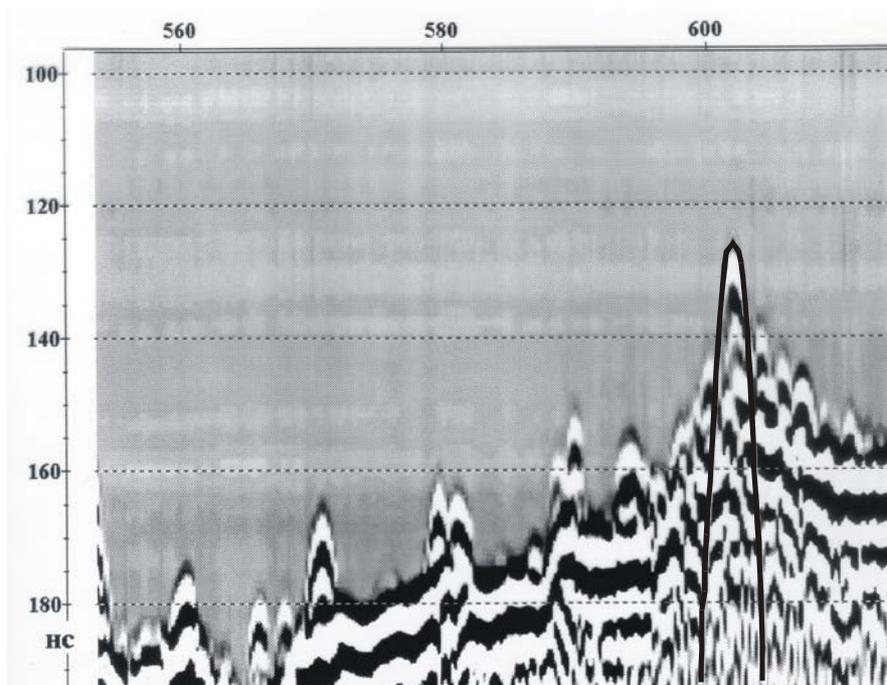
Определение скоростей в выделенных комплексах и фациях может производиться несколькими способами. Наиболее распространенным способом оценки скорости является ее определение по годографам дифрагированных волн. В большинстве систем обработки георадиолокационных данных этот прием производится следующим образом. На экран компьютера вместе с радарограммой вызывается теоретическая гипербола, параметры которой и местоположение на экране могут устанавливаться пользователем. Теоретическая гипербола накладывается на ось синфазности дифрагированной волны, выделяемой на радарограмме, и ее параметры подбираются до их максимально полного совмещения. Таким образом, путем сравнения (компарационный метод измерений) определяется скорость распространения волн в толще от поверхности наблюдения до дифрагирующего объекта, глубина его залегания и место проекции на профиль (рис. 9.1). На реальных радарограммах годографы дифрагированных волн не всегда выделяются уверенно, наиболее часто наблюдаются только верхние части гипербол, поэтому можно говорить только об оценке величины скорости. Очевидно, что при этом способе существенную роль играет и точность измерения длины профиля.

Второй прием основан на использовании результатов наблюдений на переменной базе с использованием уравнения годографа отраженной волны (рис. 9.2). Технически этот прием может быть реализован в системе обработки подобно предыдущему, только теоретическая гипербола построена на основании уравнения годографа не дифрагированной, а отраженной волны. Этот прием можно использовать при отсутствии в разрезе дифрагирующих объектов, однако в реальных условиях применять его не всегда удастся, так как для этого необходимо наличие в разрезе отчетливых осей синфазности отраженных волн, что наблюдается далеко не

всегда. Этот метод также практически не работает, если выделение комплексов производилось по изменению волновой картины.



А



Б

Рис. 9.1. Фрагменты радарограмм с примерами оценки скоростей распространения электромагнитных волн по годографам дифрагированных волн: А – при работах на суше (скорость 6.5 см/нс, глубина до объекта около 0.8 м); Б – при работах на воде (скорость 3.3 см/нс, глубина воды около 2 метров). Сплошной черной линией показана теоретическая гипербола.

И в первом и во втором способах имеется ряд ограничений, которые существенно снижают их применимость:

- 1- а) дифрагирующие объекты расположены, как правило, в самой верхней части разреза и не могут быть использованы при оценке скоростей для всего разреза;
- б) расположение этих объектов обычно крайне неравномерно по профилю, а на некоторых участках они могут вообще отсутствовать;
- 2- интенсивные оси синфазности встречаются в разрезах также нечасто и, как было показано выше (см. гл. 2 и 3), они не всегда являются единственными границами между георадарными комплексами. Иными словами, оценка значений скоростей может быть произведена только для отдельных частей разреза (на рис. 9.2 показана благоприятная ситуация, когда в разрезе выделяется много осей синфазности отраженных волн).

Третий способ оценки скоростей (его можно назвать методом подбора) применяется, когда в разрезе отсутствуют дифрагирующие объекты (или их мало) и нет возможности построить годографы отраженных волн, а разрезы скважин имеются [3]. В этом случае есть временной разрез – радарограмма с временами прихода отраженных волн, есть литология и мощности слоев по данным бурения и, зачастую, глубина залегания уровня грунтовых вод (УГВ). Привязка осуществляется сверху вниз. Самая верхняя ось синфазности отраженной волны предположительно коррелируется с кровлей (или подошвой) одного из верхних слоев разреза, выделенных по данным бурения. Имея расстояние (т.е. мощность слоя) и время, можно рассчитать скорость распространения электромагнитной волны (и, соответственно, диэлектрическую проницаемость) для данного слоя. Если полученные значения реальны, то V и ϵ далее рассчитываются для нижележащего слоя. В противном случае к мощности верхнего слоя добавляется мощность нижележащего и процедура повторяется. Таким образом, производится оценка скорости и диэлектрической проницаемости по всему изученному разрезу сверху вниз. Опорной границей будет являться уровень грунтовых вод, ниже которого должно отмечаться значительное увеличение значений диэлектрической проницаемости. Критерием правильности подбора V и ϵ является их соответствие имеющейся геолого-гидрогеологической информации по данному району и сопоставление с опубликованными результатами, полученными в аналогичных условиях. Пример подобного подбора показан на рис. 9.3. Следует обратить внимание, что ниже кровли водонасыщенных песчаных отложений значение диэлектрической проницаемости резко увеличилось.

Четвертый способ оценки скорости в отдельных слоях заключается в расчете ее по известной формуле – $V=c/\sqrt{\epsilon}$ (см. Часть 1), если имеется возможность измерить диэлектрическую проницаемость в этих слоях. Однако в реальных условиях такая ситуация встречается крайне редко.

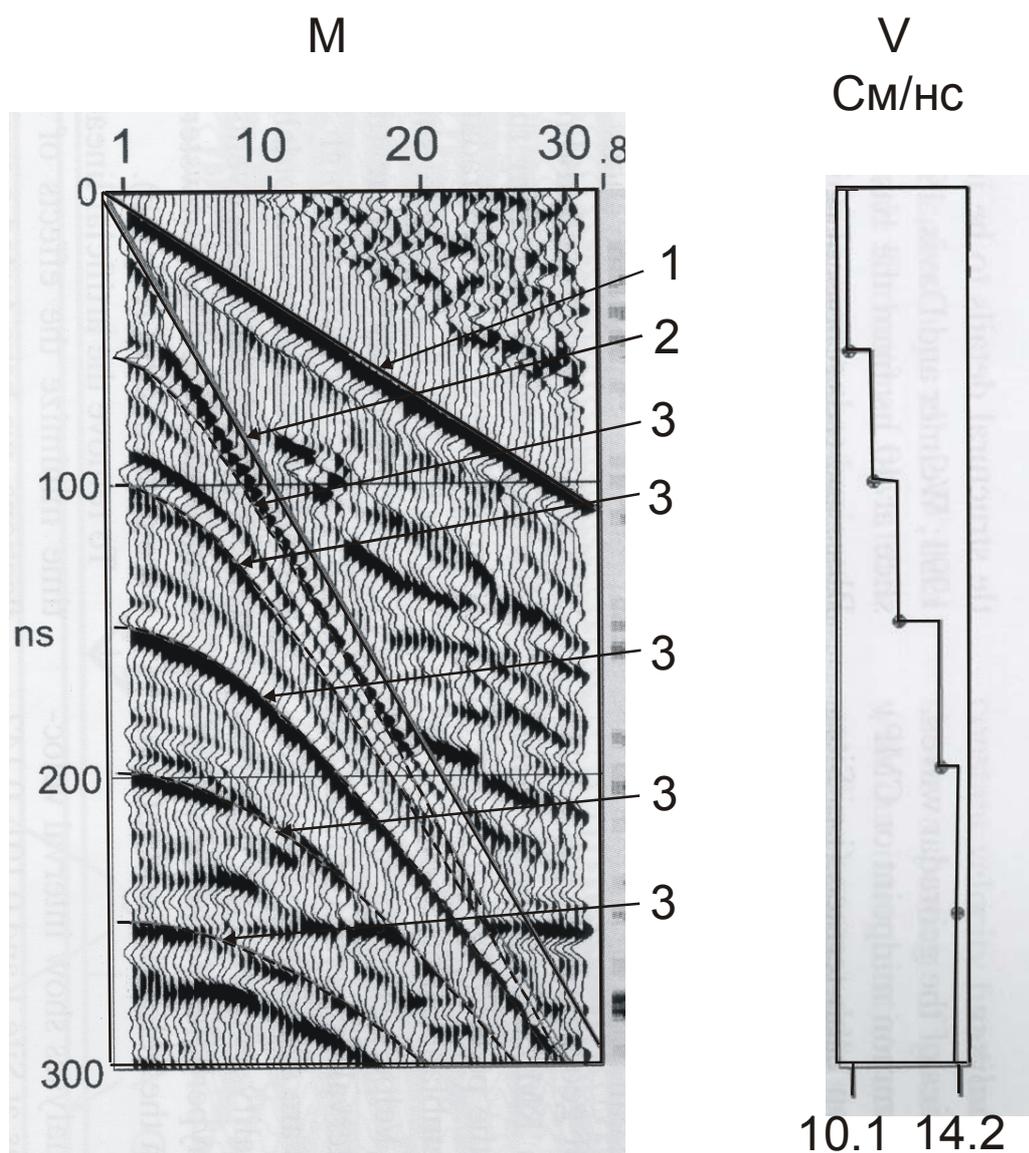


Рис. 9.2. Оценка скоростей электромагнитных волн по годографам отраженных волн (слева – годографы, справа – интервальные скорости, [23]).

- 1 – прямая воздушная волна;
- 2 – прямая волна по грунту;
- 3 – отраженные волны.

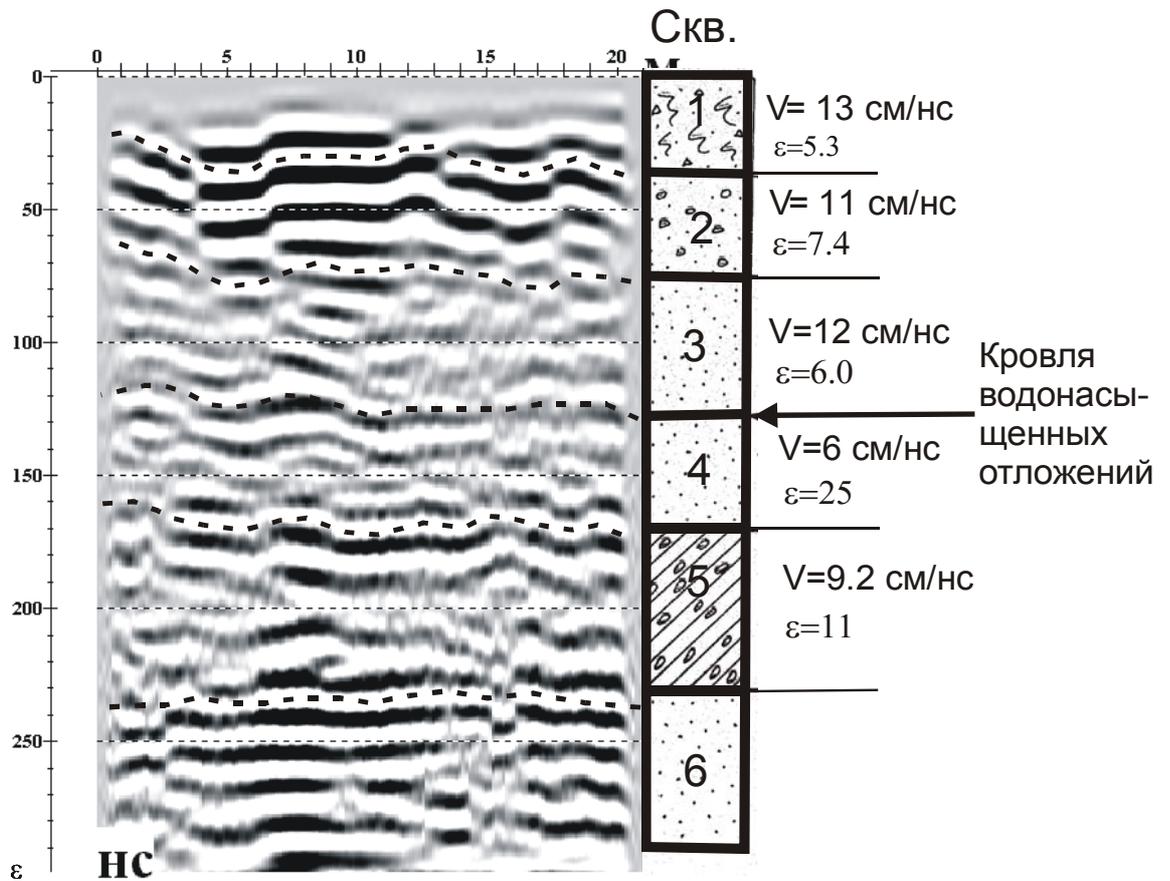


Рис. 9.3. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного с антенной 75 МГц. Справа показан разрез скважины и рассчитанные значения диэлектрической проницаемости и скорости распространения электромагнитных волн. Ниже кровли слоя 4 значение диэлектрической проницаемости резко увеличилось (с 6.0 в слое 3 до 25 в слое 4), что свидетельствует о значительном увлажнении слоя 4. По данным бурения слой 4 сложен водонасыщенными песками, которые залегают на практически водонепроницаемых ледниковых суглинках ($\epsilon=11$).
 Разрез скважины: 1 – техногенные грунты; 2 – пески гравелистые; 3 – пески мелкие; 4 – пески мелкие влажные; 5 – суглинки с гравием, тугопластичные; 6 – пески мелкие влажные.

9.2. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПРИВЯЗКА ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ.

Георадиолокационные исследования зачастую проводятся в районах, где данные бурения либо вообще отсутствуют, либо скважины находятся достаточно далеко. Если скважины имеются, то привязка осуществляется одним из перечисленных выше способов (см. раздел 9.1 этой главы). При отсутствии данных бурения для геологической привязки необходимо использовать ту информацию, которую можно почерпнуть непосредственно в районе проведения работ. В первую очередь это относится к определению уровня грунтовых вод, который выделяется на радарограммах, как правило, по интенсивным осям синфазности отраженных волн и служит своеобразным репером при интерпретации. Однако следует отметить, что довольно часто сведения об УГВ на участках работ отсутствуют. Если в непосредственной близости от района исследований находится какой-нибудь водоем (пруд, озеро или река), то границу УГВ, которая совпадает с уровнем воды, можно прокоррелировать, соединив георадиолокационным профилем этот водоем с участком работ. Имея на радарограмме четко привязанный УГВ, можно более уверенно прогнозировать значения скоростей распространения электромагнитных волн ниже и выше этого уровня при пересчете из временного в глубинный масштаб.

Для геологической привязки также можно использовать естественные обнажения (стенки карьеров и других искусственных выемок, склоны оврагов и т.д.). Если эти объекты находятся вблизи изучаемого района, то, как и в вышеописанном случае, делается соединительный профиль. Далее методом подбора проводится оценка скоростей.

Важным репером при изучении строения верхней части разреза георадарным методом является наличие в разрезе глин или суглинков, особенно увлажненных. Вследствие большого поглощения электромагнитных волн, кровля этих отложений является как бы «экраном» для нижележащих толщ (рис. 9.4). Подобный слой можно сравнить с часто выделяемым при интерпретации сейсмоакустических данных «акустическим» фундаментом. Так как средняя глубинность георадарных исследований при работах с различными антеннами в общем известна, то при резком ее изменении по профилю или изначально небольшой глубинности исследований, необходимо проанализировать вопрос о возможном наличии в разрезе глин или суглинков (см. Главу 8, рис. 8.5).

Важное значение при геологической интерпретации имеет также сопоставление георадиолокационных данных с материалами других геофизических методов, в первую очередь, с электроразведкой и сейсмическими данными. Присутствие в разрезе глин и УГВ довольно уверенно определяется, например, с помощью электроразведки.

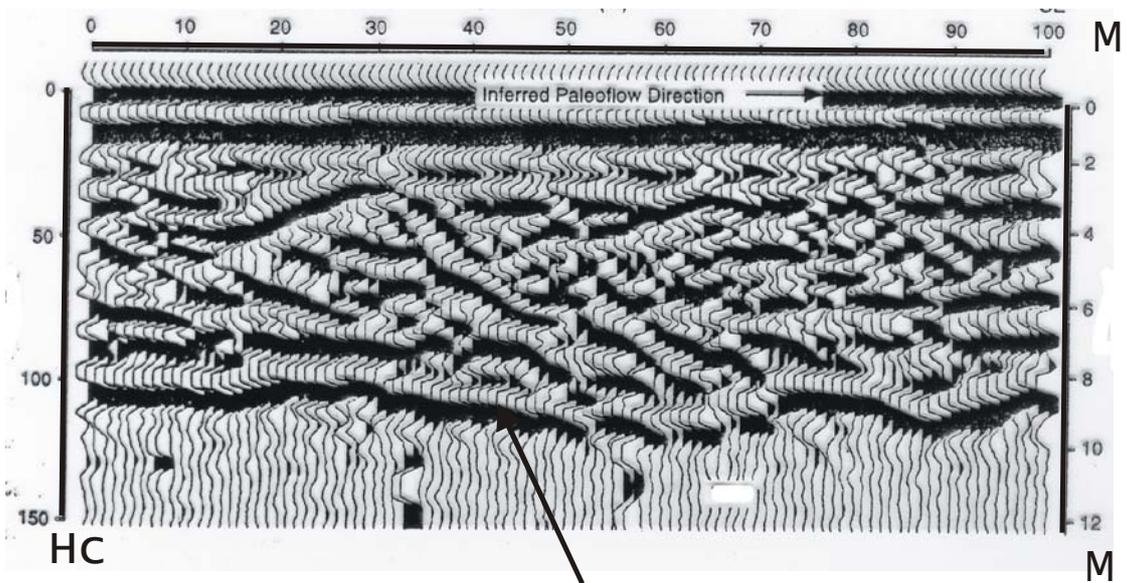


Рис. 9.4. Георадарный профиль, полученный с антенной 100 МГц ($V=16$ см/нс). Стрелкой показана кровля ледниковых глин [28].

Часть 3. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ПРИ РЕШЕНИИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАДАЧ

В данном разделе представлены материалы георадиолокационных исследований, полученные в основном сотрудниками кафедры сейсмометрии и геоакустики, во время выполнения опытно-методических работ. Данные объединены в несколько глав в соответствии с типом решаемых задач: поиск и обнаружение разнообразных объектов, гидрогеологические исследования, геологические исследования, изучение верхней части разреза в условиях развития многолетнемерзлых пород, исследования на пресноводных акваториях (реках, озерах и прудах), а также изучение возможностей использования георадиолокации в геотехнике. Очевидно, что это разделение на главы довольно условно, тем более что большая часть исследований верхней части разреза, как правило, имеет инженерно-геологическую направленность. Авторы надеются, что публикация этих материалов с вариантами интерпретации позволит специалистам, интересующимся практическим использованием георадиолокации, не только развивать далее методику интерпретации, но и найти новые области ее применения в геологии и геотехнике. Каждый раздел проиллюстрирован наиболее характерными примерами. Необходимо отметить, что некоторые особенности волновых картин, которые используются нами при идентификации тех или иных объектов, не получили в настоящее время научного обоснования, однако заверка этих георадиолокационных данных в ряде случаев показывает, что эти признаки «работают». Авторы надеются, что, обратив внимание на такие примеры, общими усилиями решение этих проблем будет найдено.

Глава 10. ПОИСК ОБЪЕКТОВ ИСКУССТВЕННОГО И ЕСТЕСТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ [25]

Среди множества задач, решаемых с помощью георадиолокации, поиск и обнаружение различных объектов является одним из основных направлений. К нему относятся: поиск трубопроводов различного назначения; обнаружение электрических и телефонных кабелей; поиск разнообразных включений искусственного и естественного происхождения, таких как крупные валуны, остатки строительных конструкций, емкости; обнаружение пустот в естественных и искусственных образованиях; поиск археологических объектов и т.д. Как видно из перечисления объектов, они имеют различную форму как в разрезе, так и в плане, что в значительной степени влияет на конфигурацию осей синфазности отраженных волн при их отображении на радарограммах. При размерах объектов, сравнимых или немного меньших длины волны и при наличии уступов, ребер и резких углов на них, на радарограммах образуются характерные оси синфазности дифрагированных волн, которые используются для определения средней скорости распространения электромагнитных волн над точкой дифракции и ее глубины залегания (см. Часть 1). Наиболее простая волновая картина наблюдается при георадиолокационном профилировании над трубами, хотя и в этом случае четкие гиперболы наблюдаются далеко не всегда, как правило, видны только их вершинные части (рис. 9.1a). Опыт работ показывает, что для решения этой задачи часто лучше использовать необработанные исходные данные. Информативность георадарной съемки, как уже указывалось ранее, сильно зависит не только от состава отложений, но и от увлажненности разреза, т.е. в том числе и от погодных условий. Методические работы, проведенные нами над известными трубопроводами, расположенными в сухих и увлажненных грунтах, показали, что при значительном увлажнении разреза трубопроводы, даже большого диаметра и неглубоко залегающие, практически не выделяются. Так, например, металлический трубопровод диаметром 140 см и находящийся на глубине 120 см во влажных суглинках на радарограммах, полученных с антеннами 75, 300 и 500 МГц, не выделяется. В настоящее время нет убедительных экспериментальных данных о возможности обнаружения труб из различных материалов, разного диаметра, расположенных на различных глубинах и заполненных разными флюидами. Следует отметить, что есть материалы, свидетельствующие о том, что над пластиковыми трубами по сравнению с металлическими меняется полярность сигнала. В инструкции по использованию георадара SIR приводятся данные о возможности определения объектов цилиндрической формы из металла и пластика на глубинах в первые метры. В частности, отмечается, что труба из пластика, залегающая во влажном песке на глубине 25 см и диаметром 6 см выделяется очень плохо. Однако все эти сведения довольно разрозненны, не систематизированы и эти вопросы требуют дальнейшего изучения.

Если объекты имеют достаточно большие размеры в плане, то на георадиолокационных профилях кроме осей синфазности дифрагированных волн, которые могут образовываться на их краях, будут выделяться также оси синфазности отраженных от верхней кромки объекта волн. В реальных условиях, вследствие интерференции верхняя кромка зачастую не видна, поэтому основным признаком обнаружения объекта будет наличие дифрагированных волн на его краях.

Неоднократные наблюдения над электрическими кабелями показали, что, в отличие от трубопроводов, они часто выделяются на радарограммах в виде вертикальных зон так называемой «звучащей» записи, интенсивность которой практически не меняется с увеличением времени.

Ниже представлены фрагменты георадиолокационных профилей с примерами выделения разнородных объектов. Следует отметить, что не всегда удастся определить генезис объекта и найти физическое объяснение наблюдаемой волновой картины, можно лишь констатировать сам факт наличия аномального участка записи.

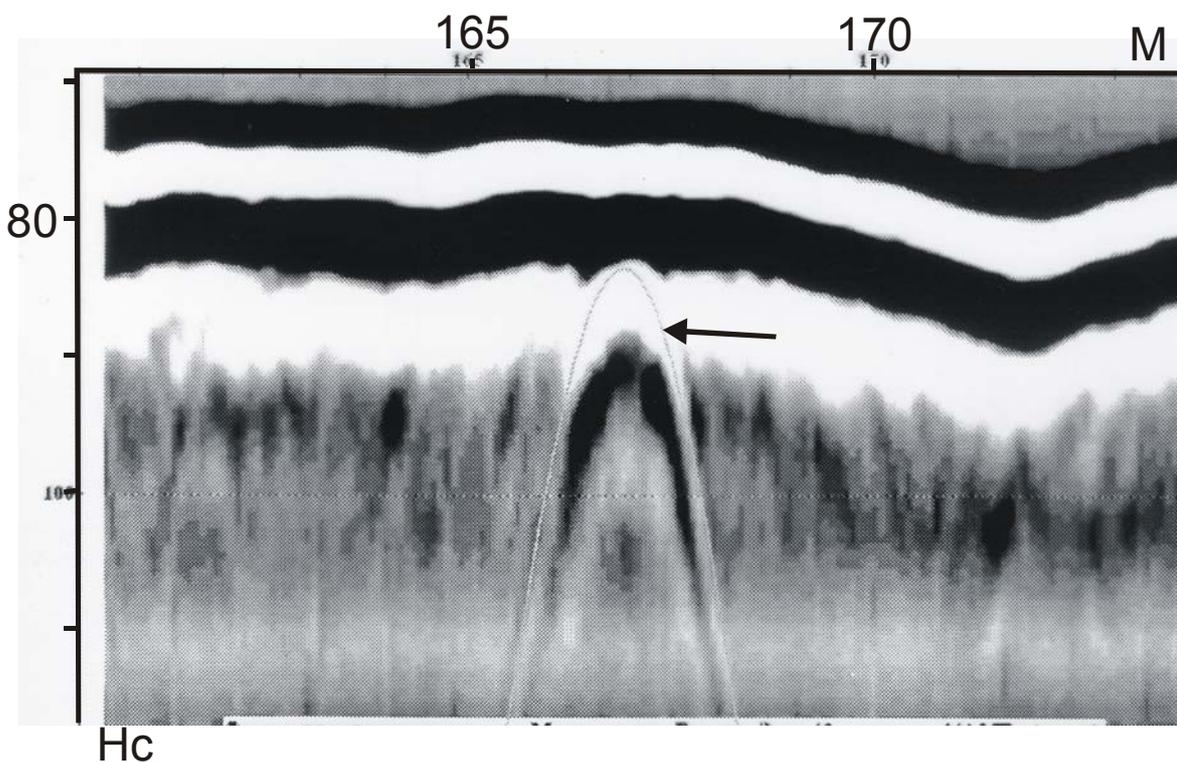


Рис. 10.1. Фрагмент георадиолокационного профиля по р.Москве. Использовалась экранированная антенна 300 МГц. Пример записи дифрагированной волны над трубой под дном реки. Глубина залегания – 1,4 метра от поверхности воды. Стрелкой показана теоретическая гипербола.

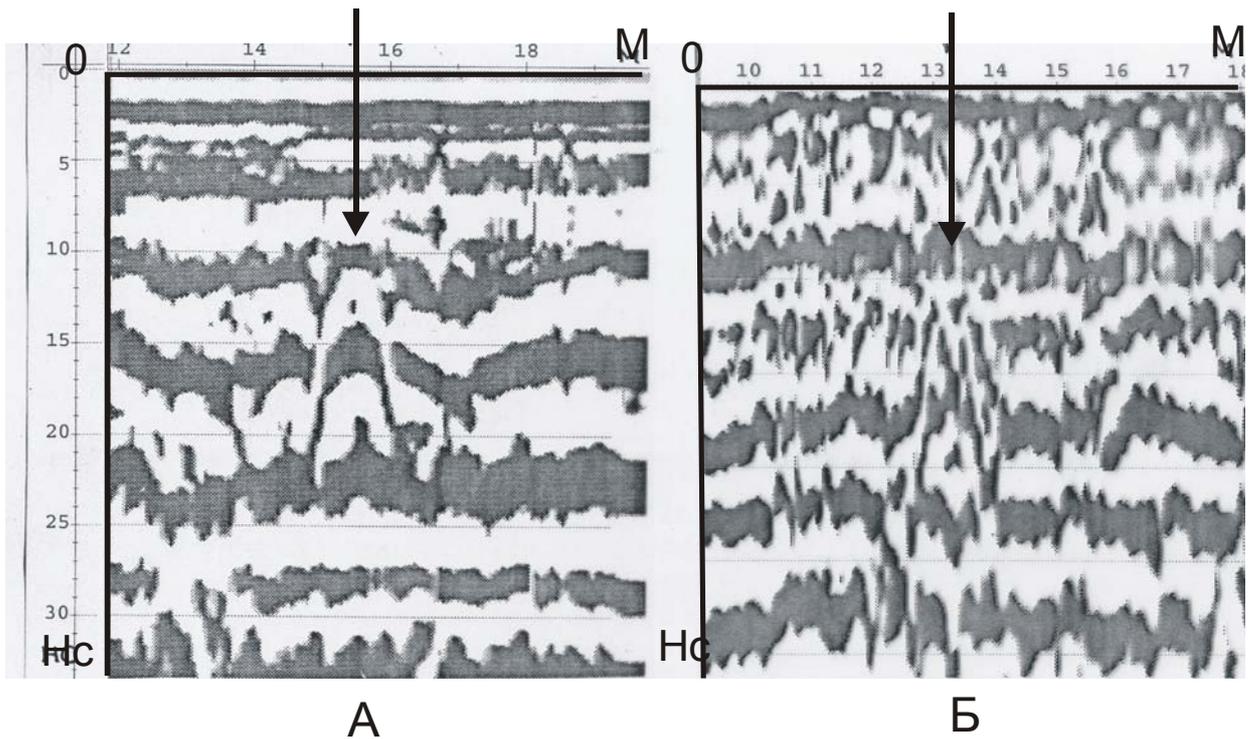


Рис. 10.2. Фрагменты георадиолокационных профилей, пройденных над трубой диаметром 20 см и расположенной на глубине 50 см. Работы были выполнены с интервалом в две недели. В обоих случаях использовалась антенна 500 МГц. А – в сухую погоду; Б – через две недели после дождей. Стрелками показано положение трубы. Сравнение радарограмм показывает, что оси синфазности дифрагированной волны от трубы отчетливо видны в сухом грунте (А), тогда как во влажном (Б) практически не выделяются.

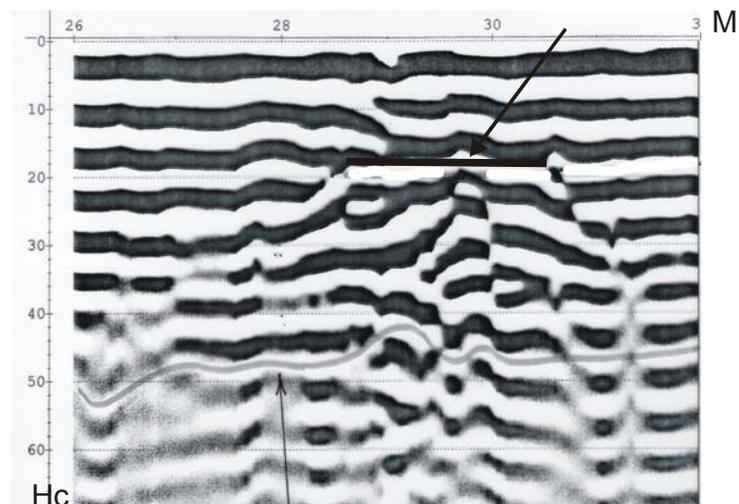


Рис. 10.3. Фрагмент радарограммы, полученной с антенной 300 МГц. Горизонтальная линия – верхняя кромка объекта шириной около 2 м (показана стрелкой на пикете 30 м). На краях объекта (плита ?) не очень отчетливо выделяются оси синфазности дифрагированных волн.

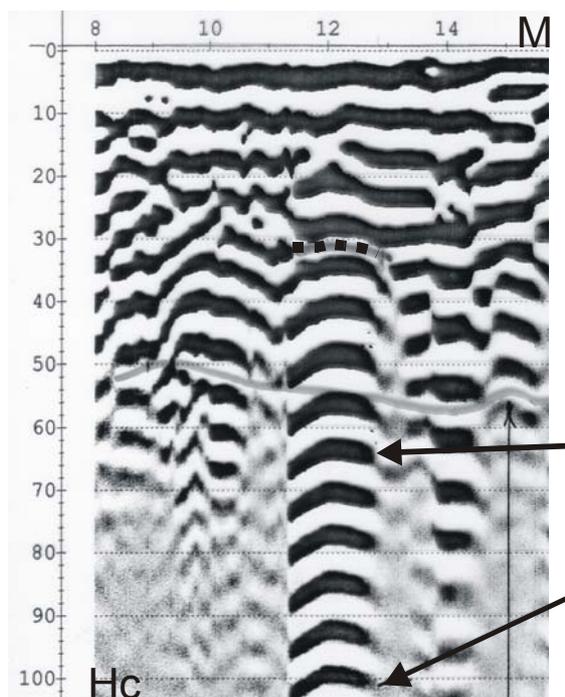


Рис. 10.4. Фрагмент георадиолокационного профиля, полученного с экранированной антенной 300 МГц. Пример так называемой «звучащей» записи (показана стрелками) над объектом шириной около 2 м (интервал 11,0-13,0 м) и расположенного на глубине 30 нс. Тип объекта не выяснен.

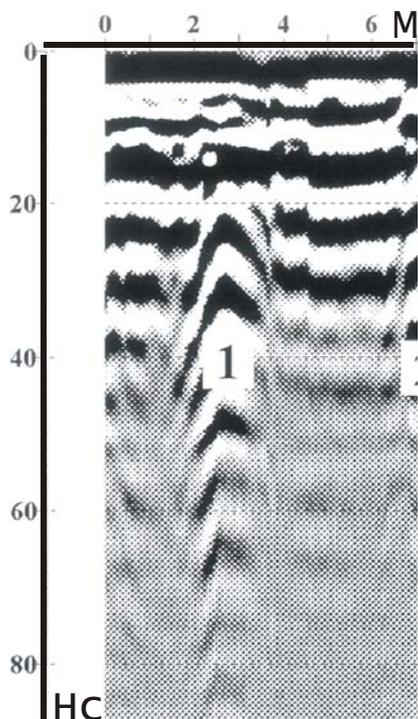


Рис. 10.5. Фрагмент георадиолокационного профиля над электрическим кабелем (пикет 2,7 м, глубина – 0,7 м при $V=8,2$ см/нс), выполненного с экранированной антенной 300 МГц. 1 – характерная «звучащая» запись. Наличие кабеля подтверждено вскрытием.

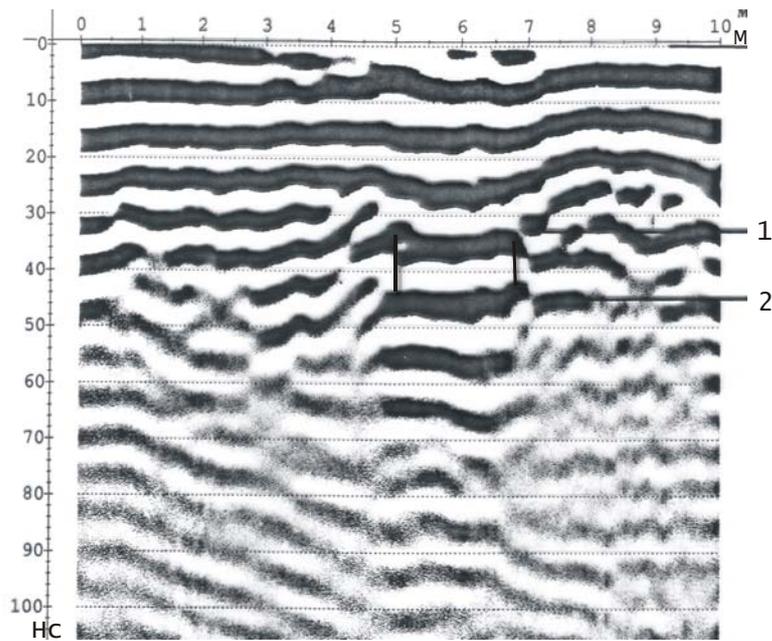


Рис. 10.6. Фрагмент георадиолокационного профиля, проходящего над известным коллектором (глубина до верхней кромки коллектора 1,8 м, высота – 1,6 м). Использовалась экранированная антенна 300 МГц. Ширина коллектора – 2 м (пикеты 5 –7 м). 1 – верхняя кромка коллектора; 2 – основание коллектора. Цель исследований – определить точное положение коллектора на местности. Средняя скорость распространения электромагнитных волн в отложениях до верхней кромки коллектора, определенная по годографам дифрагированных волн – 11,2 см/нс, внутри коллектора – 30 см/нс (скорость в воздухе). Над коллектором наблюдается «проседание» осей синфазности, под ним – зона «звучащей» записи. От ребер коллектора не очень отчетливо видны «усы» дифракции.

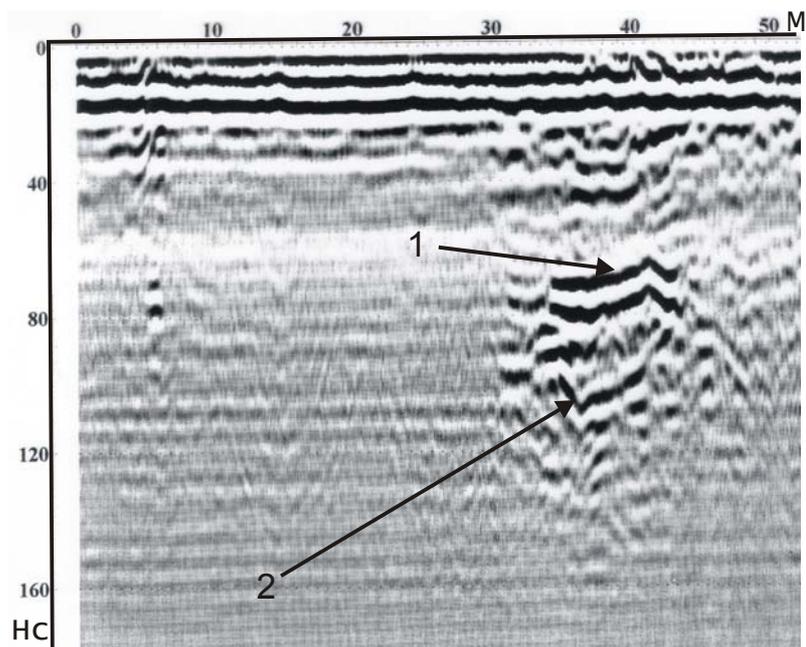


Рис. 10.7. Фрагмент георадиолокационного профиля, пройденного вдоль обрыва. Использовалась экранированная антенна 300 МГц. Разрез представлен изверженными породами. В стенке обрыва находится вход в пещеру, измеренная максимальная высота которой немного меньше 6 метров, что хорошо согласуется с высотой, определенной по данным георадиолокации. 1,2 – оси синфазности отраженных волн: 1 - от свода пещеры, 2 – от ее основания. Аналогичные типы волновых картин получены при изучении карста в Испании [25].

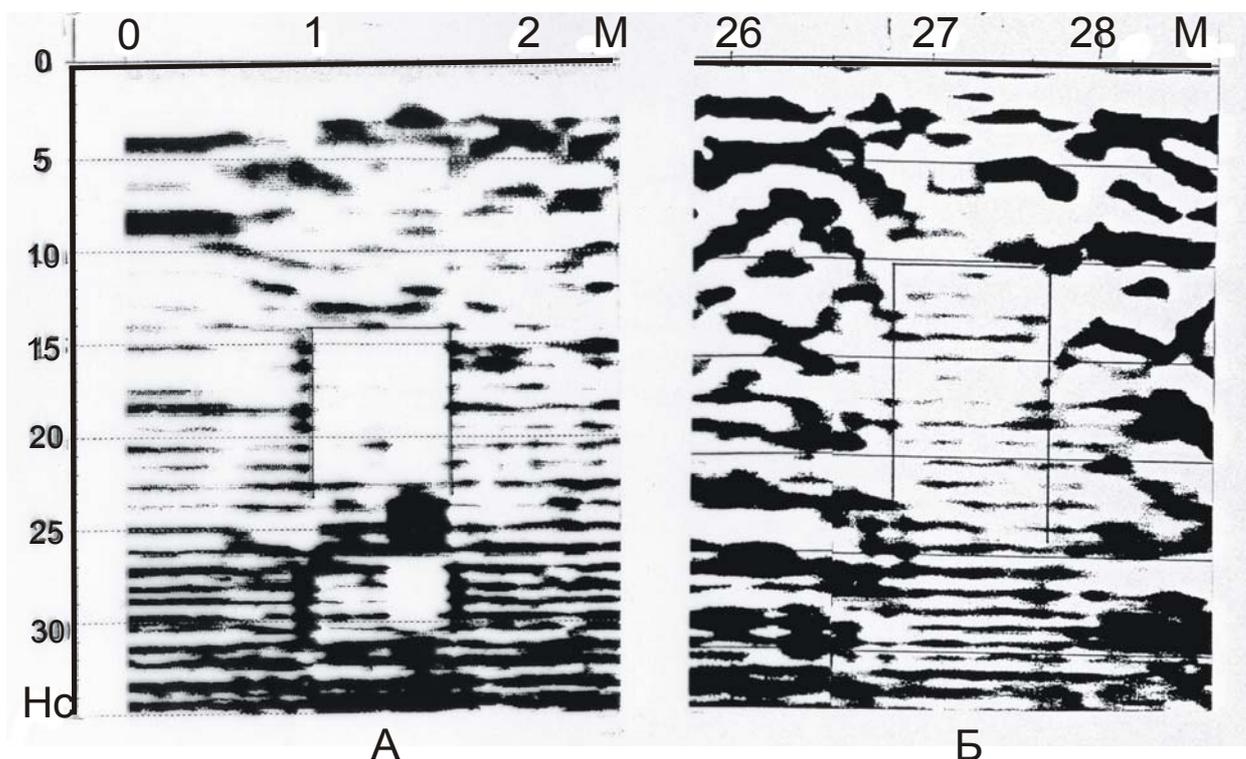


Рис. 10.8. Фрагменты георадиолокационных профилей, выполненных с антенной 900 МГц. Целью исследований было обнаружение остатков фундамента здания и их привязка на местности. План фундамента был известен. Сопоставление георадиолокационных данных и плана здания показало, что на радарограммах выделяются аномальные по частоте зоны (показаны тонкими линиями), ширина которых и их пространственное положение хорошо согласуются с планом фундамента здания. Выделены аномальные зоны двух типов: А – аномальная зона, выделяющаяся по более низкой частоте по сравнению с окружающими участками, где запись высокочастотная. Б – высокочастотная аномальная зона «внутри» более низкочастотной. Физического объяснения этим особенностям волновой картины не найдено, однако использование данных признаков позволило решить поставленную задачу.

Глава 11. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ [1, 8, 12]

В данном разделе будут рассмотрены некоторые результаты применения георадиолокационной съемки при изучении гидрогеологических особенностей разреза. К ним мы относим определение положения уровня грунтовых вод (УГВ) или верховодки, наблюдение за их изменением, а также выявление зон локального увлажнения. Многочисленные натурные и лабораторные эксперименты показывают, что в диапазоне метровых волн действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости ϵ' , а следовательно и скорость распространения электромагнитных волн V сильно зависят от влажности отложений W (подробнее см. Ч.1). Из этого следует, что граница изменения влажности в разрезе должна быть достаточно резкой, а оси синфазности отраженных от этой границы волн на радарограммах - интенсивными. Однако этот признак не всегда наблюдается. Выраженность границы увлажнения на георадиолокационных профилях зависит от многих факторов – от литологии отложений, глубины ее залегания, наличия зоны капиллярного поднятия, структурных особенностей строения разреза и т. д.

В терригенных разрезах, представленных песчано-глинистыми и более грубыми отложениями переход между зоной аэрации и влагонасыщенными породами будет более резким в грубозернистых отложениях – песках и галечниках. Иными словами, поверхность влагонасыщения на радарограммах будет представлена четкими и интенсивными осями синфазности. Однако и в этом случае выделение УГВ не всегда является однозначным, особенно при субгоризонтальном строении разреза, когда морфология осей синфазности волн, отраженных от УГВ и от литологических границ раздела, одинакова. В подобной ситуации необходимо привлечение дополнительных данных. При разном наклоне осей синфазности выделение УГВ значительно облегчается. Если разрез сложен мелкозернистыми песками или супесями, то кроме осей синфазности, связанных с УГВ, на радарограммах могут выделяться оси синфазности (или отмечаться изменение волновой картины), обусловленные капиллярным поднятием, причем высота капиллярного поднятия чрезвычайно сильно зависит от гранулометрического состава отложений (см. Таблицу 11.1). С возрастанием дисперсности грунтов размер пор в них уменьшается, и в соответствии с этим увеличивается высота капиллярного поднятия.

Таблица 11.1. Высота капиллярного поднятия для некоторых типов отложений [12].

ТИП ОТЛОЖЕНИЙ	H_k , м
Песок крупнозернистый	0,02 – 0,04
Песок среднезернистый	0,15 – 0,35
Песок мелкозернистый	0,35 – 1,0
Супесь	1,0 – 1,5

Суглинок	3,0 – 4,0
Глина	до 8,0
Лессы	до 4,0 за два года

Выделение УГВ с помощью метода георадиолокации значительно облегчается, если в изучаемом районе или в непосредственной близости от него расположены какие-нибудь водоемы (пруды, реки, озера и т.д.), т.е. имеется возможность проследить УГВ непосредственно от уреза воды на участок работ, заложив специально для этого хотя бы один профиль. При необходимости можно вести регулярные наблюдения над колебаниями УГВ, что может иметь большое значение при инженерно-геологических и геоэкологических исследованиях.

Наряду с такими довольно стандартными исследованиями часто возникает необходимость в обнаружении мест локального увлажнения, которые могут иметь место, например, при протечках на теплотрассах, что приводит к развитию процессов суффозии, образованию зон разуплотнения и, как правило, к проседанию грунтов, иногда очень быстрому. Большую скорость и масштабность эти процессы приобретают также при значительных откачках грунтовых и напорных вод из скважин и резком понижении УГВ [8]. Ниже будут приведены некоторые материалы, которые позволяют, на наш взгляд, наметить пути решения этой сложной задачи с помощью георадиолокации. На одном из участков, где произошло образование провала вследствие аварии на теплотрассе (разрыва трубы с горячей водой), был пройден георадиолокационный профиль с экранированной антенной 300 МГц. Анализ волновой картины на исходной полевой записи показал, что на участке профиля, расположенном рядом с провалом, и на некоторых других профилях, выделяется зона характерной низкочастотной записи (10-20 МГц), которая начинается с глубины около 1,5-2,0 метров, т.е. с глубины заложения данных трубопроводов. На этом же георадарном профиле по многочисленным годографам дифрагированных волн были оценены значения скоростей распространения электромагнитных волн, которые показали, что в зонах низкочастотной записи значения скорости падают до 5-6 см/нс, что соответствует сильно увлажненным отложениям. В дальнейшем при проведении опытно-методических работ в другом районе по разработке методики определения утечек из теплотрасс, были выделены ряд участков с аналогичной низкочастотной записью, по которой и были предположительно выделены места утечек. Вскрытие одного из таких участков подтвердило наличие каверн в трубе, через которые и происходила утечка воды. В тех случаях, когда имелась возможность определить скорость распространения электромагнитных волн на участках с низкочастотной записью, практически всегда наблюдались пониженные значения скоростей, что подтверждало корреляцию таких участков записи с сильно увлажненными отложениями в разрезе. Однако отметим еще раз, что физического объяснения данного эффекта в настоящее время нами не найдено.

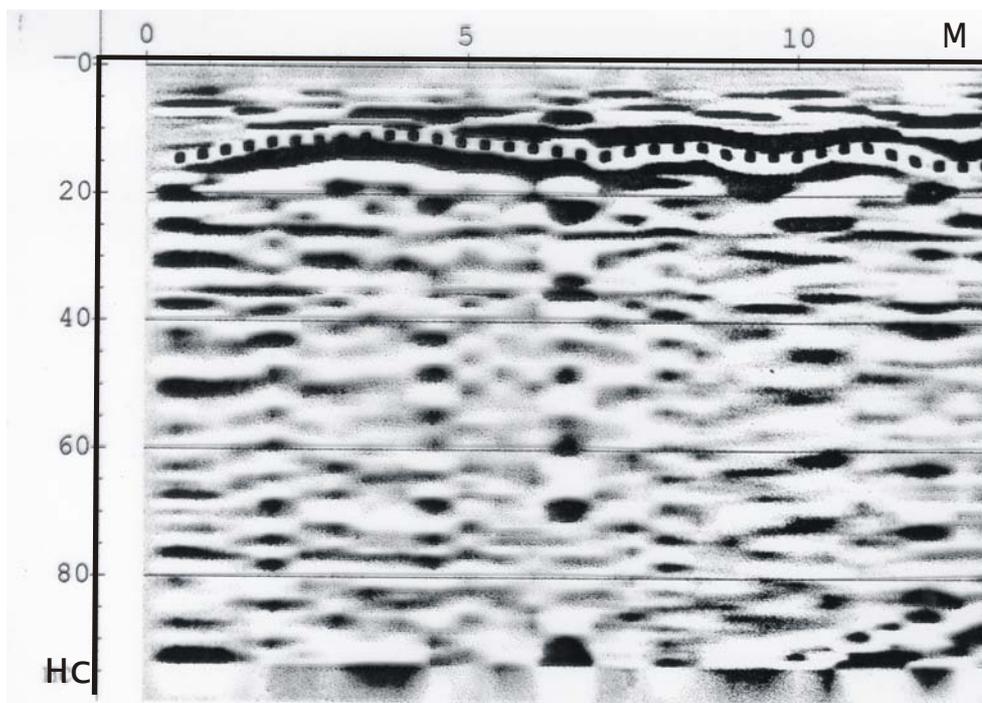


Рис. 11.1. Фрагмент обработанного георадиолокационного профиля с выделенной кровлей влагонасыщенных отложений (поверхность УГВ показана пунктиром). Разрез представлен крупнозернистыми песками. УГВ по данным бурения находится на глубине около 60 см.

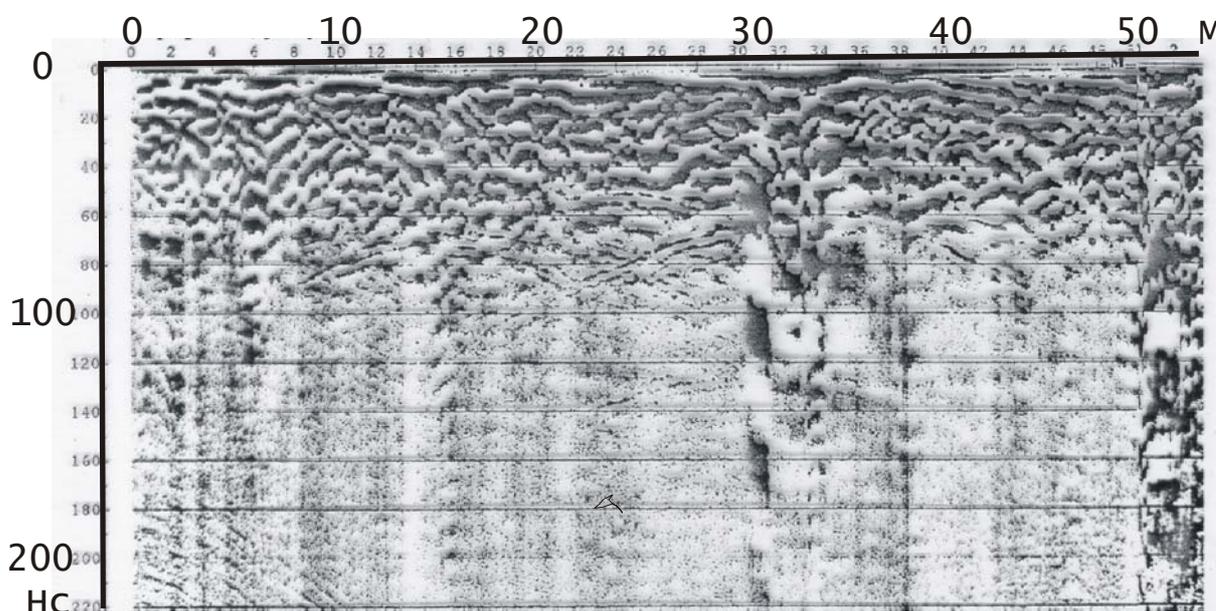


Рис. 11.2. Фрагмент исходного георадиолокационного профиля с двумя ярко выраженными зонами низкочастотной записи (пикеты 30-35 и 50-52 м).

Профиль выполнен с экранированной антенной 300 МГц. Разрез представлен песками различного гранулометрического состава. Правая часть профиля (пикеты 50-52 м) расположена вблизи провала, образовавшегося вследствие аварии на теплотрассе (разрыв трубы с горячей водой).

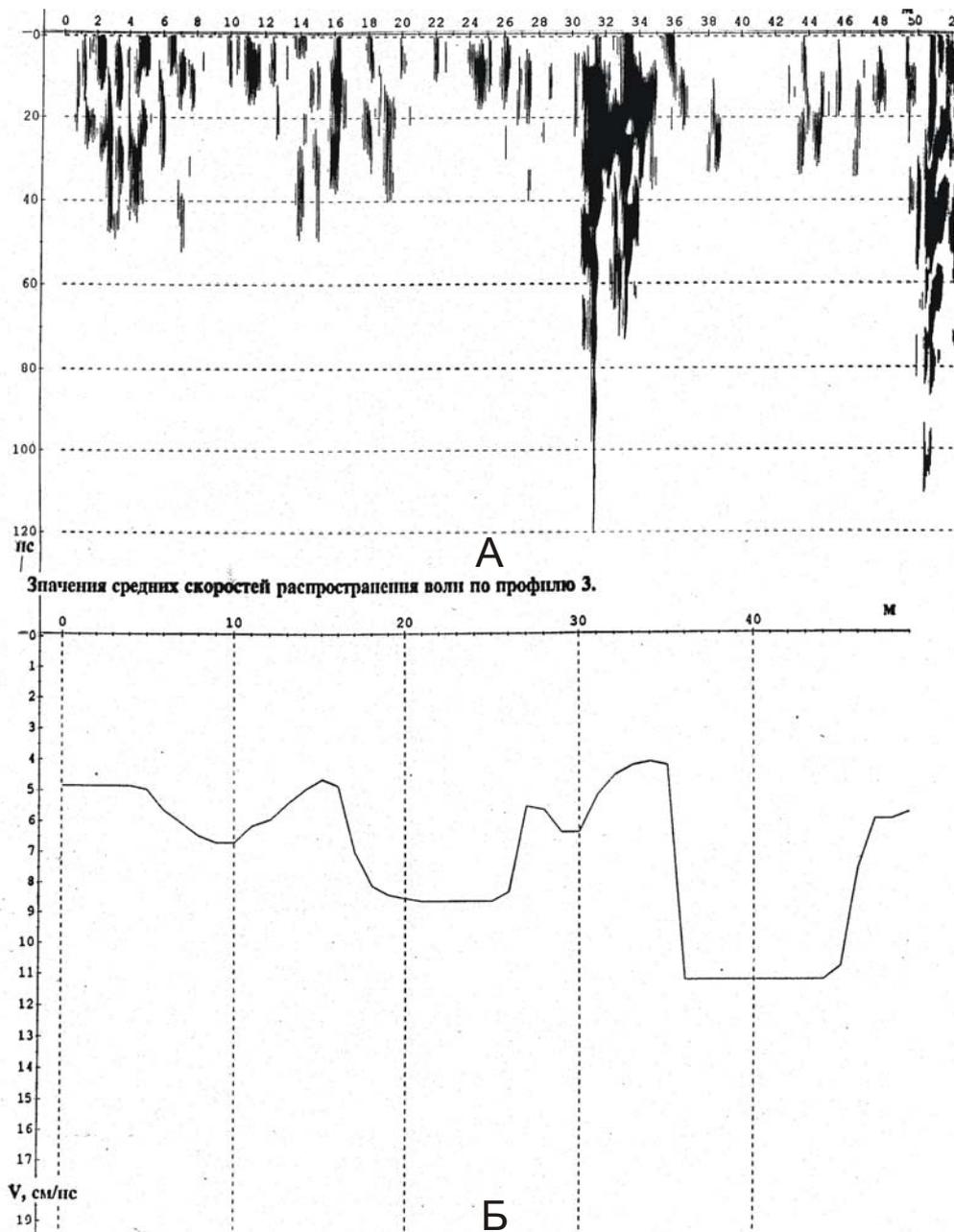


Рис. 11.3. Георадиолокационный профиль, изображенный на рис. 11.2, после преобразования Гильберта (А). График значений средних скоростей распространения электромагнитных волн по этому же профилю (Б). Видно, что участкам с низкочастотной записью (особенно отчетливо выделяющимся после преобразования Гильберта – пикеты 30-35 и 50-52 м) соответствуют минимальные значения скоростей – 5,0-6,0 см/нс, что свидетельствует о значительном локальном увлажнении разреза в данном месте. Пониженные значения скоростей в левой части профиля относятся к самой верхней (приповерхностной) части разреза. Участок на профиле 50-52 м находится рядом с провалом, образовавшимся вследствие прорыва трубы с горячей водой.

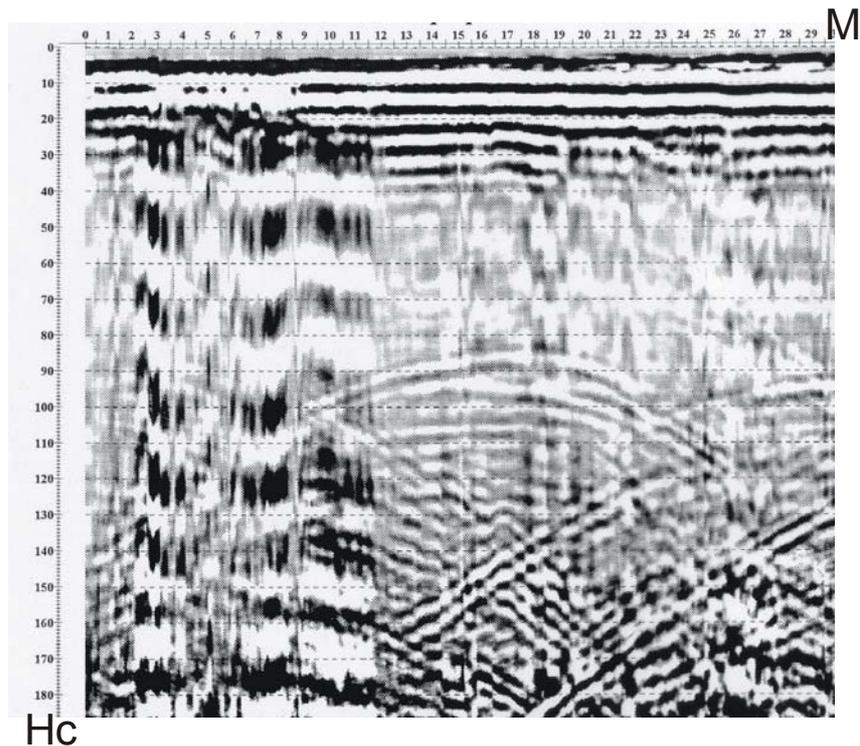


Рис. 11.4. Фрагмент исходного георадиолокационного профиля по земляной плотине. Использовалась антенна 300 МГц. В левой части профиля с времен 18-20 нс (около 70 см) наблюдается участок с низкочастотной записью, по которой была обнаружена протечка в теле плотины. Поверхность воды в пруду ниже верха плотины на 60 см.

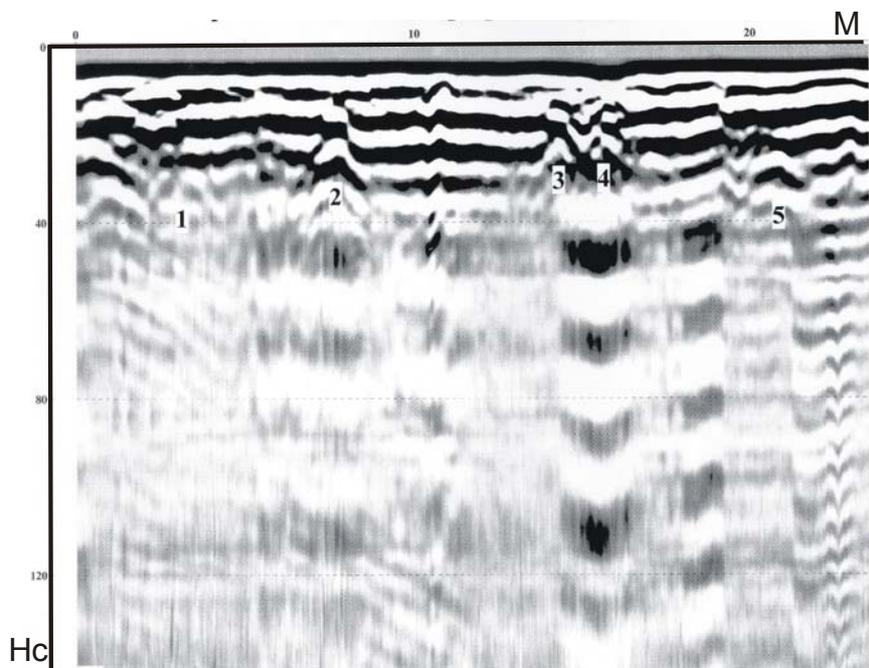


Рис. 11.5. Фрагмент исходного георадиолокационного профиля вдоль дома. Цифры 1 – 5 – номера точек дифракции, где была определена средняя скорость распространения электромагнитных волн: 1-8,6 см/нс; 2-8,6 см/нс;

3-6,5 см/нс; 4-6,5 см/нс; 5-9,4 см/нс. Появление низкой частоты с времен около 30 нс свидетельствует о повышенном увлажнении разреза с этой глубины. Особо следует отметить зону на участке точек 3 и 4, где значения скорости минимальны – 6,5 см/нс и низкочастотная запись выражена наиболее отчетливо. По-видимому, эта аномальная зона обусловлена утечками из труб (дифракция в точках 3 и 4 связана с трубами теплотрассы).

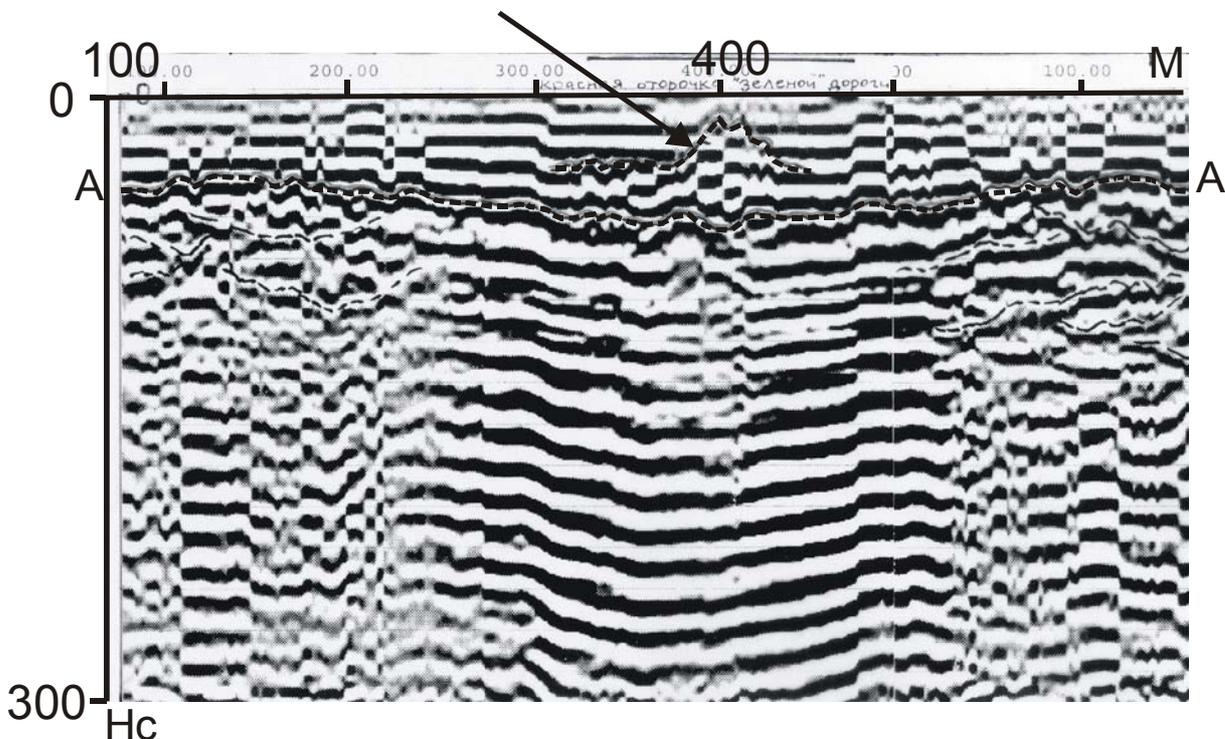


Рис. 11.6. Фрагмент обработанного георадиолокационного профиля, выполненного с неэкранированной антенной 75 МГц по шоссе. Целью работ было выяснение причины быстрого по сравнению с другими участками разрушения и деформации асфальтного покрытия, что предположительно увязывалось с близким залеганием подземных вод. Изучаемый фрагмент дороги находится в верховьях оврага. Ниже по склону в тальвеге оврага наблюдается выход подземных вод. Георадарные работы показали наличие здесь на глубинах 1,5-2,0 м границы сильного изменения увлажнения, выделяющейся на радарограмме по интенсивным протяженным осям синфазности отраженных волн (отражающий горизонт А-А). Особенно отчетливо выделяется отрицательная ось синфазности, расположенная немного ниже этого горизонта. В центральной части профиля (пикеты 250 – 530 м) наблюдается зона так называемой «звучащей» записи, которая, на основании опытно-методических работ в Западной Сибири, связана с полностью влагонасыщенными отложениями (т.е. представляет собой линзу грунтовых вод). На пикетах 300-450 метров выше границы А – А отмечается участок записи куполовидной формы (показан стрелкой), который, по-видимому, обусловлен капиллярным поднятием над линзой грунтовых вод. Очевидно, что верховья оврага являются водосборной площадью, и в его центральной части, через которую проходит георадиолокационный профиль

(и где расположена дорога), происходит подъем грунтовых вод. Для укрепления дорожного полотна на этом участке дороги необходимо устройство дренажной системы.

На представленных фрагментах георадиолокационных профилей с вариантами интерпретации продемонстрированы некоторые методические приемы выделения уровня грунтовых вод и зон локального увлажнения. Анализ имеющихся материалов по этой тематике показывает, что УГВ имеет различные картировочные признаки на исходных и обработанных профилях (ср., например, рис. 11.1, 11.2 и 11.6). В некоторых случаях зоны локального увлажнения более отчетливо наблюдаются на георадарограммах после преобразования Гильберта (рис. 11.2 и 11.3А).

На рис. 11.2 представлен профиль, который проходит вблизи провальной воронки (пикеты 50-52 м). На этом же участке была выполнена сеть профилей с шагом 4 метра. По наличию аномальных низкочастотных участков записи было выделено несколько зон локального увлажнения, в которых в условиях песчанистого разреза можно было ожидать проявления суффозионных процессов. Данное предположение подтвердилось при анализе морфологии дневной поверхности, когда были обнаружены видимые просадки грунта в этих зонах.

На рис. 11.7 показаны спектры сигнала участков с низкочастотной записью (А) и без нее (Б), определенные на профиле, пройденном по земляной плотине (исходную запись см. на рис. 6.4).

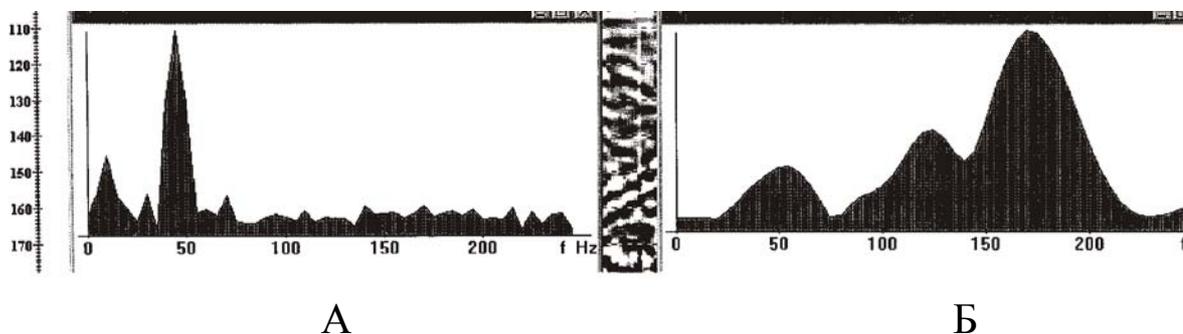


Рис. 11.7. Спектры участков записи левой части профиля, изображенного на рис. 11.4, где низкая частота выражена отчетливо (А), и правой части (Б). Использовалась экранированная антенна 300 МГц.

Глава 12. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ [2, 4, 9, 15, 17, 23, 24]

В предыдущих главах при обсуждении основных положений методики интерпретации и признаков выделения волн-помех было приведено несколько примеров с геологической интерпретацией георадиолокационных профилей (см., например, рис. 7.5, 8.4 и 9.3). Опытные-методические и производственные георадарные исследования, проведенные нами в районах с различными типами разрезов, и многочисленные опубликованные материалы показали высокую эффективность этого метода при изучении верхней части разреза. Некоторые примеры использования георадиолокационной съемки при решении ряда инженерно-геологических задач будут продемонстрированы ниже. Из рассмотрения в данной главе исключены материалы, относящиеся к исследованиям на многолетнемерзлых породах и на воде, которые, на наш взгляд, требуют специального рассмотрения и будут проанализированы в отдельных главах. Вместе с тем имеется ряд разрезов, крайне неблагоприятных для георадарной съемки, связанных прежде всего с наличием слоев глин или суглинков (см. рис. 8.5). В Части 1 будут подробно рассмотрены причины этого явления, здесь же еще раз отметим, что при работах на подобных разрезах глубинность исследований резко уменьшается, иногда до нуля. Возникающая при этом волновая картина не поддается интерпретации. Иллюстрацией может служить фрагмент георадарного профиля (рис. 12.1), пройденного с антенной 300 МГц при благоприятных внешних условиях (ровный рельеф и отсутствие воздушных волн-помех), но при наличии влажных плотных суглинков в верхней части разреза.

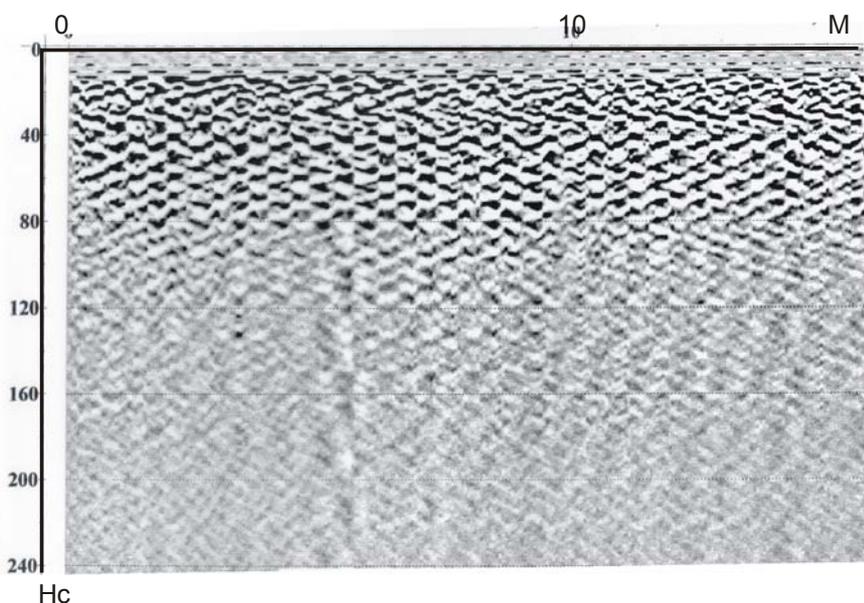


Рис. 12.1. Фрагмент георадиолокационного профиля, пройденного по влажным суглинкам. Использовалась антенна 300 МГц. Пример неинтерпретируемой записи (профиль пересекает три металлических трубы диаметром 1,4 м).

Границы между георадарными комплексами на приведенных ниже примерах проведены с использованием методических приемов, изложенных в главах 7 и 8. Подробный анализ волновой картины будет приводиться только для объяснения сложных, по нашему мнению, ситуаций. Примеры подбирались с тем расчетом, чтобы продемонстрировать не только возможности георадарной съемки, но и одновременно показать области ее применения.

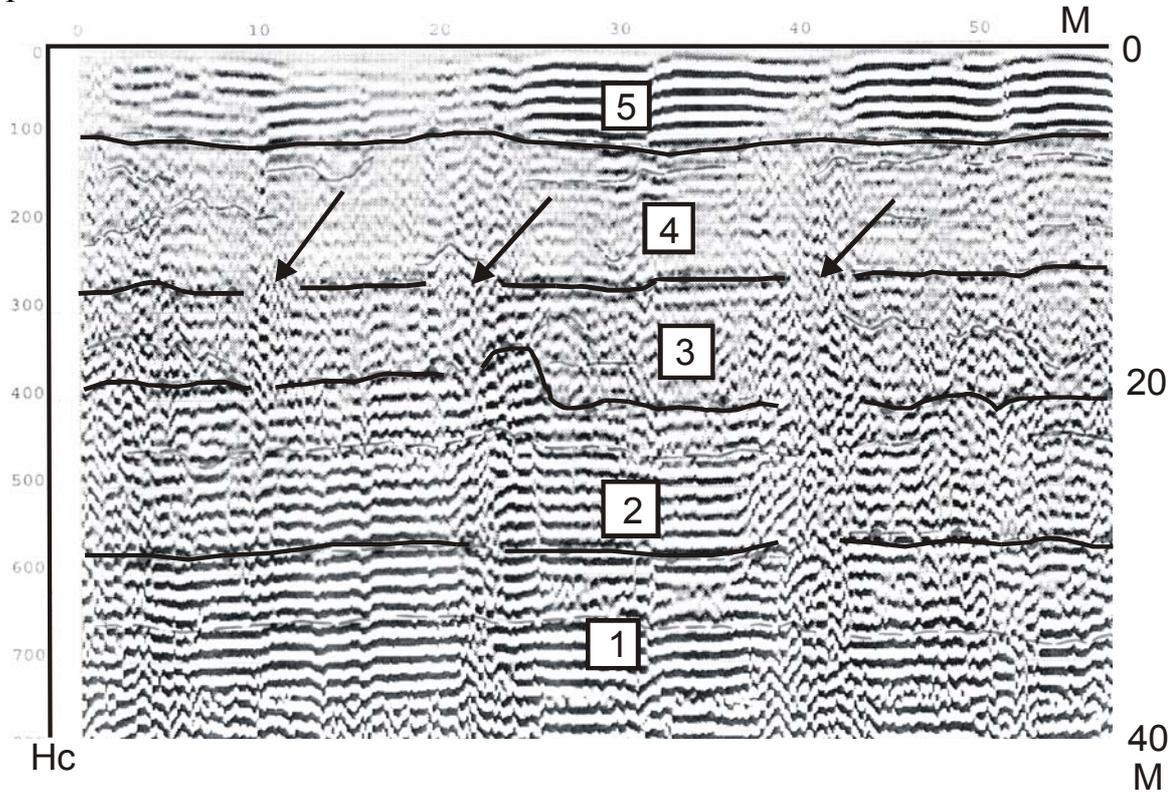


Рис. 12.2. Фрагмент радарограммы, полученной с антенной 75 МГц (георадар ГРЛ-2). Обработка и интерпретация М.Л.Владова и А.В.Старовойтова. Работы выполнялись с целью обнаружения карстоопасных участков. Всего выделено 5 георадарных комплексов. Граница между георадарными комплексами 4 и 5 проведена по резкому изменению волновой картины (ср. интенсивность и форму осей синфазности). В кровле комплекса 3 появились протяженные и более интенсивные оси синфазности по сравнению с комплексом 4. В подошве комплекса 3 отмечается резкое изменение конфигурации, протяженности и интенсивности осей синфазности отраженных волн. Следует также отметить более сложную форму осей синфазности внутри этого комплекса, которая местами становится бугристой или даже хаотической. Комплекс 2 резко выделяется по сравнению с комплексом 3 появлением протяженных субгоризонтальных, интенсивных осей синфазности, т.е. волновую картину можно охарактеризовать как горизонтально-слоистую. Волновая картина комплекса 1 напоминает волновую картину комплекса 2, однако немного отличается от нее более выровненными осями синфазности – ср., например, форму осей на границе комплексов 1 и 2 в левой и правой частях разреза.

Геологический разрез по данным бурения представлен (цифры в квадратах): 1 – доломиты; 2 – гипсы; 3 – сильно разрушенные гипсы; 4 – супеси; 5 – суглинки. Толща 3 (сильно разрушенные гипсы) характеризуется сложной волновой картиной. Стрелками показаны вертикальные зоны, в которых отмечается хаотический тип волновой картины и наблюдается отсутствие осей синфазности отраженных волн, особенно отчетливо видимое на границе толщ 2-3 и 3-4. Отметим, что вертикальная зона в районе пикета 40 метров поднимается практически до дневной поверхности. Эти зоны вертикальных нарушений описанных выше волновых картин предположительно выделены как карстоопасные. Вертикальный масштаб справа дан в метрах, исходя из средней скорости распространения электромагнитных волн 10 см/нс.

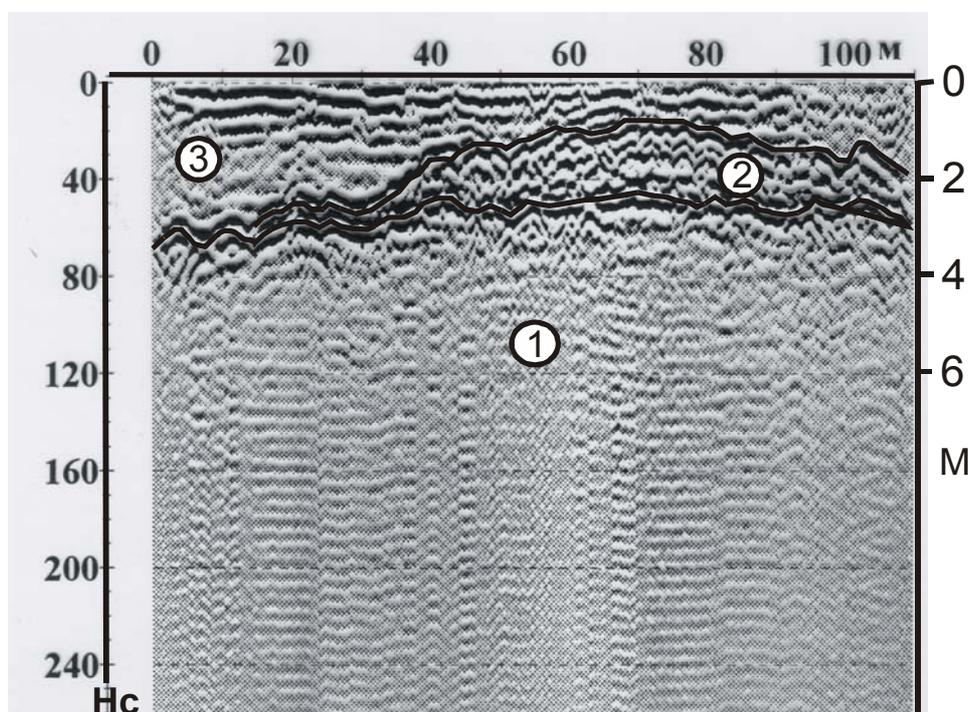


Рис. 12.3. Фрагмент георадарного профиля, выполненного с экранированной антенной 300 МГц. Цель исследований – поиск толщ, сложенных конгломератами, перспективных на россыпные месторождения полезных ископаемых. Выделено 3 георадарных комплекса. Нижний георадарный комплекс 1 выделяется по отсутствию видимых осей синфазности отраженных волн и меньшей интенсивностью записи по сравнению с вышележащими комплексами. В кровле этого комплекса наблюдаются многочисленные «усы» дифракции, что свидетельствует о сложном рельефе кровли комплекса 1. Залегающий выше комплекс 2 резко выделяется хаотическим типом волновой картины и значительным увеличением амплитуды отражений. Граница между комплексами проведена по этим признакам – изменение типа волновой картины, интенсивности и конфигурации осей синфазности. Самый молодой комплекс 3 отличается

появлением субгоризонтальных, интенсивных и протяженных осей синфазности и имеет в подошве явное угловое несогласие по типу подошвенного налегания. Сопоставление с разрезом расположенного рядом с профилем шурфа показало, что комплекс 1 сложен гранитогнейсами, комплекс 2 – конгломератами, комплекс 3 – песчано-глинистыми отложениями. Вертикальный масштаб дан в метрах, исходя из средней скорости 10 см/нс.

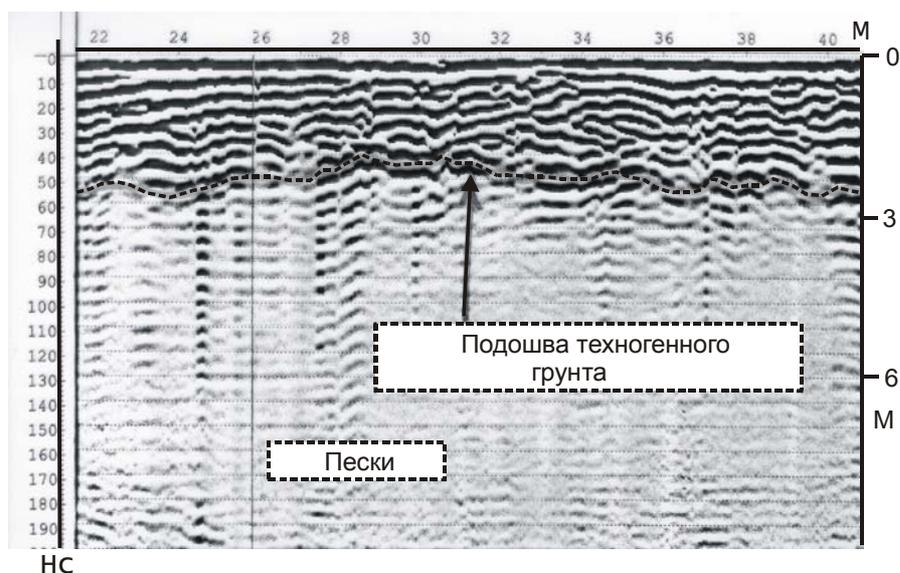


Рис. 12.4. Фрагмент георадиолокационного профиля, пройденного с антенной 300 МГц. Цель исследований - определение мощности техногенного грунта. На разрезе отчетливо выделяются два георадарных комплекса. Граница между ними проведена по резкой смене типа волновой картины. В нижнем комплексе практически отсутствуют оси синфазности отраженных волн. В верхнем комплексе резко увеличилась амплитуда отражений и тип волновой картины можно охарактеризовать как бугристый. При более детальном анализе в верхнем комплексе можно выделить ряд подкомплексов (на разрезе отчетливо наблюдаются участки с локальными угловыми несогласиями, вследствие чего верхний комплекс приобретает линзовидное строение). По данным бурения нижний комплекс сложен аллювиальными песками среднего плейстоцена мощностью более 30 метров, а верхний – песчано-суглинистыми техногенными грунтами. Следует подчеркнуть, что типы волновой картины в данном случае полностью отражают характер строения коренных песков и насыпных грунтов. При определении вертикального масштаба использовалась скорость 9,5 см/нс, определенная по годографам дифрагированных волн.

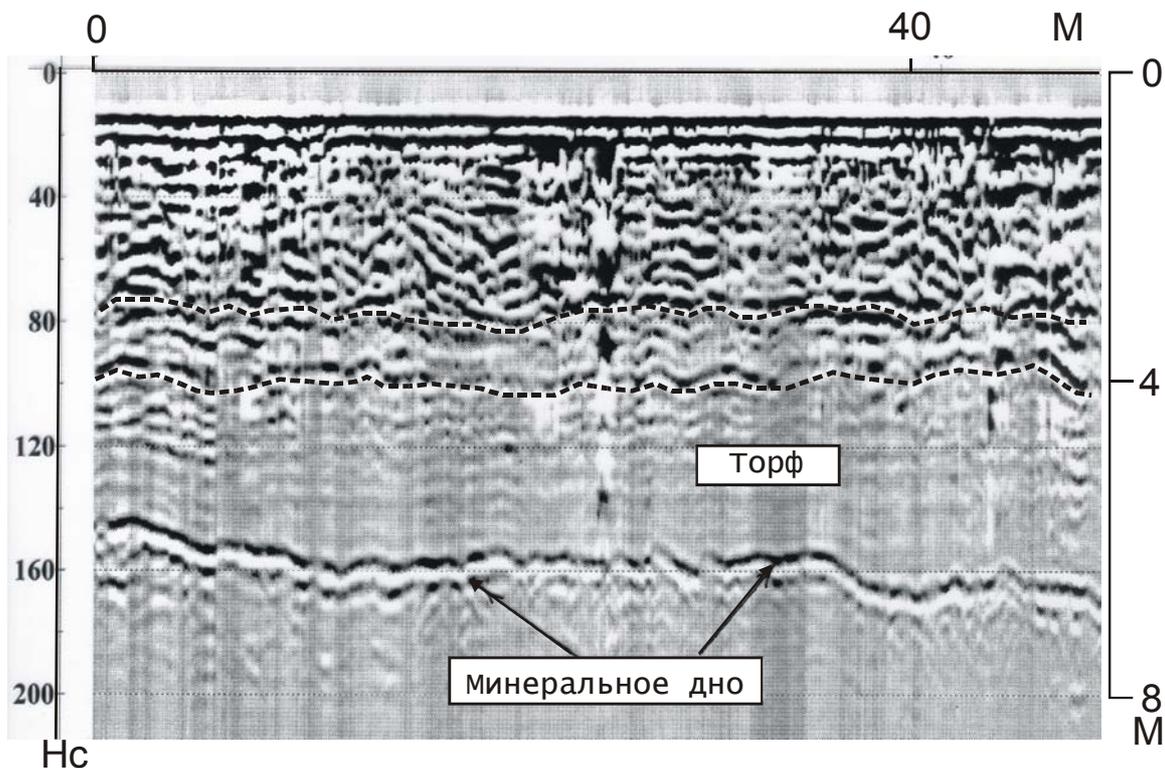


Рис. 12.5. Фрагмент георадарного профиля по болоту (Западная Сибирь), выполненного с экранированной антенной 300 МГц. Целью исследований было определение мощности слоя торфа. Разрез можно разделить на два основных георадарных комплекса, границей между которыми являются протяженные интенсивные оси синфазности отраженных волн на временах около 145 – 170 нс. Ниже осей синфазности не наблюдается. В верхнем комплексе четкие границы раздела отсутствуют, тем не менее волновая картина значительно меняется сверху вниз. Можно выделить три подкомплекса, границы между которыми проведены пунктирными линиями. Резкие различия наблюдаются между верхним и нижним подкомплексами – интенсивные, непротяженные, сложной морфологии оси синфазности в верхнем и практически отсутствие осей синфазности в нижнем. На времени около 100 нс выделяется также довольно отчетливо оси синфазности отраженной волны. Результаты исследований подтверждены скважинами. Выделяется минеральное дно (отложения представлены суглинками) и три толщи в залегающем выше слое торфа, которые обусловлены различной степенью преобразования органического материала. При пересчете в глубинный масштаб использовалась средняя скорость 8 см/нс.

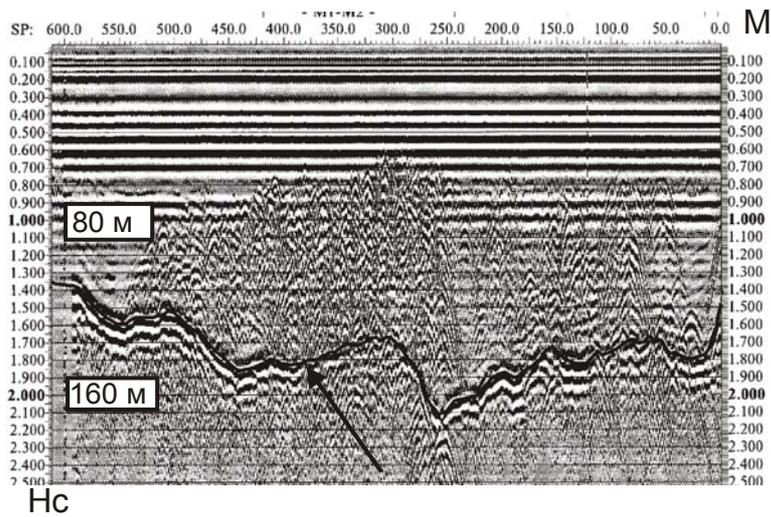
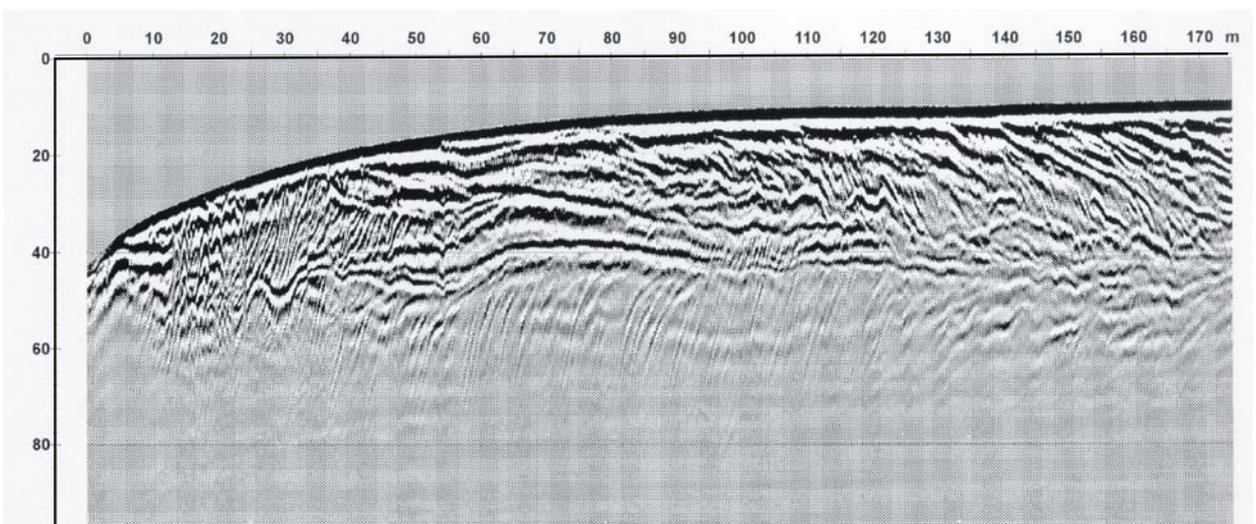
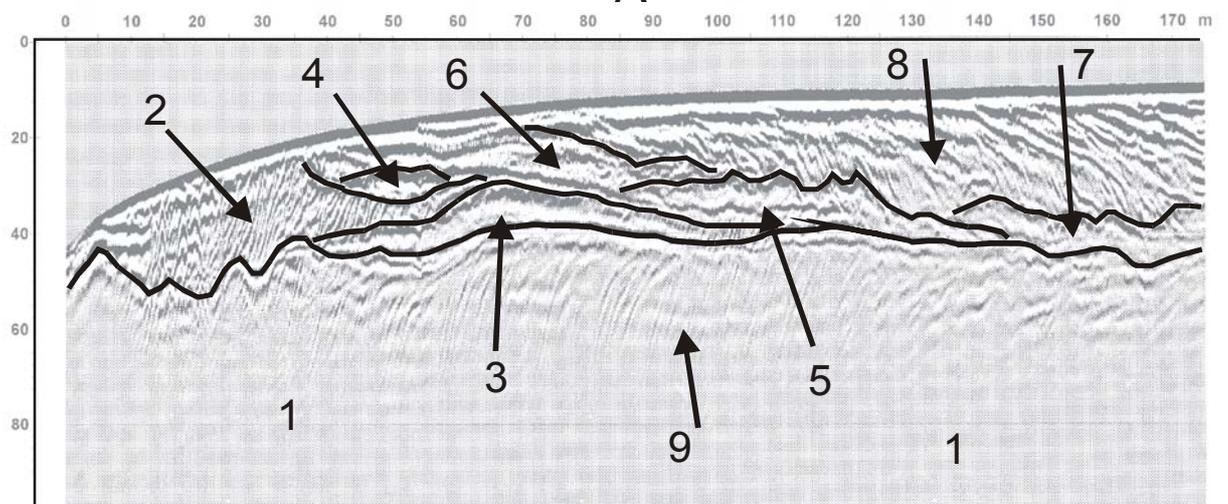


Рис. 12.6. Фрагмент георадарного профиля через ледник, выполненный с антенной 40 МГц (георадар ВИРЛ-2, материалы Ю.Я.Мачерета). Стрелкой показаны оси синфазности отраженных от ложа ледника волн. Внутри ледника наблюдаются неоднородности ($V=16,5$ см/нс).



Дм

А



Дм

Б

Рис. 12.7. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного с экранированной антенной 300 МГц. Профиль расположен на побережье Каспийского моря (Дагестан). Цель исследований – изучение толщи прибрежных отложений позднего голоцена для анализа колебаний уровня Каспия. Выделено восемь основных георадиолокационных комплексов. Границы между ними проводились в основном по наличию угловых несогласий (см., например, соотношения осей синфазности между комплексами 2 и 4, 5 и 8 и т.д.). Граница между комплексами 1 и 2 проведена по резкому изменению волновой картины, а между 3 и 6 – по интенсивной оси синфазности. Отложения представлены в основном песками:

- 1 – отложения регрессивных морских береговых валов первой генерации;
- 2 – отложения лагунных береговых валов;
- 3 – 7 - фрагменты трансгрессивных морских береговых валов;
- 8 – отложения серии регрессивных морских береговых валов;
- 9 – уровень грунтовых вод (УГВ).

Слева от профиля находится озеро Большое Турали, справа - берег Каспийского моря.

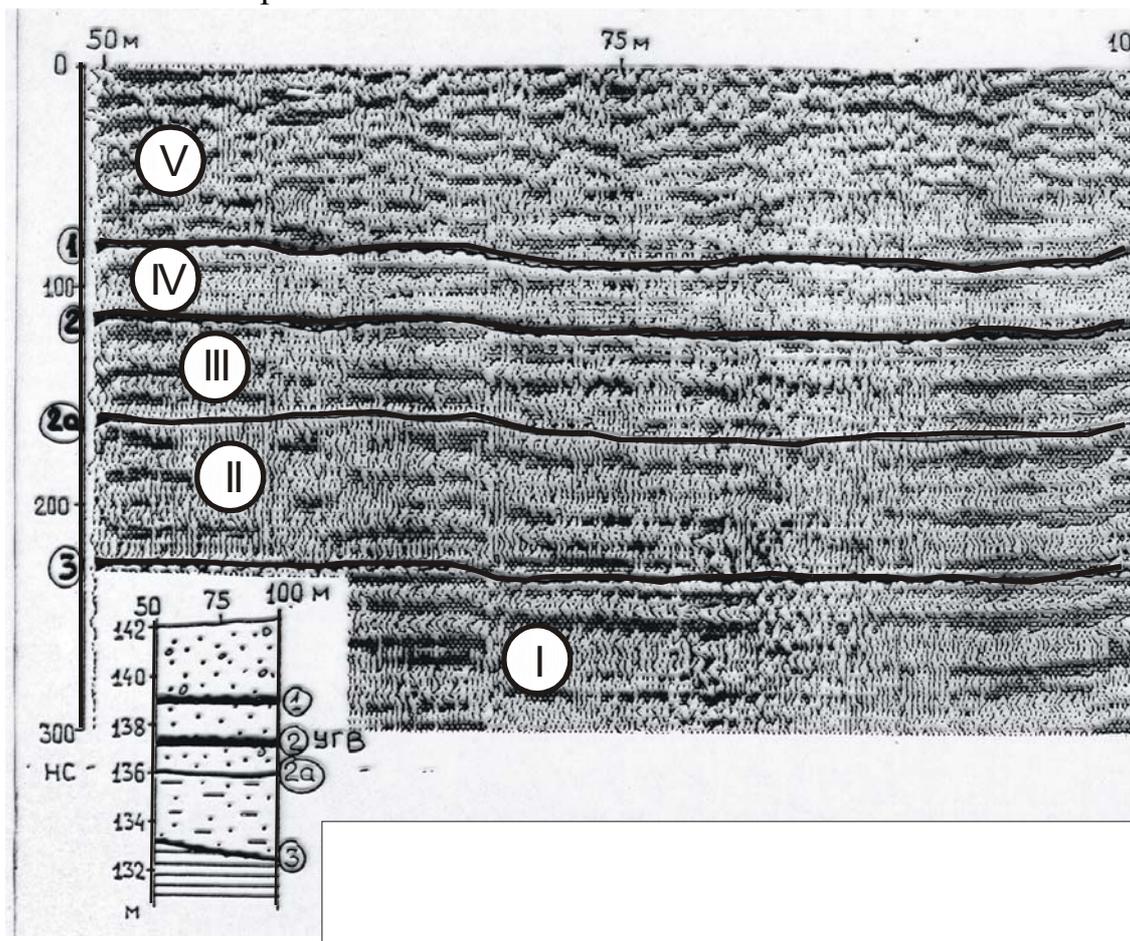


Рис. 12.8. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного с антенной 75 МГц. Профиль расположен на территории

нефтеперерабатывающего завода. Цель исследований – изучение возможностей георадиолокации при выделении зон загрязнения нефтепродуктами. Слева во врезке дан схематический геологический разрез (скважины находятся на расстоянии около 25 метров от георадарного профиля). Известно, что у нефти низкие значения диэлектрической проницаемости (2.5), т.е. скорость распространения электромагнитных волн около 12 см/нс. Однако аналогичные значения скорости характерны для песчанистых отложений естественной влажности. Иными словами, по электрофизическим свойствам они довольно близки. С другой стороны, грунты с углеводородным загрязнением могут выделяться в разрезе по пониженным значениям диэлектрической проницаемости, если вмещающие отложения увлажнены. Необходимо также отметить, что максимальные концентрации углеводородов должны отмечаться в слое, расположенном над УГВ. В разрезе скважины выделяются 4 осадочных комплекса (см. врезку) и УГВ (граница 2). Анализ волновой картины по профилю позволил выделить 5 георадарных комплексов (см. профиль). Граница между комплексами IV и V проведена по изменению конфигурации осей синфазности и их интенсивности. Начиная с кровли радарного комплекса III на радарограмме появляются довольно протяженные субгоризонтальные оси синфазности, интенсивность которых по профилю значительно меняется (разрез приобретает довольно отчетливую стратификацию). Границы между комплексами II и III, I и II проведены по изменению морфологии осей синфазности и их протяженности. Расчет скорости и, соответственно, диэлектрической проницаемости, дал следующие результаты (методика оценки этих параметров приведена в Главе 9): комплекс V – $\epsilon=18.4$, $V=7.0$ см/нс; комплекс IV - $\epsilon=5.8$, $V=12.5$ см/нс; комплекс III - $\epsilon=39.0$, $V=4.8$ см/нс; комплекс II - $\epsilon=9.5$, $V=9.7$ см/нс. Глубины залегания границ между комплексами (цифры в кружках) равны: 1 – 3.0 м; 2 – 5.0 м; 2а – 6.2 м; 3 – 9.2 м. Сопоставление полученных данных показало, что георадарный комплекс IV характеризуется пониженными значениями диэлектрической проницаемости, а в нижележащем комплексе III значения ϵ резко увеличиваются. На этом основании граница 2 между комплексами IV и III, расположенная на глубине около 5 метров, была принята за УГВ, а комплекс IV был выделен как слой с сильным углеводородным загрязнением. На радарограмме слой IV характеризуется пониженными значениями амплитуд (см. также [24]).

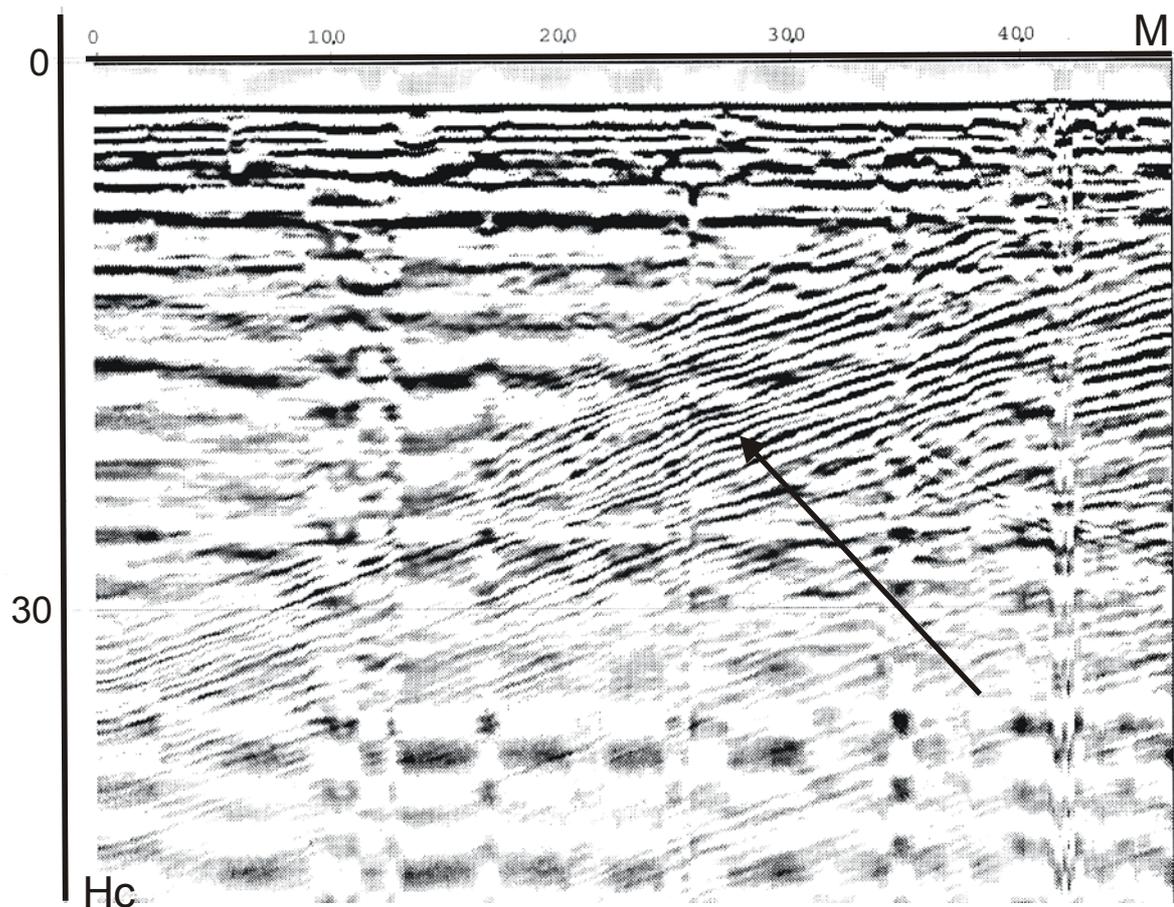


Рис. 12.9. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного с антенной 500 МГц. Цель исследований – обнаружение зон трещиноватости в подземной выработке, пройденной в мергеле. Антенну перемещали по стене штольни. Зона трещиноватости выделяется на радарограмме в виде наклонных осей синфазности отраженных волн (показаны стрелкой). Опубликованные материалы показывают, что трещины, заполненные водой и (или) влажной глиной на радарограммах выделяются более уверенно, чем сухие.

Глава 13. ИССЛЕДОВАНИЯ В РАЙОНАХ РАЗВИТИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД (ММП). [2, 5, 9, 10, 20]

Мерзлые горные породы представляют собой наиболее важный объект при решении многих инженерно-геологических, поисковых, строительных и других задач в районах с суровым климатом. Изучение подобных разрезов геофизическими методами представляет собой довольно сложную задачу и этим вопросам посвящена обширная литература [5]. Использование георадиолокации в районах развития ММП началось с изучения ледников (пример волновой картины дан на рис. 12.6, см. также [2]. Георадиолокация собственно ММП интенсивно развивается в последние годы. Кроме профилирования известны работы по исследованию электрофизических свойств мерзлых толщ, в первую очередь, скорости распространения электромагнитных волн [9, 10, 20 и др.]. Одной из традиционных задач георадиолокационных работ является определение границы мерзлых и немерзлых отложений. Физическим основанием для этого является значительное различие в диэлектрической проницаемости воды, воздуха и льда. Для частот 50-300 МГц это 81, 1 и 3,3 соответственно. Чем больше содержание замерзшей воды, тем ниже значение диэлектрической проницаемости и выше значения скорости распространения электромагнитных волн. Такой контраст свойств обеспечивает появление на радарограммах интенсивных осей синфазности отраженных волн, по положению которых и картируются эти отложения. Натурные и экспериментальные исследования скорости распространения электромагнитных волн показали, что в ММП скорость значительно увеличивается (до 14-15 см/нс), что приводит к существенному увеличению глубинности исследований, иногда в 2-2,5 раза. При наличии в разрезе талых зон скорость падает - до 8,0-9,0 см/нс, и контрастность отложений на таких участках уменьшается. Таким образом, вдоль профилей могут отмечаться значительные вариации скорости и изучение разреза мерзлых толщ в подобных условиях резко усложняется. Очевидно, что при исследованиях даже на небольших по площади участках необходим детальный скоростной анализ на всей изучаемой площади.

В настоящей главе будут рассмотрены материалы георадарной съемки, выполненной нами при проведении инженерно-геологических исследований в районе сплошного развития ММП. Целью исследований было выделение УГВ, кровли ММП и кровли коренных пород и определение глубины их залегания. Эти данные были необходимы для разработки проектной документации при строительстве дороги и мостовых переходов. Разрез представлен широким спектром четвертичных отложений мощностью до 10 метров, часть из которых находится в мерзлом состоянии, и коренными породами, представленными гранитогнейсами. Данные работы проводились в комплексе с электрометрическими (ВЭЗ) и сейсмическими (МПВ) исследованиями, которые выполнялись на отдельных участках и привлекались при интерпретации георадарных данных. В частности, по

значениям скоростей продольных волн мерзлые и немерзлые четвертичные отложения и коренные породы резко отличаются. Подбор методики осуществлялся в районе скважины, где были вскрыты четвертичные отложения, кровля ММП и кровля выветрелых коренных пород (рис. 13.1).

В изучаемом районе четвертичные образования представлены в основном грубозернистыми отложениями (вплоть до галечников), поэтому граница УГВ довольно резкая (отсутствует капиллярная кайма), вследствие чего ее выделение на радарограммах, как правило, не вызывает затруднений. Необходимо отметить, что достоверность выделения УГВ существенно повышается, если георадиолокационные профили начинаются или оканчиваются в воде.

При региональных наблюдениях зачастую не удается выработать единые критерии или картировочные признаки для выделения каких-либо толщ, что, очевидно, объясняется изменчивостью разреза на больших расстояниях. Это в значительной степени относится к результатам георадарных работ, которые будут приведены ниже. Следует также отметить, что иногда картировочные признаки сильно меняются в зависимости от расположения профилей, что отмечалось нами при выделении кровли коренных пород. Представленными ниже примерами георадиолокационных профилей с интерпретацией не исчерпывается все многообразие типов волновых картин, получаемых при исследовании многолетнемерзлых пород, однако общее представление о характере разрезов в этих специфических условиях, на наш взгляд, у читателя будет сформировано.

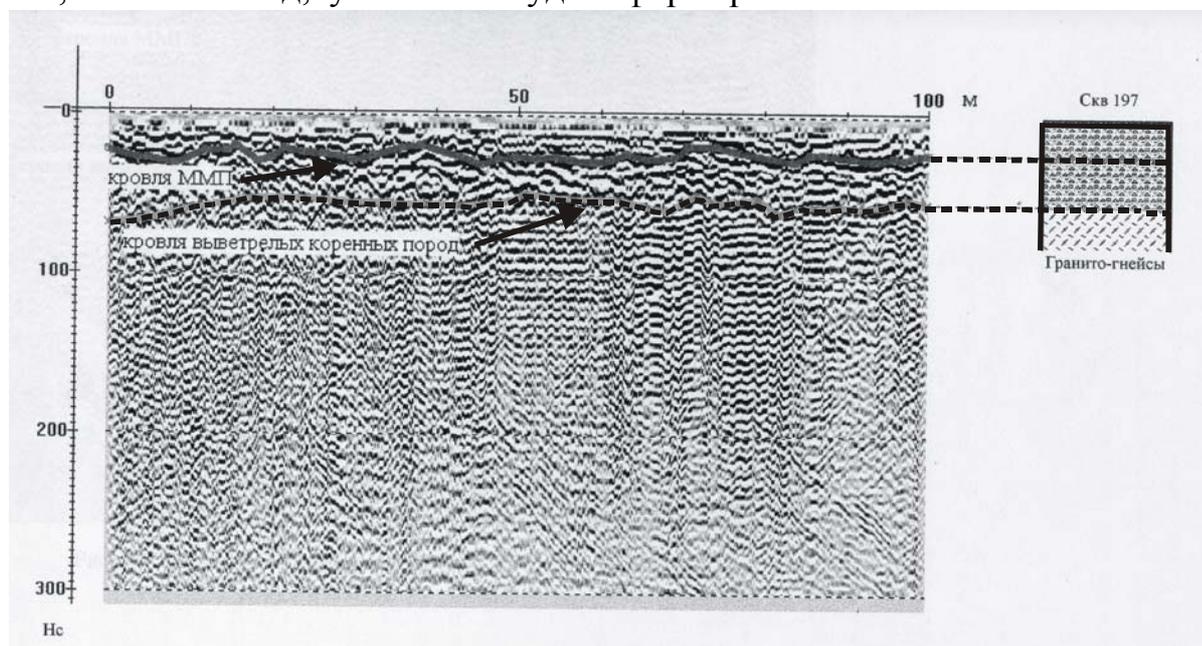


Рис. 13.1. Пример сопоставления георадиолокационного профиля с разрезом скважины. При интерпретации использовались также сейсмические данные (МПВ) и результаты изучения разреза в шурфе. По типу волновой картины на разрезе выделены 3 георадарных комплекса, границы между которыми показаны стрелками. Нижний характеризуется так называемой «звучащей» записью, средний и верхний резко отличаются по конфигурации осей синфазности, их протяженности и частотному составу.

Нижний сопоставлен с гранитогнейсами, средний и верхний – с четвертичными отложениями, граница между средним и верхним – с кровлей ММП. Средняя скорость распространения электромагнитных волн, определенная по годографам дифрагированных волн, в немерзлых грунтах равна 9 см/нс, в мерзлых – 13,5 см/нс.

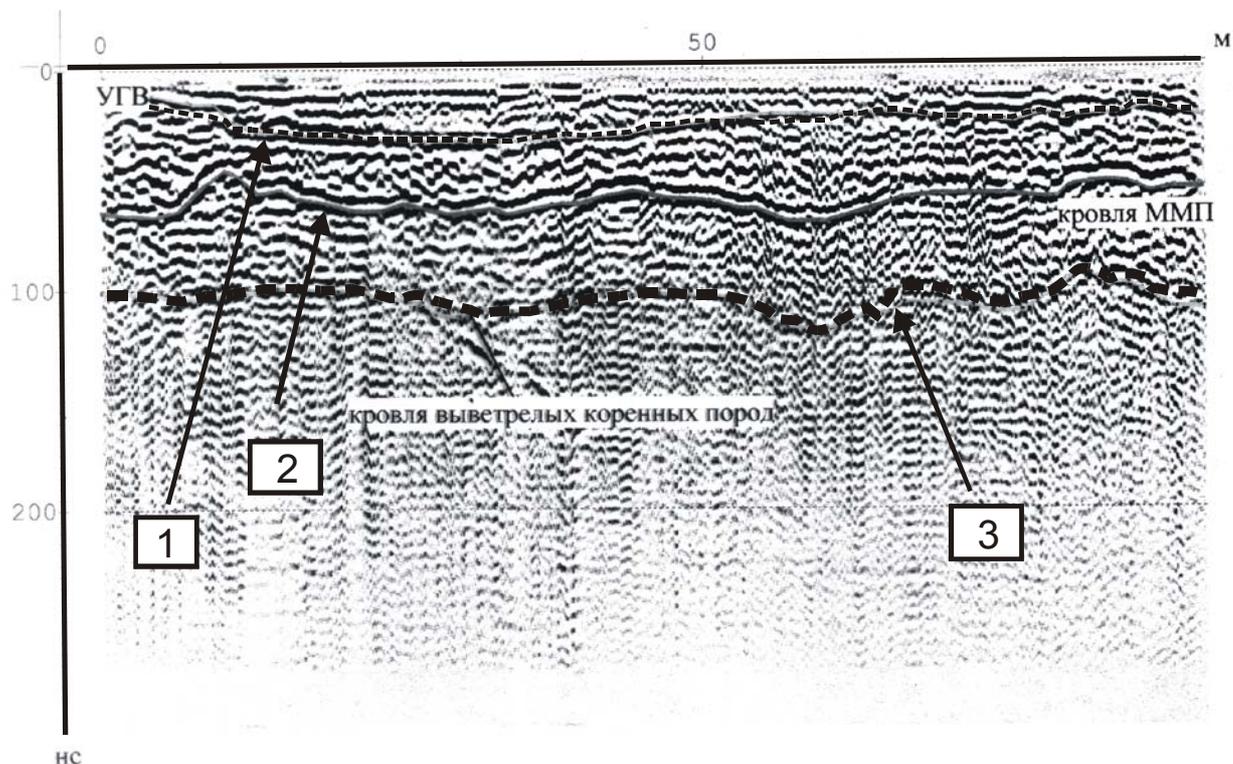


Рис. 13.2. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного с антенной 150 МГц по пойме реки. На георадиолокационном разрезе по типу волновой картины выделено 4 георадарных комплекса, границы между которыми показаны цифрами. Нижний комплекс характеризуется, также как и на рис. 13.1, так называемой «звучащей» записью. Кровля этого комплекса (3) проведена по резкой смене волновой картины – изменилась конфигурация осей синфазности. Границей между вторым и третьим комплексами являются протяженные интенсивные оси синфазности (2). В кровле третьего комплекса также выделяются протяженные оси синфазности (1). Сопоставление с сейсмическими данными (МПВ), с результатами опытных работ у скважины (рис. 13.1) и геологическими наблюдениями позволило сопоставить нижний комплекс с коренными породами (гнейсогранитами), а второй, третий и четвертый – с четвертичными отложениями. Граница между коренными и четвертичными отложениями показана цифрой 3. Границы раздела внутри четвертичного комплекса связаны с УГВ (1) и кровлей ММП (2), т.е. обусловлены различными флюидами в генетически единой толще. Разрез четвертичных отложений представлен преимущественно песками различного гранулометрического состава. УГВ имеет форму вогнутой линзы, так как не введена поправка за рельеф (георадиолокационный профиль начинался и

оканчивался у воды). Таким образом, по особенностям волновой картины на радарном профиле выделено 4 комплекса, которые соответствуют в геологическом разрезе двум толщам.

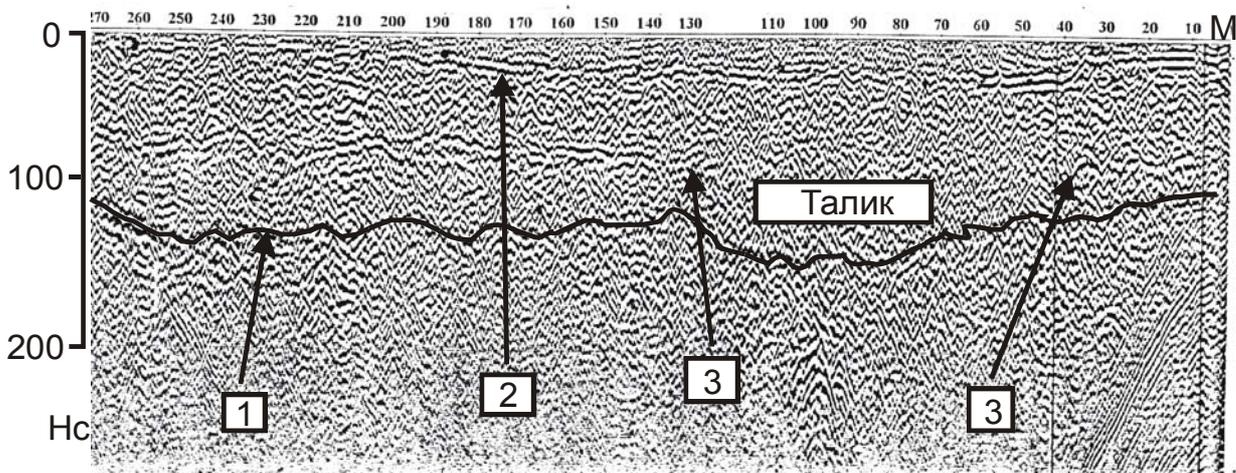


Рис. 13.3. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного с неэкранированной антенной 150 МГц.

На георадиолокационном разрезе выделены три группы осей синфазности отраженных волн (показаны цифрами). Нижняя граница (1) выделяется предположительно по непротяженным осям синфазности сложной конфигурации. Отражающие горизонты 2 и 3 характеризуются отчетливыми интенсивными осями синфазности и уверенно дешифрируются на фоне «хаотической» волновой картины. Следует особо отметить, что оси синфазности границы 3 в интервале 35 – 125 метров практически не прослеживаются.

Анализ радарограммы с использованием сейсмических данных и результатов геологических наблюдений позволил провести привязку отражающих горизонтов. Нижняя граница (1) приурочена к кровле коренных пород (гранитов), средняя (3) – к кровле многолетнемерзлых пород и верхняя (2) - к уровню грунтовых вод. УГВ имеет вогнутую форму, так как не введена поправка за рельеф. Отсутствие четких осей синфазности отраженных волн на границе раздела четвертичных отложений и коренных пород (граница 1) связано с сильной разрушенностью и трещиноватостью последних. Отмеченное выше исчезновение осей синфазности границы 3 в правой части профиля обусловлено, очевидно, наличием талика.

1 – кровля сильно выветрелых коренных пород (гранитов); 2 – УГВ; 3 – кровля многолетнемерзлых пород.

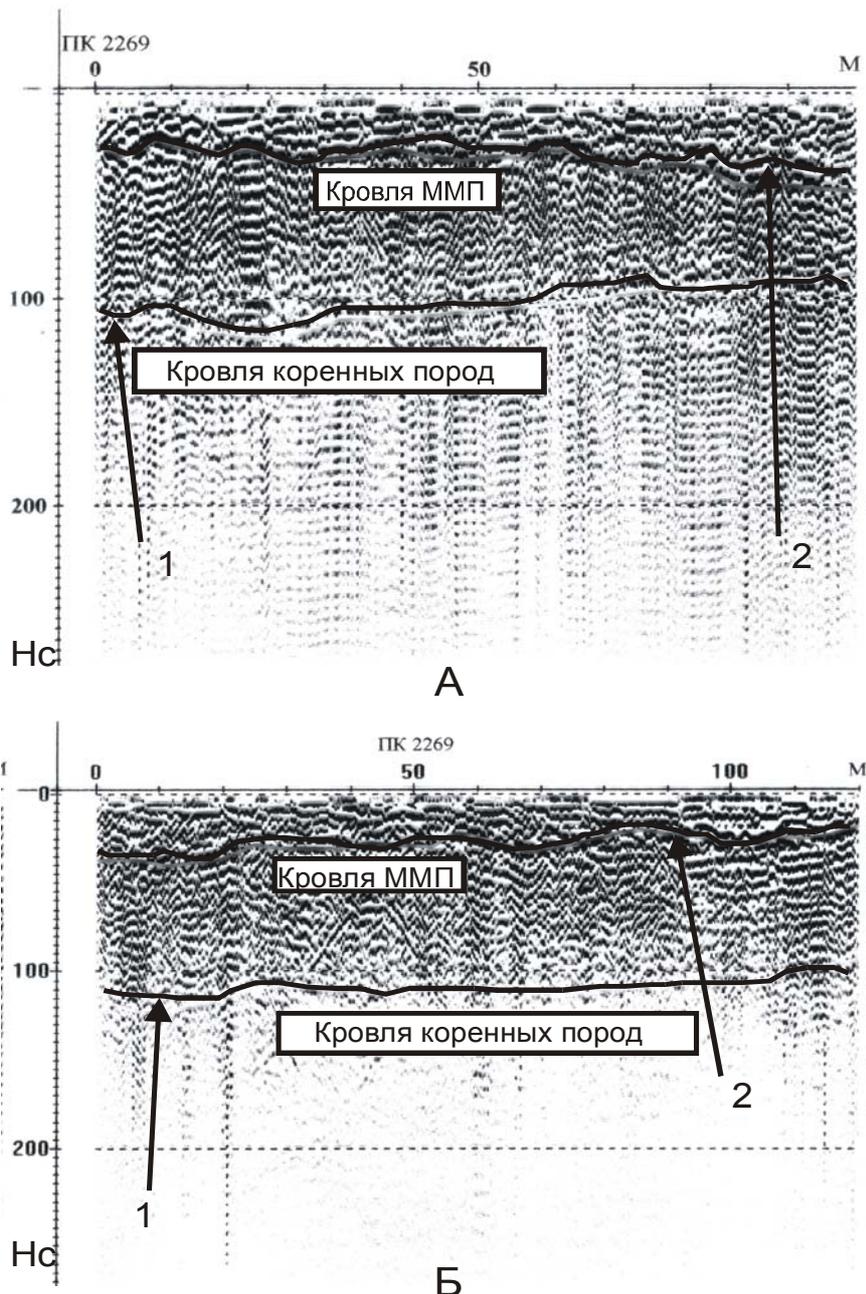


Рис. 13.4. Фрагменты георадиолокационных профилей, выполненных с антенной 150 МГц. На верхнем рисунке (А) оси синфазности отраженных волн проведены по тем же признакам, что и на рисунке 13.2. Отражающая граница 1 приурочена к кровле коренных пород (гнейсогранитов), граница 2 – к кровле ММП. На нижнем рисунке (Б) представлен георадиолокационный профиль, который пересекает рассмотренный выше (А) под прямым углом на пикете 2269. На нем также выделена кровля коренных пород и кровля ММП. Сравнивая эти два профиля необходимо отметить, что при изменении направления профилей тип волновой картины над границей 1 и отличительные признаки границы 2 не изменились, тогда как картировочные признаки коренных пород существенно поменялись – от «прозрачного» типа записи (Б) до «звучащего» (А), как на рис. 13.1 и 13.2. Иными словами, картировочные признаки отдельных толщ при региональных работах могут значительно меняться. 1- кровля коренных пород; 2 – кровля ММП.

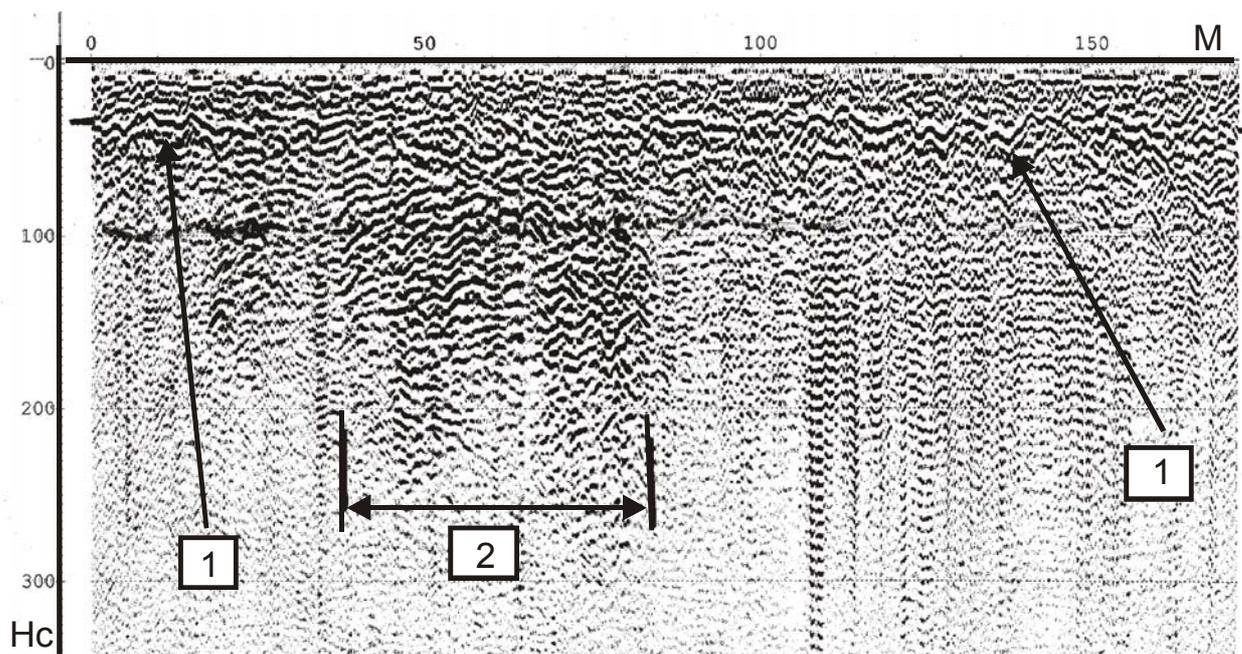


Рис. 13.5. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного с неэкранированной антенной 150 МГц. Ниже профиля, расположенного вдоль склона, наблюдаются линейные выходы подземных вод. На радарограмме зона разгрузки подземных вод (пикеты 40-80 метров, отмечена цифрой 2) выделяется по резкому усилению интенсивности осей синфазности. Оси синфазности отраженных волн, принятые за кровлю ММП, выделяются по протяженности и интенсивности и, несмотря на сложную конфигурацию (1), отчетливо дешифрируются на фоне, в целом, «хаотической» волновой картины. Отметим только, что прослеживаемость границы 1 существенно ухудшается на участке выхода подземных вод, что обусловлено общим увеличением амплитуды отражений на этом участке. 1 – кровля ММП; 2 – зона разгрузки подземных вод.

На представленных выше рисунках кровля многолетнемерзлых пород уверенно выделяется по интенсивным осям синфазности отраженных волн, однако кровля ММП выражается так отчетливо далеко не всегда. Криотекстура по разрезу может меняться, что должно отразиться и на изменении электрофизических параметров. Примером могут служить наблюдения на площадке в районе г. Лабытнанги (рис. 13.6, [10]).

Геологический разрез площадки представлен супесчано-суглинистым грунтом, мерзлым с глубины 0,6 метров. Криотекстура по всему разрезу преимущественно слоисто-сетчатая с размерами шпиров 2-4 мм в верхней части и 25-40 мм на глубинах ниже 4 метров. Скважина пройдена с отбором керна, по которому визуально определялась льдистость, значения которой изображены звездочками (X) на диаграмме рис. 13.6. В скважине были

проведены термометрия и электрический каротаж потенциал-зондом А1,0М, а вблизи устья скважины – ВЭЗ. По каротажу выделяется 3 слоя: Н = 1-4 м, $\rho_t=110$ Ом·м; Н = 4-7 м, $\rho_t=300$ Ом·м; Н = 7-10 м, $\rho_t=1000$ Ом·м. По данным ВЭЗ выделено 2 слоя мерзлой толщи: Н₁=0,5 – 4,0 м; $\rho_m=630$ Ом·м, Н₂=4,0 – 10,0 м; $\rho_m=2700$ Ом·м, мощность которых Н определялась с учетом поправки за анизотропию (рис. 13.6).

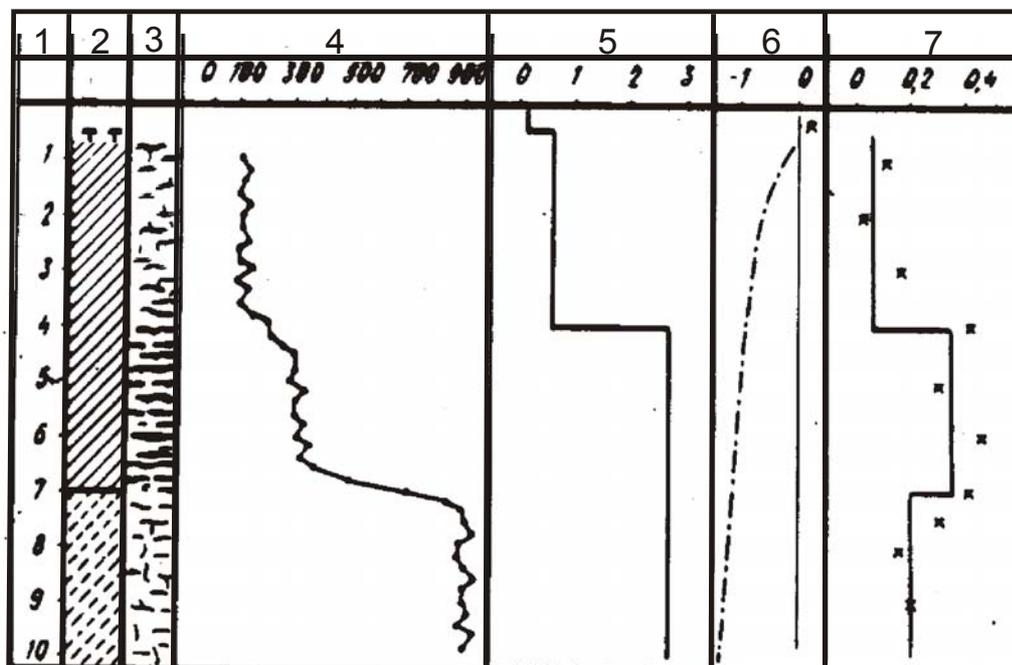


Рис. 13.6. Сопоставление геологического разреза скважины с данными электрометрических исследований, льдистости и термометрических наблюдений на площадке в районе г. Лабитнанги. 1 – глубина в м; 2 – геологический разрез; 3 – криогенная текстура; 4 – электрокаротаж потенциалзондом А1.0М (Ом·м); 5 – ВЭЗ (кОм·м); 6 – температура; 7 – льдистость.

Таким образом, в верхней части разреза можно выделить собственно кровлю ММП на глубине 0,6 метра и границу изменения криогенной текстуры на глубине около 4,0 метров, где отмечается значительное увеличение удельного электрического сопротивления. Можно предположить, что на георадиолокационном разрезе в подобном случае могут выделяться две отражающие границы: одна будет соответствовать кровле мерзлых пород, а нижняя – изменению льдистости. Если глубина залегания кровли ММП мала, то при работах с низкочастотными антеннами она может попадать в так называемую «мертвую» зону и на радарограммах не будет выделяться. Вследствие этого за кровлю ММП, как показывает данный пример, можно ошибочно принять границу изменения льдистости. Очевидно, чтобы избежать ошибок подобного рода при интерпретации результатов

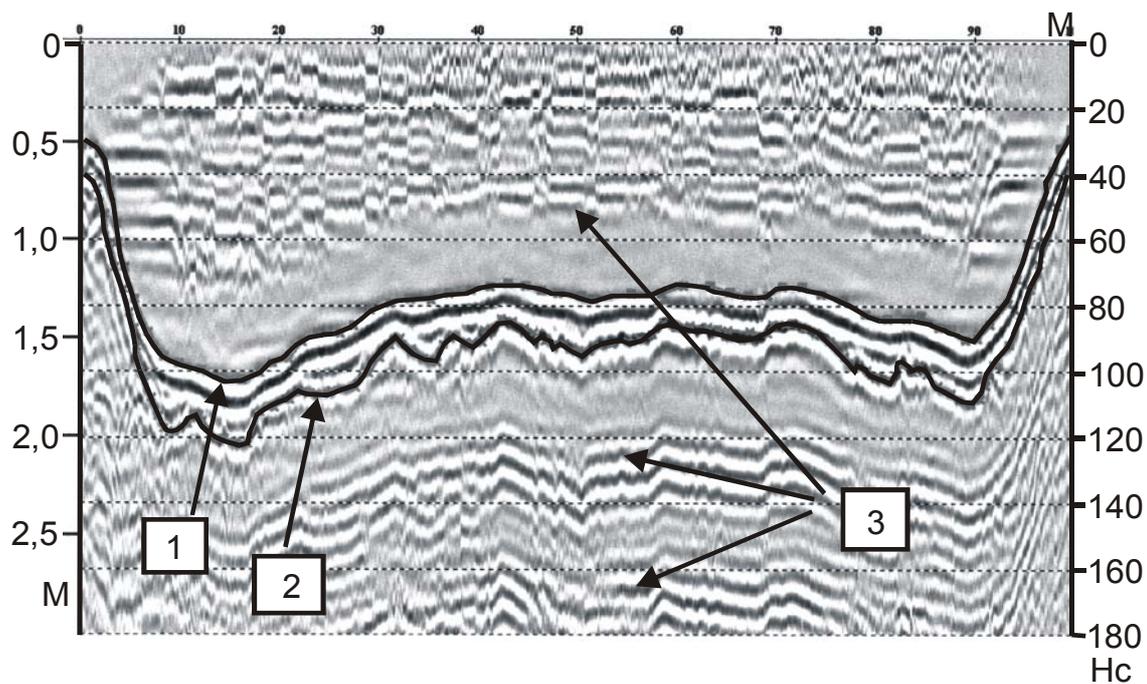
георадиолокационной съемки в районах с развитием многолетнемерзлых пород необходимо привлекать данные бурения.

Глава 14. ИССЛЕДОВАНИЯ НА ПРЕСНОВОДНЫХ АКВАТОРИЯХ [4]

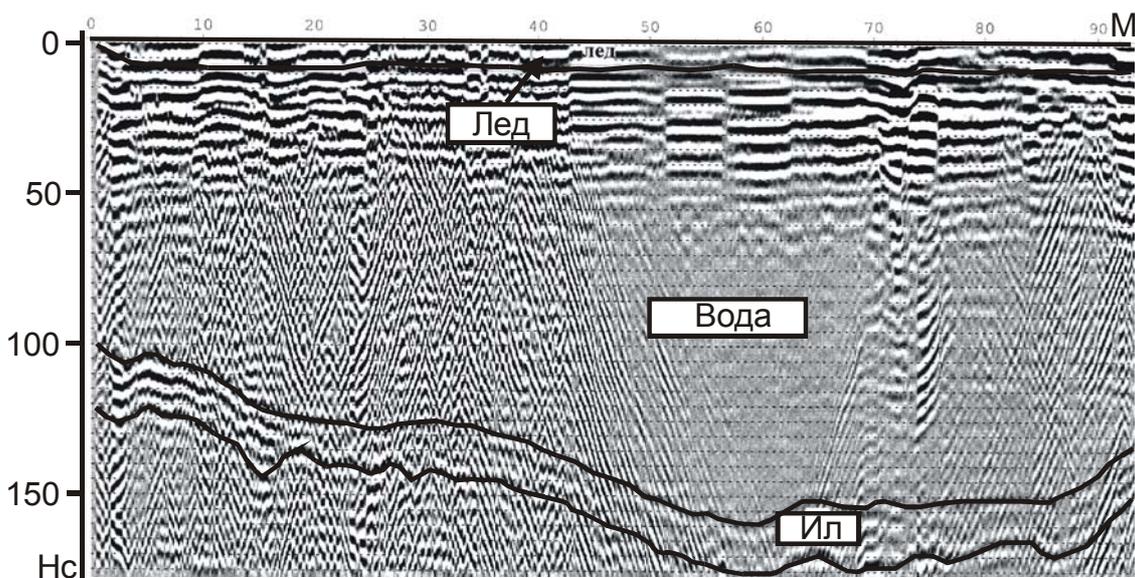
При изучении верхней части разреза есть ряд задач, связанных с исследованием детального геологического строения разреза под дном пресноводных акваторий (рек, прудов, озер). Эти задачи можно условно разделить на три группы: 1) собственно геологические, когда необходимо выяснить литологию и структуру осадочного разреза, например, для целей строительства; 2) геоэкологические – оконтуривание загрязненных участков на дне акваторий, которые пространственно приурочены, как правило, к местам распространения современных илов; 3) поисковые, связанные с поиском россыпных месторождений полезных ископаемых. До недавнего времени задачи подобного рода решались с помощью метода непрерывного сейсмоакустического профилирования на высоких частотах (НСП). Однако использование НСП сопряжено с рядом трудностей аппаратного и технологического характера (необходимо наличие специального судна, электропитания и т.д.). С другой стороны, требуется высокая разрешающая способность как по вертикали, так и в плане и большая детальность исследований по профилям. Использование георадиолокационного профилирования при решении задач данного типа показало, что этот метод имеет ряд преимуществ по сравнению с НСП, основными из которых являются следующие: 1. Возможность проводить исследования на маломерных судах, таких как пластиковые и резиновые лодки; 2. Высокая вертикальная и горизонтальная разрешающая способность и практически любая плотность наблюдений по профилям; 3. Электропитание от аккумуляторов; 4. Помехоустойчивость от механических шумов. С другой стороны, есть два существенных ограничения: 1. Низкое удельное электрическое сопротивление воды приводит к значительному уменьшению глубинности исследований, что будет показано ниже на реальных материалах (рис. 14.9); 2. Глубинность также сильно зависит от наличия в разрезе глин и суглинков (см. Главу 12).

Георадиолокационные наблюдения на пресноводных акваториях можно проводить также со льда, однако экспериментальные исследования, проведенные на одном из водоемов летом, зимой со льда и весной при наличии талого слоя (кроме льда), показали, что в последнем случае качество материала иногда настолько ухудшается, что не удается выделить даже поверхность дна [4]. В этом случае наличие слоя воды внутри или над льдом способствует возникновению интенсивных ревербераций электромагнитных импульсов за счет высокого коэффициента отражения на границах между этими слоями (рис. 14.2). Эта «зона нестабильных геоэлектрических параметров экранирует распространение импульсов георадара» [4].

При больших значениях удельного электрического сопротивления воды (более 60-70 Ом·м), как показывает наш собственный опыт и результаты других исследователей, глубинность может достигать 8-10 метров по воде и 5-7 метров по грунту (см. рис. 14.4, 14.5).



А



Б

Рис. 14.1. Фрагменты георадиолокационных профилей, выполненных с экранированной антенной 300 МГц на прудах с целью определения мощности современных илов. А – работы выполнялись с резиновой лодки, Б – со льда. Подошва илов проведена по интенсивным осям синфазности более сложной формы по сравнению с донным отражением и особенно уверенно выделяется при работах с резиновой лодки (А). Коренные отложения (суглинки) отличаются от современных илов отсутствием на радарограмме осей синфазности. Необходимо отметить, что качество материала, как правило, лучше при работах летом с лодки, чем со льда (ср. А и Б). 1 – дно; 2 – подошва слоя илов; 3 – регулярные помехи. Толщина льда и мощность илов были заверены бурением (подошва слоя льда на данном профиле по

особенностям волновой картины не выделяется и показана только по данным бурения).

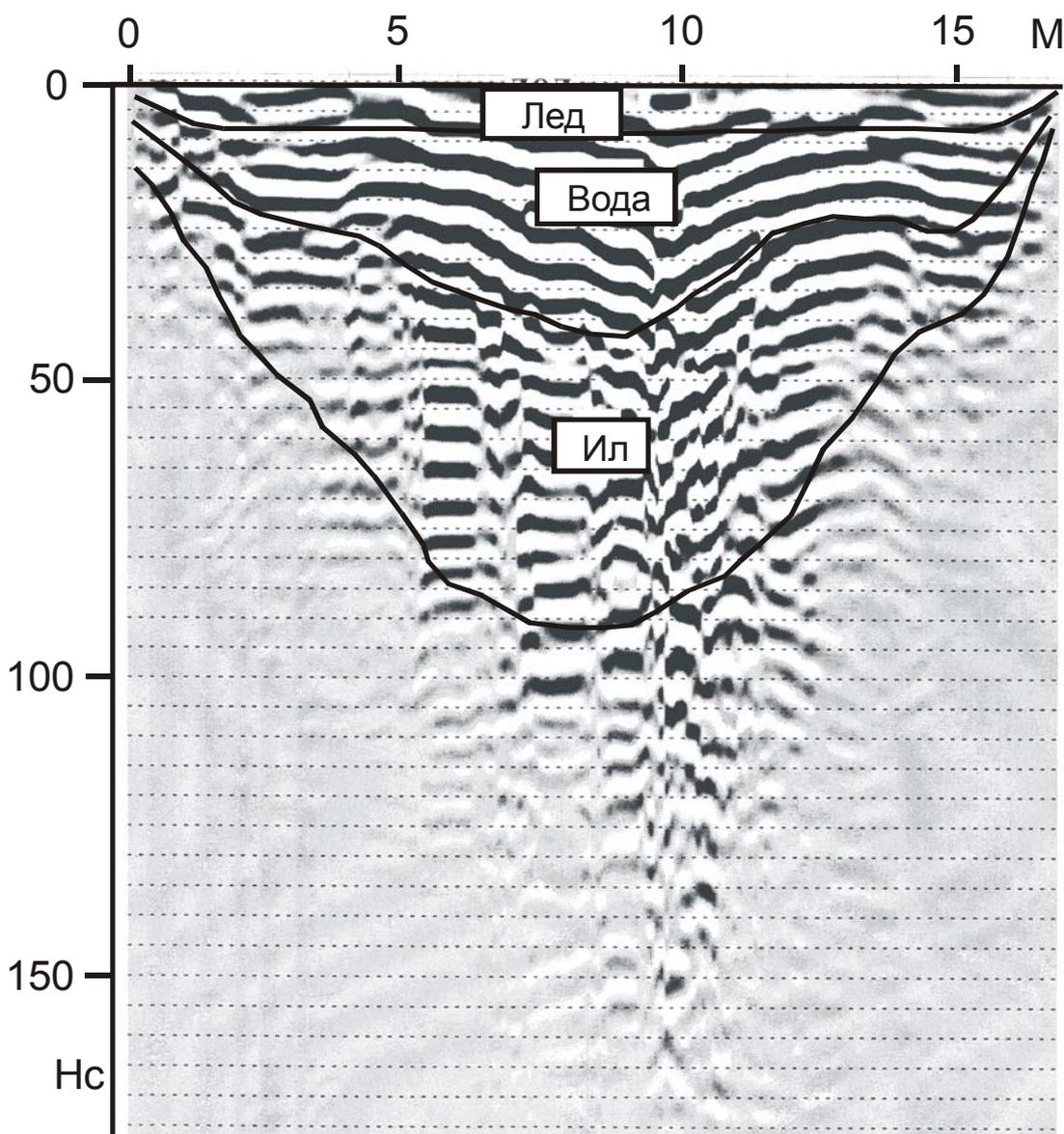
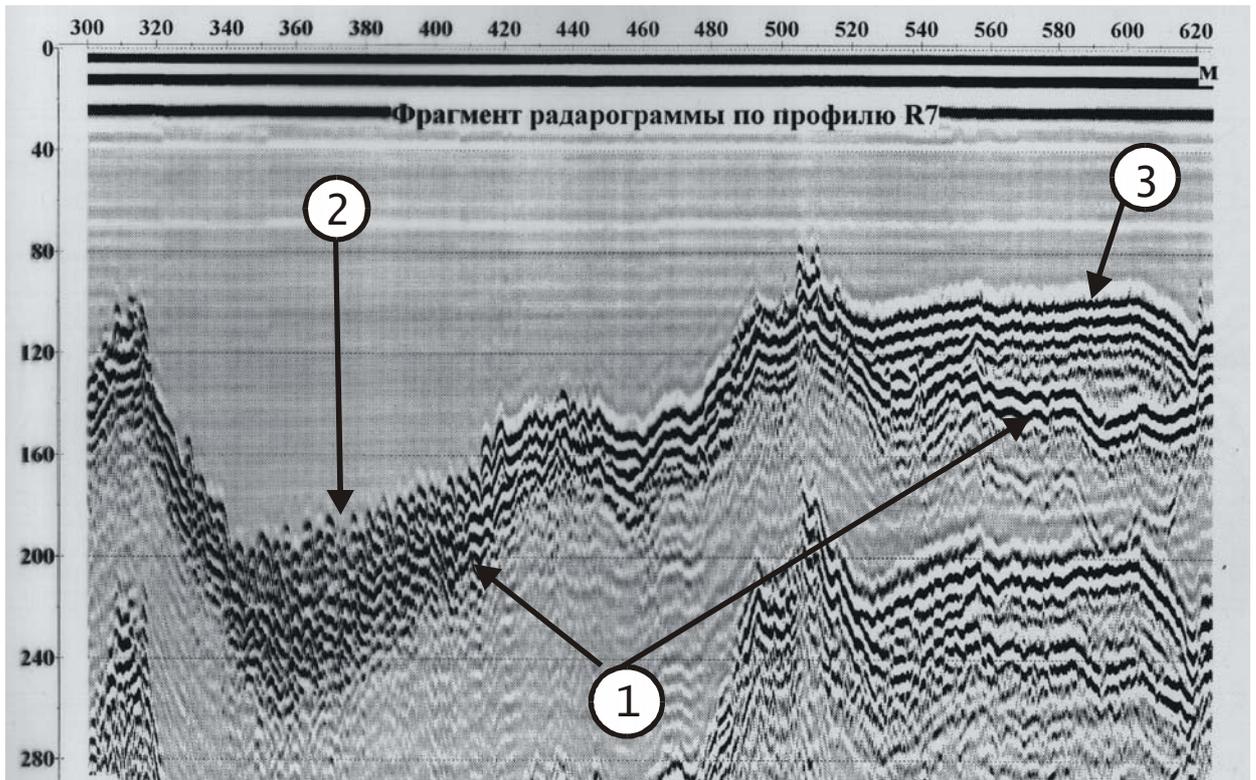


Рис. 14.2. Обработанный георадиолокационный профиль, выполненный на пруду с экранированной антенной 300 МГц. Исследования проводились со льда при наличии тонкого слоя талой воды. Видно, что по особенностям волновой картины границы между льдом и водой, водой и илами и в основании илов практически не выделяются. Причиной резкого ухудшения материала является наличие слоя талой воды, что привело к возникновению реверберации (см. [4]). Толщина льда, глубина воды и мощность современных илов определялись с помощью бурения. Полученные значения были переведены во временной масштаб при следующих значениях скоростей распространения электромагнитных волн – для льда-15,0 см/нс, для воды-3,3 см/нс, для илов-5,0 см/нс.



НС

Рис. 14.3. Фрагмент обработанного георадиолокационного профиля, полученного на реке с экранированной антенной 300 МГц. Работы выполнялись с резиновой лодки. Максимальная глубина воды 3,3 метра на пикете 345 метров. По особенностям волновой картины на профиле выделено 3 георадарных комплекса. Нижний комплекс характеризуется отсутствием осей синфазности отраженных волн. В его кровле (1) в правой части профиля наблюдаются интенсивные оси синфазности, в левой – отмечается резкая смена волновой картины («прозрачный» тип записи меняется на «хаотический»). Второй и третий комплексы (2 и 3) с несогласием залегают на нижнем и выделяются прежде всего по морфологии осей синфазности. Второй имеет «хаотическую» волновую картину с множеством осей синфазности дифрагированных волн. Третий комплекс характеризуется протяженными субгоризонтальными осями синфазности различной интенсивности. Эти отличия особенно заметны при анализе поверхности дна. Опробование показало, что нижний комплекс представлен гранитами, второй – галечниками с валунами, третий - разнозернистыми песками. 1 – кровля коренных пород; 2 – галечники с отдельными валунами; 3 – пески.

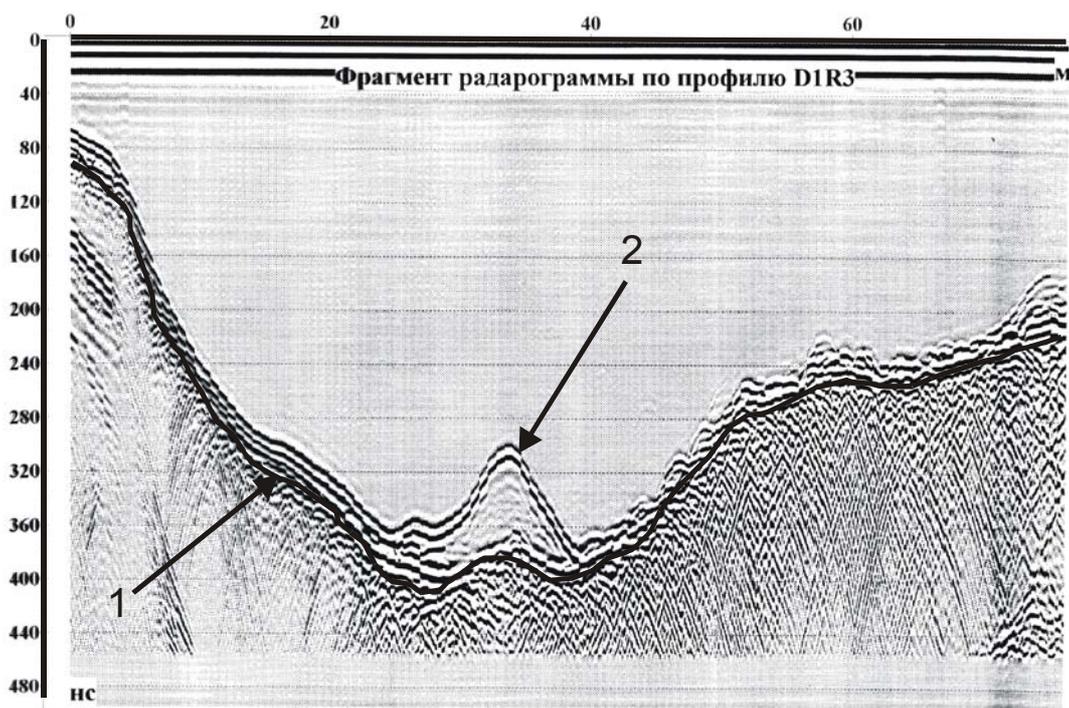
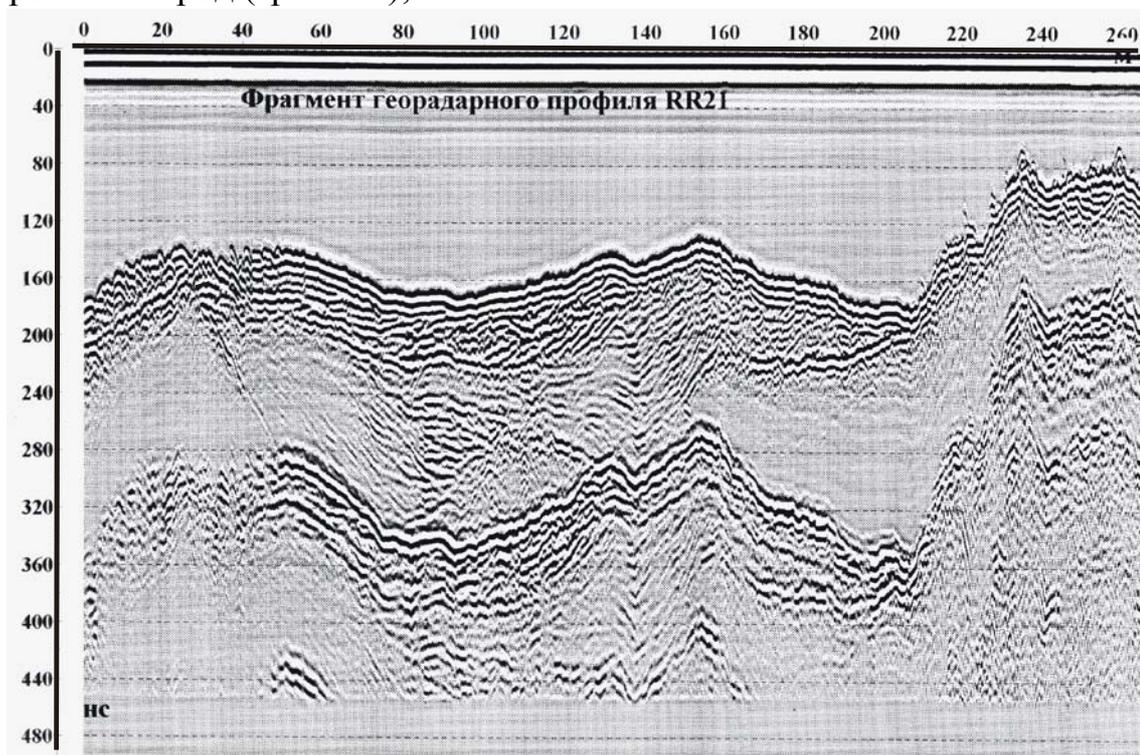
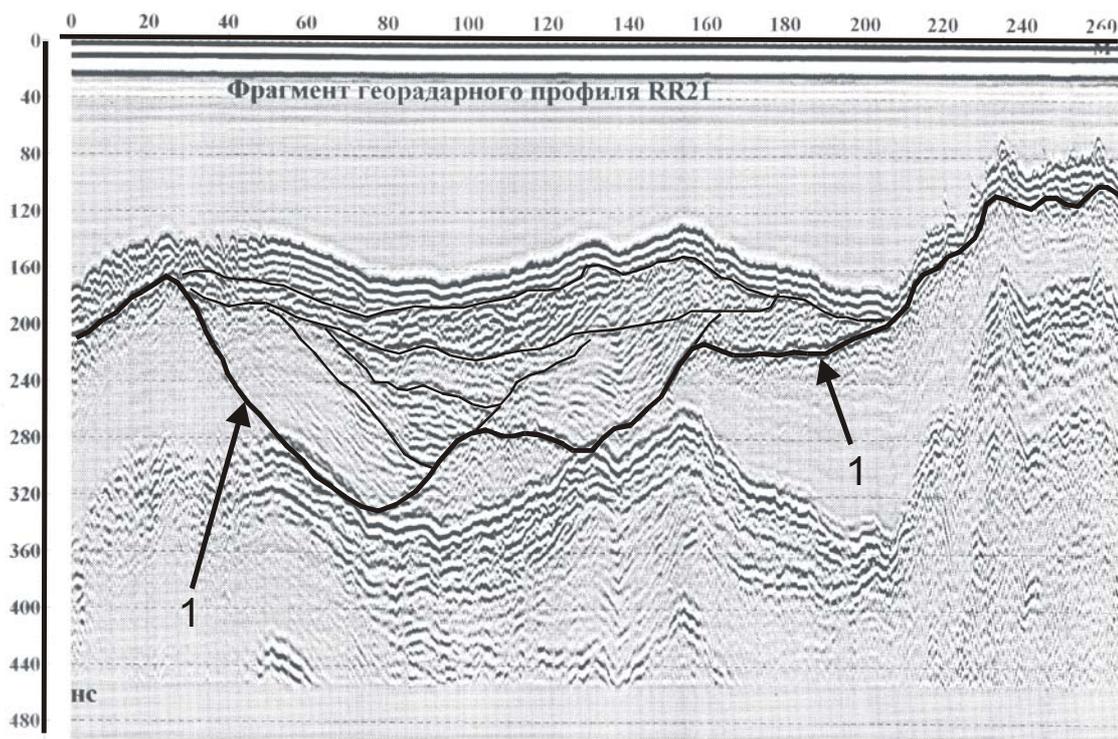


Рис. 14.4. Фрагмент обработанного георадиолокационного профиля, полученного на реке с экранированной антенной 300 МГц. Работы выполнялись с резиновой лодки. На профиле уверенно выделяются два основных георадарных комплекса. Нижний выделяется по отсутствию осей синфазности (его кровля показана цифрой 1). В верхнем также не наблюдаются отчетливые оси синфазности (2). По наличию многочисленных «усов» дифракции в кровле нижнего комплекса можно сделать вывод о ее сложной форме не только в плоскости профиля, но и в плане. 1 – кровля коренных пород (граниты); 2 – песчаная линза.



А



Б

Рис. 14.5. Фрагмент обработанного георадиолокационного профиля, выполненного на реке с экранированной антенной 300 МГц. Работы производились с резиновой лодки. Цель исследований – поиск локальных углублений и палеорусел в кровле коренных пород. А – георадиолокационный профиль; Б – его интерпретация. По типу волновой картины выделено два георадарных комплекса, граница между которыми показана на профиле цифрой 1. Нижний комплекс характеризуется «прозрачным» типом волновой картины, верхний имеет очень сложное строение. В верхнем комплексе наблюдаются многочисленные оси синфазности разной конфигурации, протяженности и интенсивности. Часто отмечаются также участки с очевидными угловыми несогласиями, т.е. участки, где оси синфазности прекращают прослеживаться. Эти особенности волновой картины являются достаточными для разделения верхнего комплекса на ряд подкомплексов, границы между которыми показаны тонкими черными линиями. В целом, верхний комплекс является слоистым. Сопоставление с данными геологических наблюдений показало, что нижний комплекс сложен гранитами, а верхний представляет собой сложнопостроенную толщу аллювиальных отложений, выполняющих палеорусло.

1 – кровля коренных пород (гранитов).

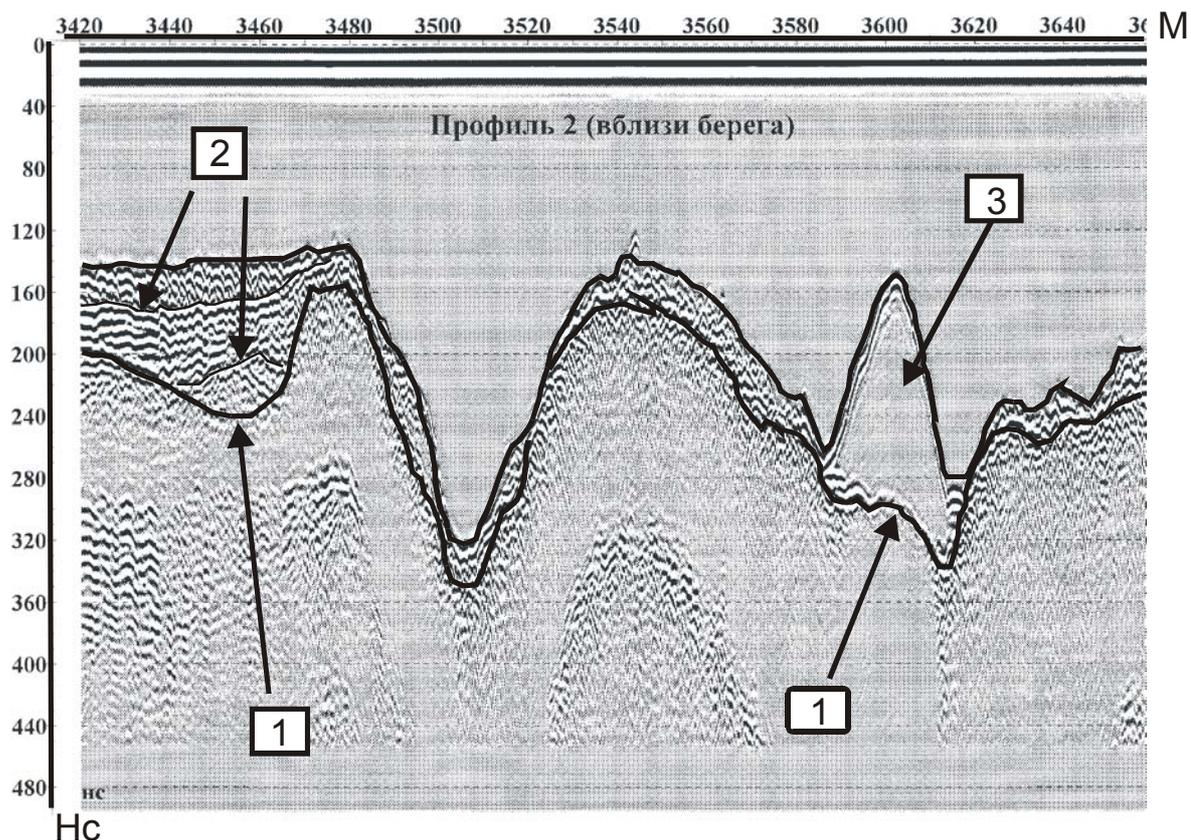


Рис. 14.6. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного на реке с антенной 300 МГц. Работы производились с резиновой лодки. Целью исследований был поиск участков, перспективных на россыпные месторождения полезных ископаемых. К ним, в первую очередь, относятся палеоруслу и другие углубления в коренных породах. По характеру волновой картины уверенно выделяются 5 георадарных комплексов. Нижний комплекс (его кровля показана цифрой 1) имеет те же признаки, что и нижний комплекс на рис. 14.5. С угловым несогласием в левой части профиля на нем залегают три комплекса (границы между ними показаны тонкими черными линиями – цифра 2), которые отличаются по конфигурации и протяженности осей синфазности. Пятый комплекс характеризуется «прозрачным» типом волновой картины и имеет линзовидную форму (3).

В левой части профиля в кровле нижнего комплекса наблюдается углубление (палеоруслу ?), заполненное тремя комплексами. По аналогии с профилем, изображенным на рис. 14.3, нижний комплекс представлен гранитами, а залегающие выше комплексы – песками и галечниками. Пески имеют субгоризонтальные и интенсивные оси синфазности, а галечники характеризуются так называемой «хаотической» записью (см. рисунок). Линзовидный в разрезе комплекс с «прозрачным» типом волновой картины (3) представлен чистыми песками.

Измеренное УЭС воды превышает 60 Ом·м. Как было указано выше, при таких значениях УЭС качество получаемого материала высокое. Глубина воды у пикета 3505 м – 5,3 м. 1 – кровля коренных пород; 2 – основные отражающие границы в осадочной толще; 3 – песчаная линза.

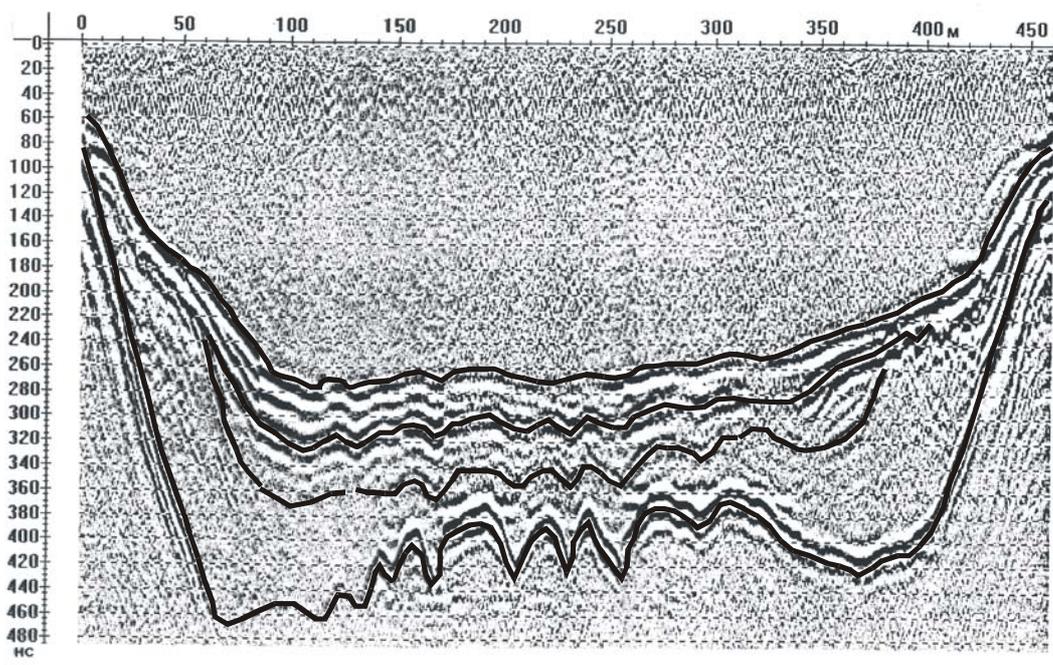


Рис. 14.7. Георадиолокационный профиль, выполненный с неэкранированной антенной 75 МГц (использовался георадар Зонд-10). Работы проводились на озере с резиновой лодки. Удельное электрическое сопротивление (УЭС) воды более 100 Ом·м. Цель исследований – изучение геологического строения осадочного чехла на дне озера. Максимальная глубина воды на данном профиле составляет 4,5 метра, глубинность – около 5 метров (при скорости распространения электромагнитных волн в водонасыщенных осадках 5 см/нс). По данным интерпретации выделено 4 георадарных комплекса, границы между которыми показаны черными линиями. Материал предоставлен И.Н.Модиним.

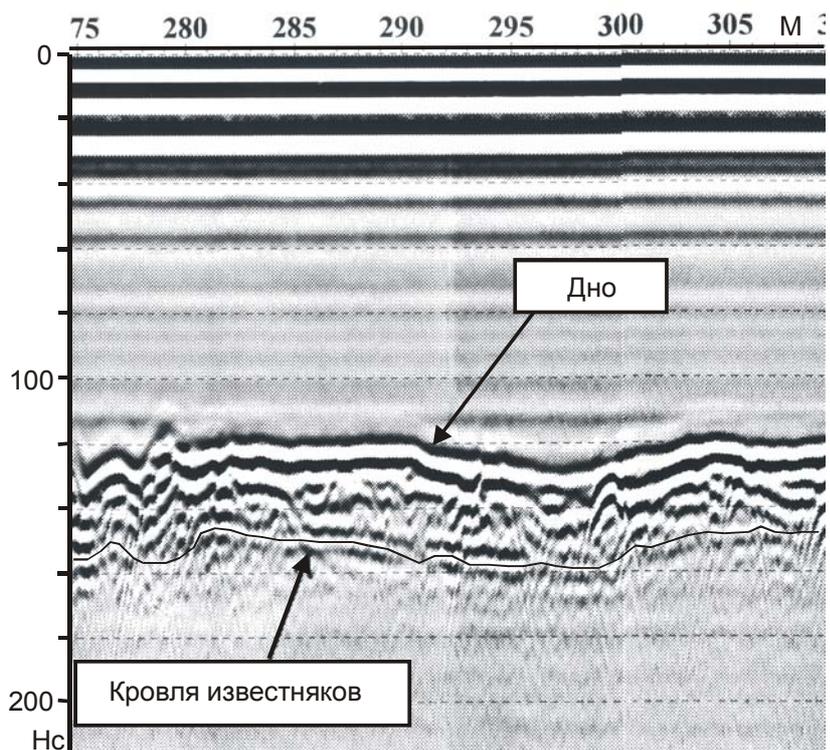


Рис. 14.8. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного на Водоотводном канале в г. Москве с экранированной антенной 300 МГц. Работы проводились с пластиковой лодки. По данным бурения на берегах канала было известно, что верхняя часть разреза собственно в канале должна быть представлена известняками, перекрытыми современными илами. Целью исследований было изучение геологического разреза на глубину до 10 метров. Работы проводились в комплексе с непрерывным сейсмопрофилированием, по результатам которого была определена глубина залегания подошвы известняков. Георадиолокационным методом изучалась их кровля. На профиле выделено два георадарных комплекса, которые отличаются не только типом волновой картины, но и наличием углового несогласия между ними. В кровле нижнего комплекса довольно отчетливо дешифрируются оси синфазности отраженных волн, ниже которых волновую картину можно охарактеризовать как «прозрачную». В верхнем комплексе наблюдаются многочисленные оси синфазности сложной конфигурации и различной интенсивности. По данным пробоотбора, проведенного с лодки, установлено, что нижнему георадарному комплексу соответствуют известняки, а верхнему – современные илы. Кровля известняков находится на глубинах около 80 см (при пересчете из временного в глубинный масштаб использовалась средняя скорость 5,0 см/нс, определенная по годографам дифрагированных волн). Глубина воды ~ 2,0 м.

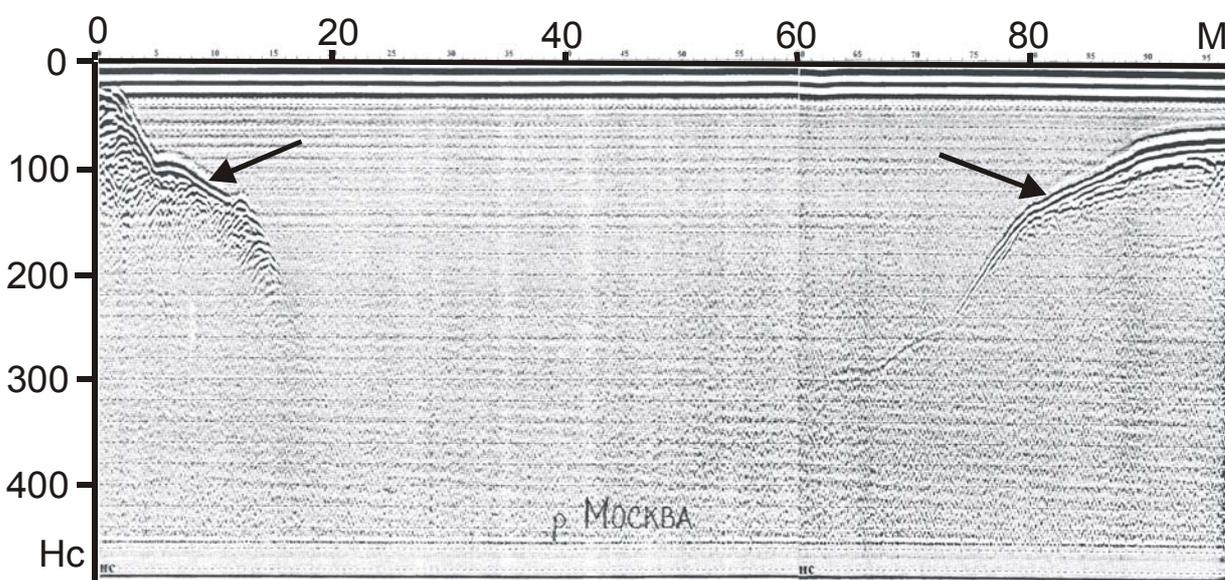


Рис. 14.9. Георадиолокационный профиль, выполненный с экранированной антенной 300 МГц на реке Москве. Работы проводились на пластиковой лодке. Цель исследований – изучение геологического строения верхней части осадочного чехла в связи с предполагаемым строительством пешеходного моста. Измеренное удельное электрическое сопротивление воды в р. Москве не превышает 25 Ом·м. На данном примере отчетливо видно, что при таких низких значениях УЭС воды глубинность исследований значительно уменьшается по сравнению с водоемами, где УЭС превышает

60-70 Ом·м (см., например, георадиолокационные профили на рис. 14.4, 14.6 и 14.7). Максимальная глубина воды по этому профилю немногим более 5 метров, однако реальная запись оканчивается на времени около 200 нс, что равно приблизительно 3 метрам (дно в центральной части русла не выделяется). Стрелками показана поверхность дна.

Глава 15. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОРАДАРА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ.

В последние годы результаты георадиолокационных исследований все чаще применяются при строительстве различных сооружений, их реконструкции и мониторинге уже действующих объектов. Области применения с некоторой долей условности можно разделить на две большие группы. К первой относятся задачи по изучению собственно строительных конструкций - определение их толщины, наличия арматуры в бетоне, пустот, в некоторых случаях длины, степени разрушенности и т.д. Вторая группа задач связана с детальным изучением геологического строения верхней части разреза, сложенной как естественными, так и искусственными (техногенными) грунтами, залегающими непосредственно на участке предполагаемого строительства или на прилегающих к уже существующим объектам территориях. К этой группе относятся такие задачи, как выяснение состояния основания автомобильных и железных дорог, поиск пустот под конструкциями, определение причин деформаций сооружений, зон разуплотнения грунтов и т.д.). Очевидно, что для решения некоторых задач одних георадиолокационных данных недостаточно, поэтому необходимо привлекать материалы других методов, в первую очередь данные опробования.

В предыдущих разделах были продемонстрированы некоторые результаты применения георадиолокационных исследований в строительстве (см. Главы 10-13). Это работы по обнаружению трубопроводов, кабелей, фрагментов фундаментов и строительных конструкций, изучение причин разрушения насыпи и полотна автомобильной дороги, поиск карстоопасных участков и зон трещиноватости в подземной выработке и т.д. Ниже будут показаны примеры георадиолокационных исследований с использованием практически всего ряда антенн (от низкочастотных до высокочастотных) при решении ряда других задач. Особый интерес, на наш взгляд, могут представлять работы по выяснению причин деформаций отдельных конструкций зданий, которые проводились в комплексе с другими методами.

Причиной деформаций разнообразных сооружений часто является развитие процессов суффозии с образованием затем зон разуплотнения и просадок грунта. Особенно интенсивно эти процессы развиваются в несвязных грунтах под воздействием проходящей воды, т.е. проблема в общем виде сводится к поиску зон локального увлажнения, которые довольно успешно выявляются с помощью георадиолокации. В городских условиях, как неоднократно отмечалось в литературе, процессы суффозии значительно ускоряются в местах локальных протечек на теплотрассах и других трубопроводах.

Эффекты, возникающие на радарограммах при изучении некоторых объектов, не всегда в настоящее время находят физическое объяснение, однако авторы считают полезным их демонстрацию, чтобы привлечь к ним внимание.

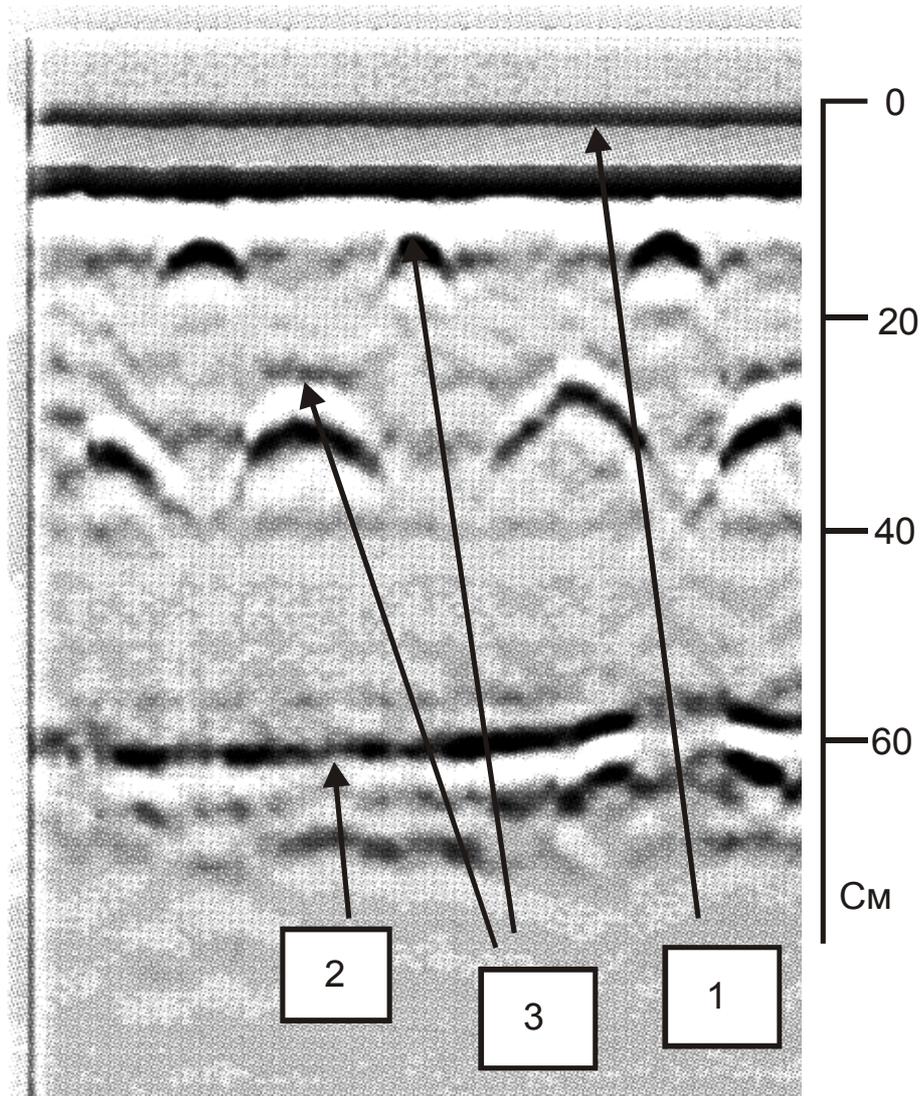


Рис. 15.1. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного с антенной АБ-1700 (георадар ОКО-2, материалы ООО «ЛОГИС»). Работы проводились с целью обнаружения арматуры в бетонном блоке толщиной 60 см. 1 – поверхность блока; 2 – противоположная сторона блока; 3 – примеры осей синфазности дифрагированных волн от металлических прутков арматуры (отчетливо видно два ряда арматуры).

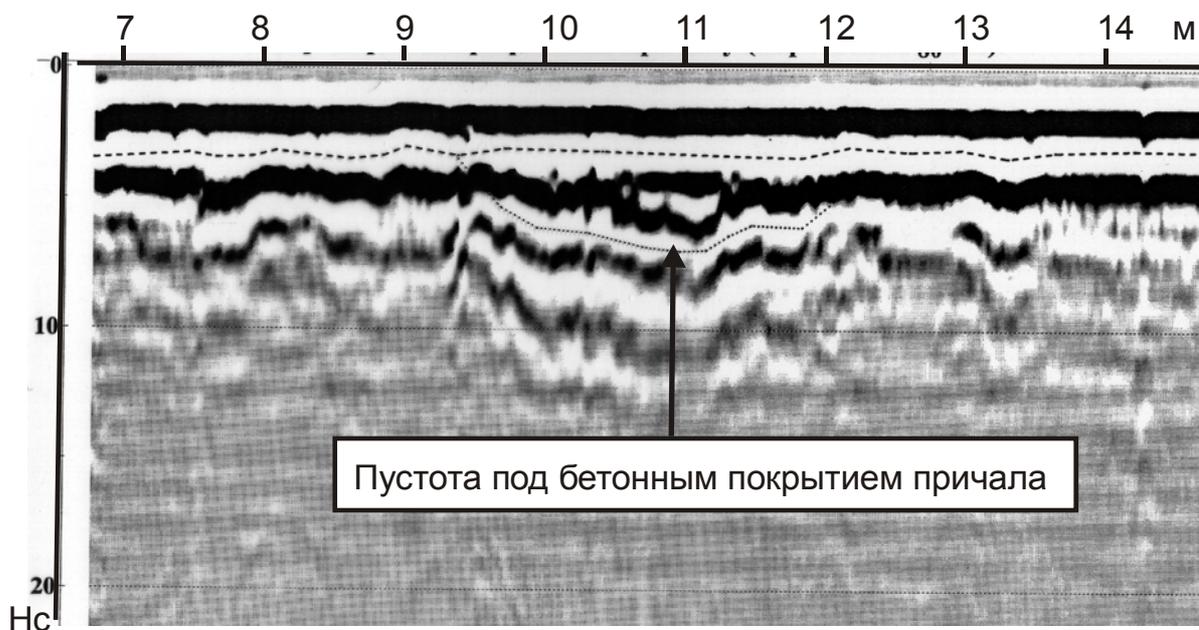


Рис. 15.2. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного с антенной 1 ГГц. Цель исследований – поиск пустот под бетонным покрытием причала. Заверка на пикете 11 м показала наличие пустоты глубиной ≈ 60 см. (использовалась скорость 30 см/нс).

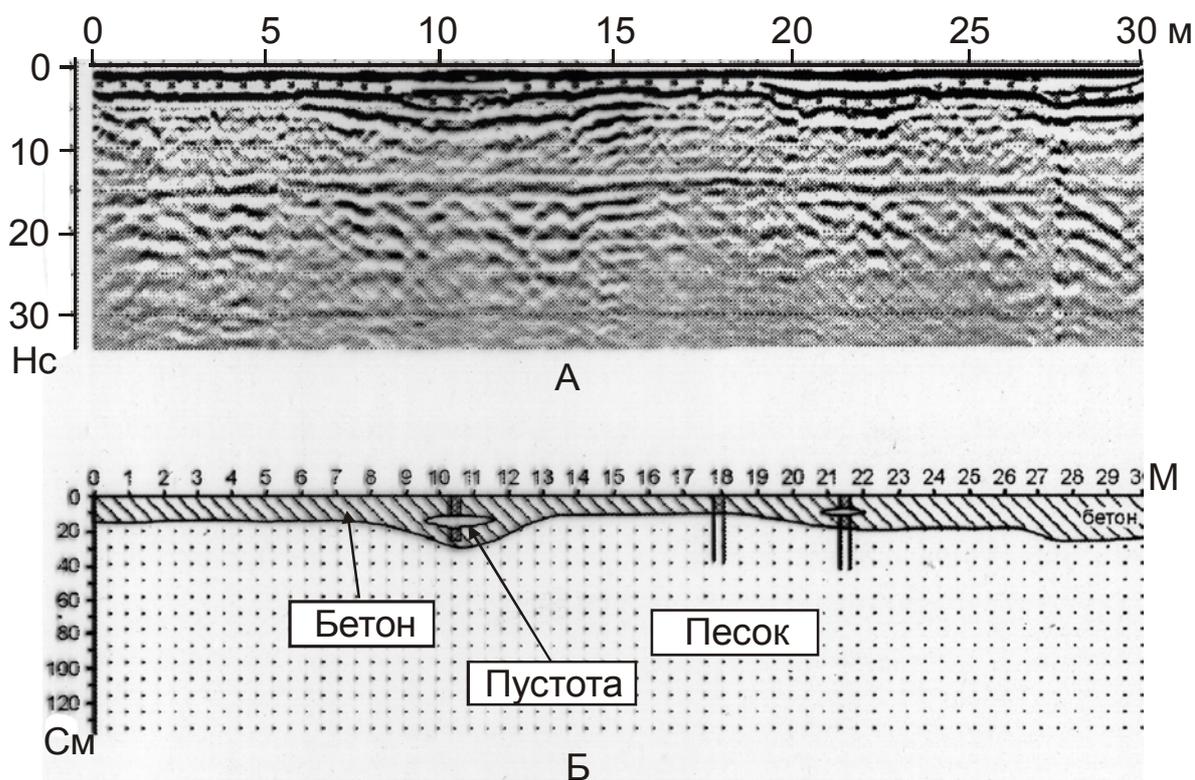


Рис. 15.3. Георадиолокационный профиль, выполненный с антенной 1 ГГц (А) и его интерпретация (Б). Цель исследований – определение толщины бетонного покрытия в подвале. На глубине около 15 нс (А) видно отражение от потолка. Для заверки работ в трех точках было выполнено ручное бурение. На пикетах 10,5 м и 21,5 м бурение показало наличие в бетонной стяжке небольших пустот.

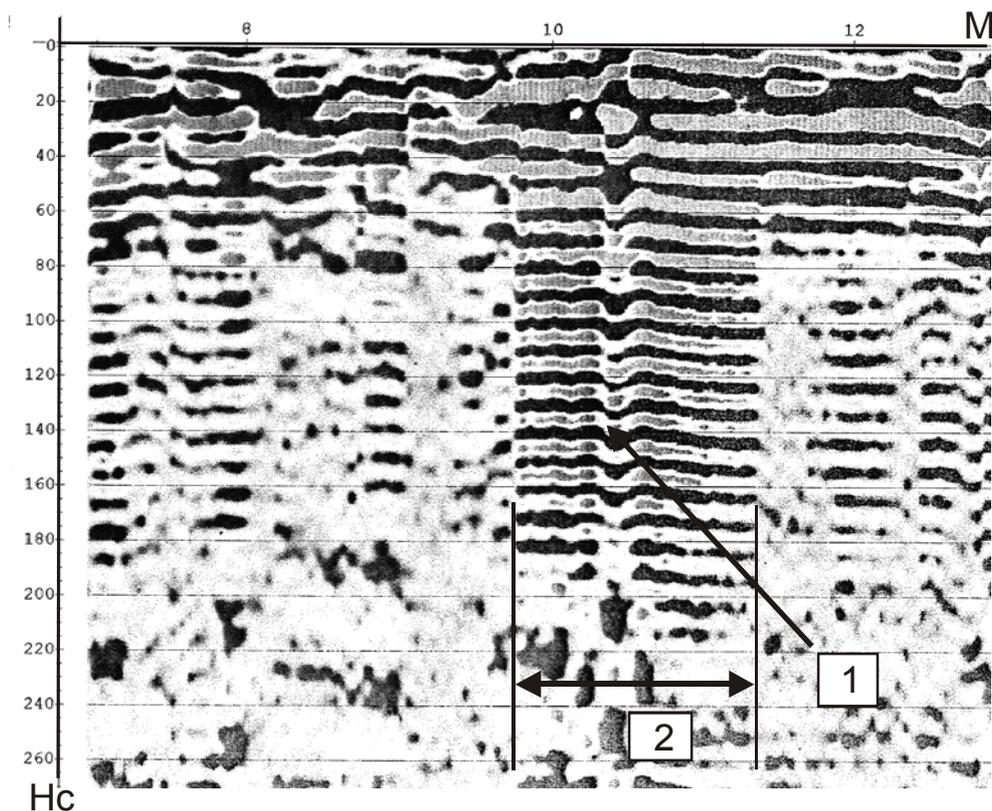


Рис. 15.4. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного с антенной 500 МГц. Цель работ – разработка методики определения длины свай. Профиль проходит у изголовья отдельно расположенной ж/б сваи размером 30 x 30 см (1). На радарограмме по обеим сторонам сваи наблюдается зона так называемой «звучащей» записи (2) шириной около 1,5 метров, которая оканчивается на времени около 180 нс. При $V=10$ см/нс это соответствует глубине около 9 метров, что равно длине сваи.

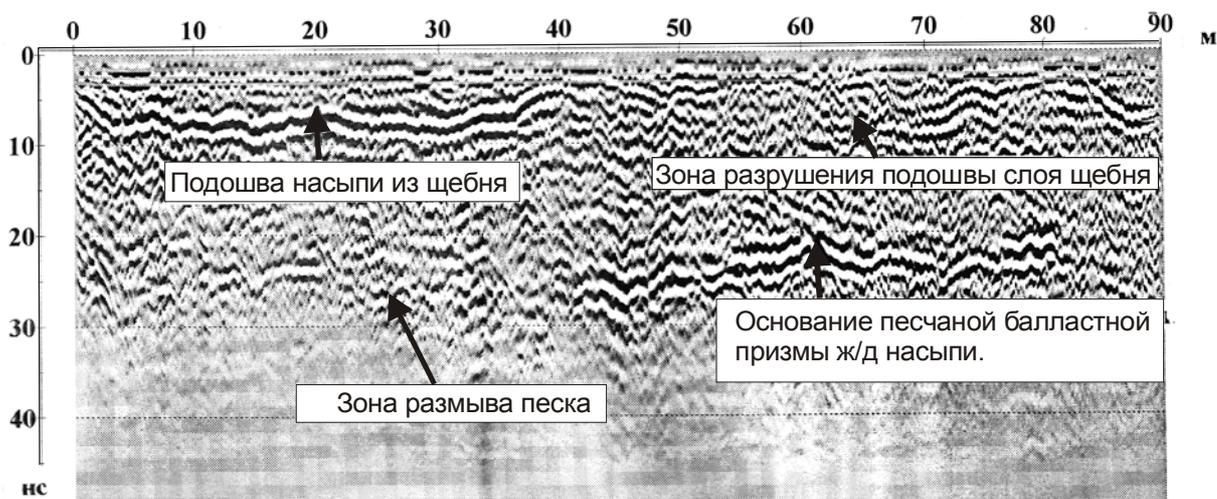


Рис. 15.5. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного с антенной 750 МГц вдоль ж/д насыпи. Цель исследований – изучение состояния балластной призмы насыпи. Исчезновение отчетливых осей

синфазности отраженных волн от подошвы насыпи из щебня на глубине около 8 нс (пикеты 40 – 70 м) и от подошвы слоя песка на времени около 25 нс (пикеты 0 – 40 м) свидетельствует о развитии процессов суффозии и может привести к просадке насыпи (материалы В.П.Золотарева).

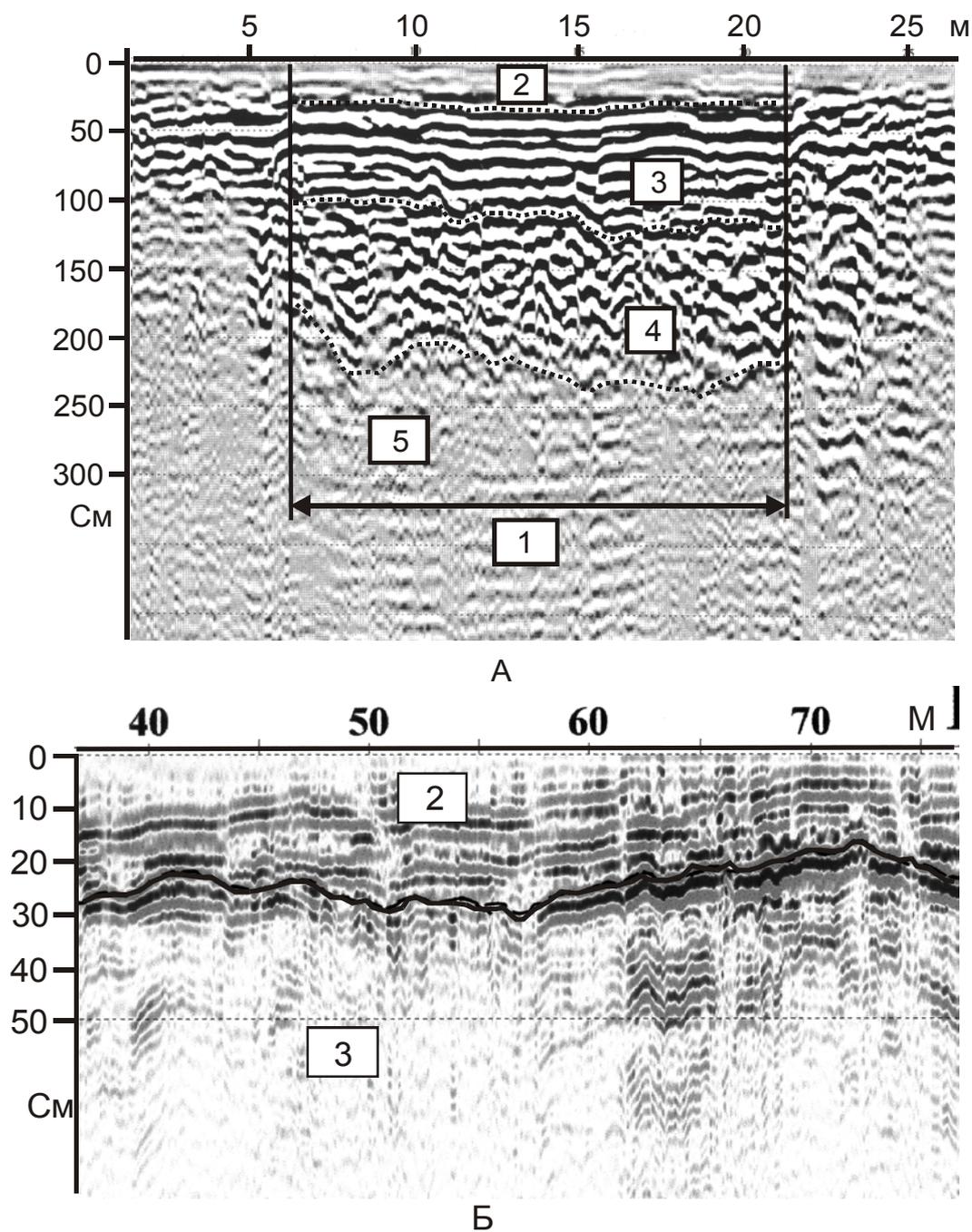
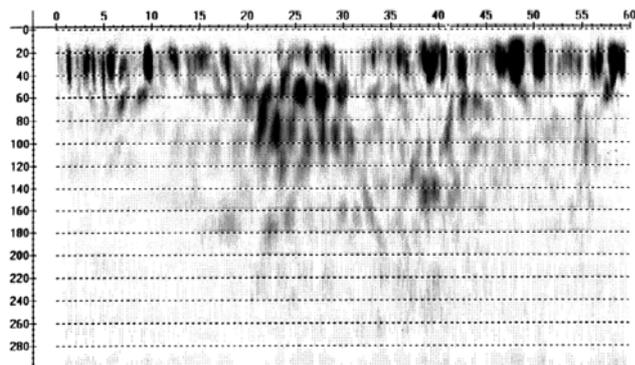
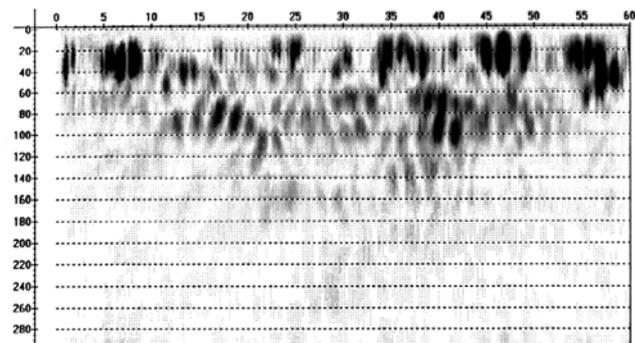


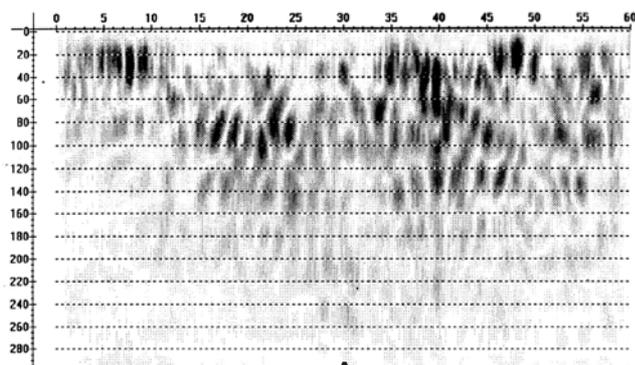
Рис. 15.6. Фрагменты георадиолокационных профилей по взлетно-посадочной полосе (ВПП), выполненные с антеннами: А-300 МГц; Б-1 ГГц. Цель работ – изучение строения ВПП. Применение антенны 300 МГц (А) позволило выяснить строение ВПП (1-ширина заасфальтированной части ВПП; 2-асфальт; 3-слой гравия; 4-насыпные грунты; 5-коренные породы). На профиле, полученном с антенной 1 ГГц (Б), отчетливо выделяются отдельные слои в асфальте. Резкое усиление амплитуды отражения на границе слоев асфальта и гравия свидетельствует о значительном увлажнении (пк 57-77 м).



ДЕКАБРЬ

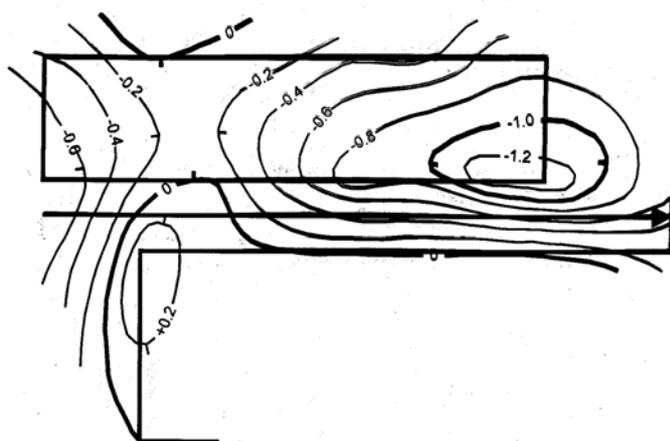


АПРЕЛЬ



ИЮЛЬ

А



Б

Рис. 15.7. Пример использования данных георадиолокационной съемки совместно с результатами изучения вертикальных просадок. Горизонтальный масштаб на рисунках один и тот же. Цель работ – определение причины деформаций 2-х этажного здания (появление трещин

на стене). Георадиолокационные наблюдения с антенной 75 МГц проводились в декабре, апреле и июле по одному и тому же профилю. На рис. А представлены разрезы после преобразования Гильберта. На рис. Б показано положение георадарного профиля (линия со стрелкой) и контуры зданий. Изолинии с сечением 0,2 мм отражают суммарные смещения за год по вертикали, определенные по данным нивелирной съемки (материалы В.А.Волкова). Георадиолокационные наблюдения показывают изменения зон влагонасыщенности (см. Главу 11) за период изучения. Сопоставление результатов георадиолокационных и нивелирных съемок показывает, что максимальные значения вертикальных просадок приурочены к правой части участка работ, где отмечаются значительные изменения во времени влагонасыщенности в верхней части разреза, что и приводит, по-видимому, к развитию здесь процессов суффозии, разуплотнения грунтов и к просадкам.

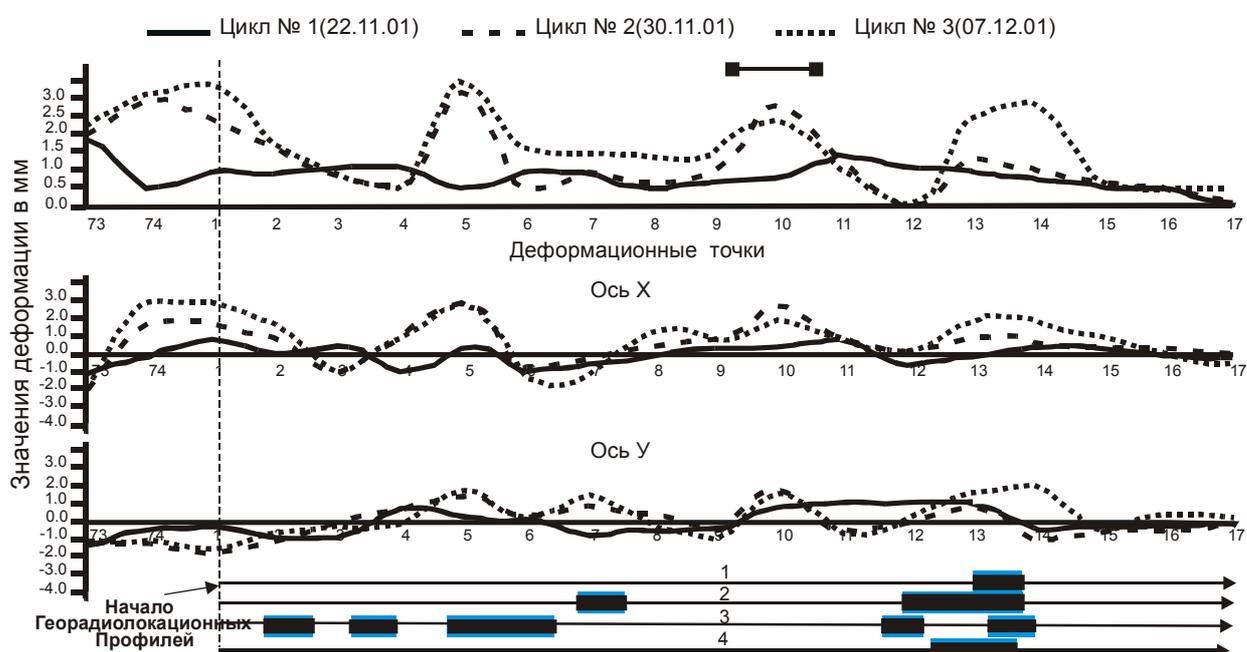


Рис. 15.8. Модуль плановых смещений реперов, расположенных на фасаде дома, и положение зон локального увлажнения по данным георадиолокации. Цель исследований – выяснение причины появления трещин на стенах здания. Использовалась экранированная антенна 300 МГц. Вдоль фасада дома было пройдено 4 георадиолокационных профиля (зоны увлажнения показаны на профилях черными прямоугольниками). Наличие увлажненных грунтов подтверждается значительным понижением значений скорости распространения электромагнитных волн на этих участках. В отличие от ситуации, описанной на рис. 15.7, здесь георадиолокационные наблюдения проводились в комплексе с изучением деформаций в горизонтальной плоскости (по осям x и y). Было проведено три цикла измерений. Вдоль фасада дома выделяются 3 участка с повышенными значениями деформаций: первый (деформационные точки 1-5) и третий (деформационные точки 13-14) пространственно совпадают с зонами повышенного увлажнения, которые обусловлены протечками в

трубопроводах. Второй участок, который находится между деформационными точками 9 и 11, приурочен к зоне сочленения двух конструктивных элементов здания (см. рис. 15.9). Таким образом, на наш взгляд имеется два фактора, которые могут быть причиной образования трещин на стене здания: первый – развитие суффозии вследствие протечек трубопроводов и второй - деформации, связанные с конструктивными особенностями здания.



Рис. 15.9. Фото части фасада дома между деформационными точками 9-11 (см. рис. 15.8). 1 – линия сочленения двух конструктивных частей дома; 2 – линия сочленения приурочена к изменению угла наклона поверхности земли, о чем свидетельствует различная высота нижнего края окон от асфальта.

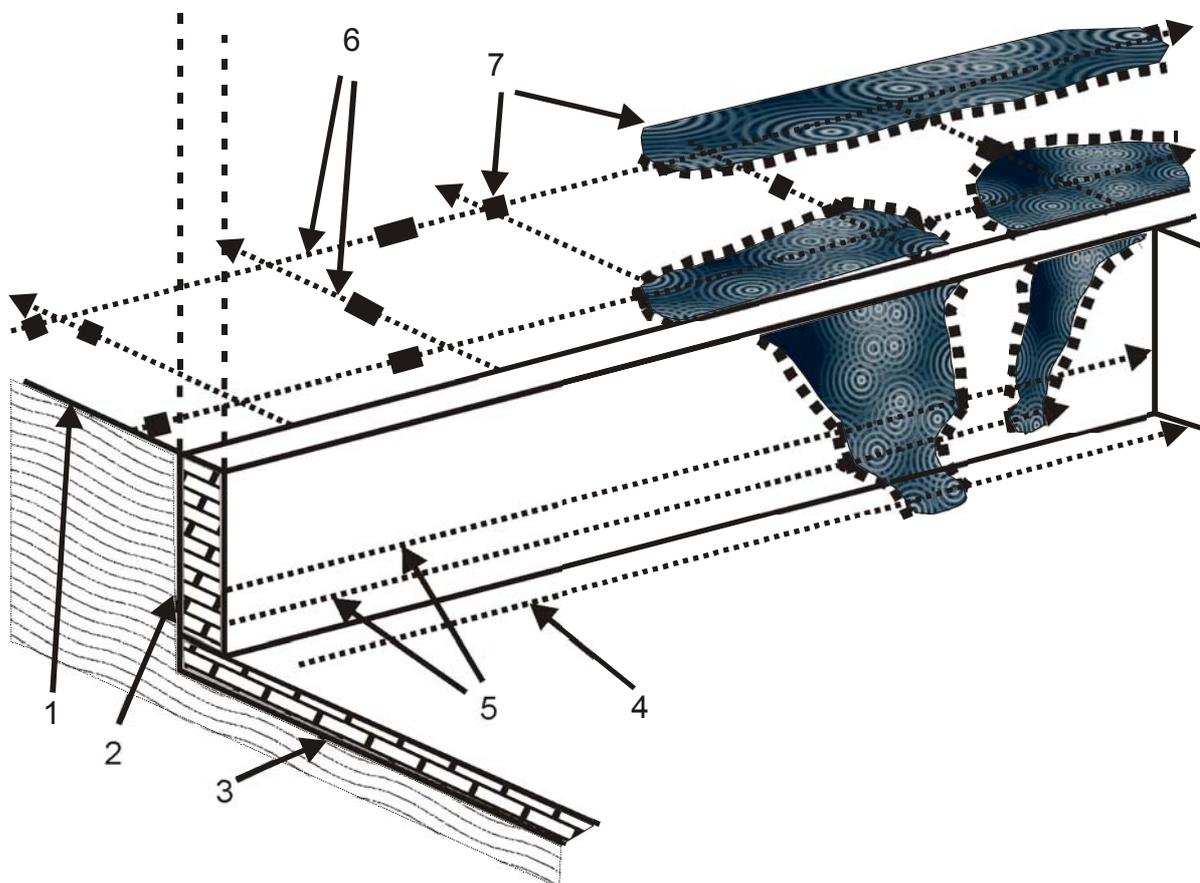


Рис. 15.10. Схема расположения георадиолокационных профилей и зон локального увлажнения. Цель исследований – выяснение причин протечек и разрушения стены здания. Работы выполнялись с антеннами 300 МГц на улице и 1 ГГц в помещении.

1 – дневная поверхность (асфальт); 2 – стена подвала; 3 – пол подвала (глубина подвала 6 метров); 4, 5, 6 – георадиолокационные профили: 4-по полу вдоль стены, 5-по стене в подвале, 6-на улице по асфальту вдоль и поперек стены здания; 7 – зоны локального увлажнения.

На асфальте визуально выделяются просадки, которые в плане совпадают с зонами локального увлажнения, что свидетельствует о развитии здесь процессов суффозии. Вскрытие облицовки стены в подвале в местах увлажнения показало значительные нарушения сплошности стены (наличие каверн и местами разрушение бетона). Из-за постоянного замачивания наружной стены подвала прочность бетона по данным неразрушающего метода контроля снижена по сравнению с проектной на 30-40%. На рис. 15.11 показан фрагмент георадиолокационного профиля по стене через зону увлажнения.

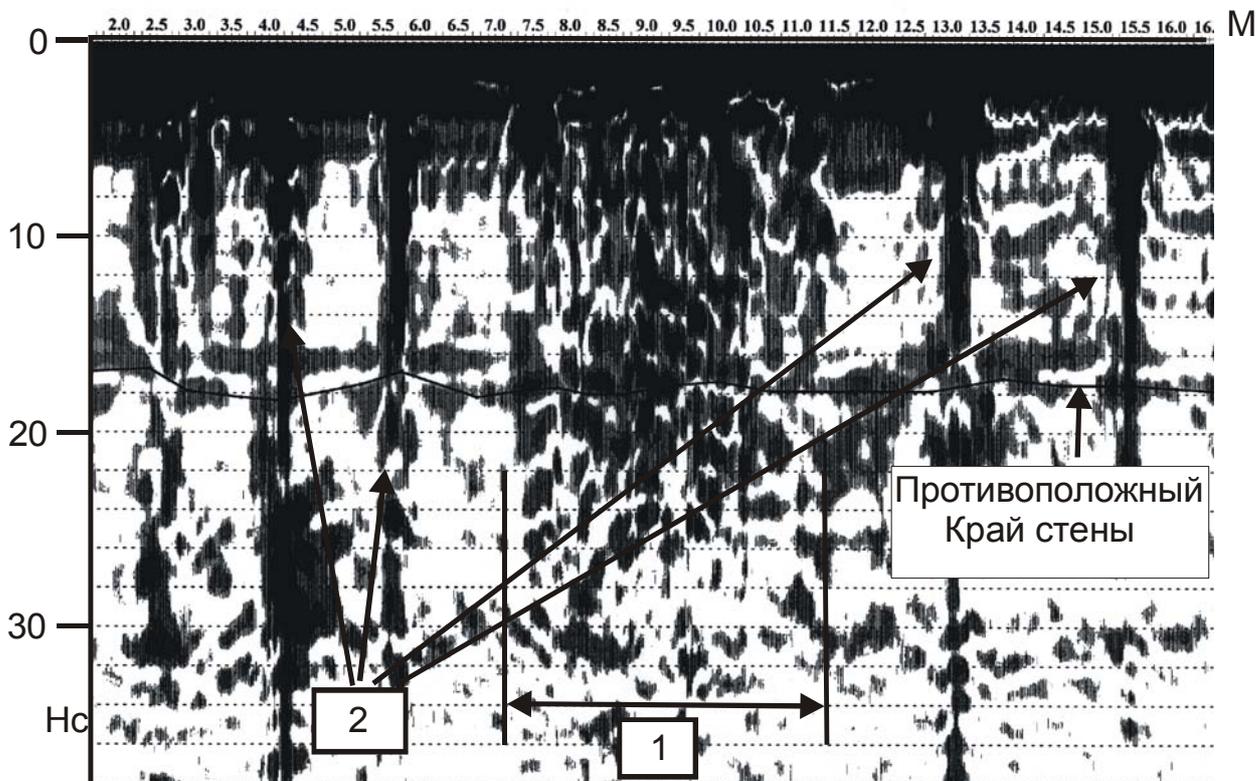


Рис. 15.11. Фрагмент георадиолокационного профиля по стене в подвале после преобразования Гильберта (см. рис. 10.10). Использовалась антенна 1 ГГц. Зона повышенного увлажнения выделяется по резкому усилению амплитуды отражений (1). Цифрой 2 показаны элементы конструкции стены (металлические балки ?).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы данного учебного пособия выражают надежду, что оно будет полезным для студентов и магистрантов, осваивающих еще один геофизический метод изучения окружающей среды, и специалистов-геофизиков широкого профиля, желающих добавить в свой арсенал еще один действенный и перспективный инструмент.

Необходимо отметить, что кроме описания основных теоретических положений и приемов применения их в практике георадиолокации, в пособие включены и некоторые дискуссионные вопросы. Сюда относятся примеры использования георадиолокации для определения глубины свай, картирования зон повышенной влажности по появлению интенсивных низкочастотных волн и картирование зон углеводородных загрязнений. По этим вопросам существуют разные предположения, которые, на наш взгляд, в настоящее время трудно формализовать и объяснить. Например, характерную «звенящую запись» над или вблизи свай можно пытаться объяснить образованием неких аналогов акустических «ползучих» волн, низкочастотные интенсивные аномалии на водонасыщенных участках дисперсных сред – детектированием сигнала, отсутствие ожидаемого контраста проводимости и диэлектрической проницаемости на границе углеводородного загрязнения – результатами некоторых химических реакций и т. д. Однако, все эти явления нуждаются в дальнейшем тщательном изучении и объяснении.

Авторы выражают надежду, что вдумчивый и заинтересованный читатель останется недовольным нынешним состоянием тех или иных аспектов метода, и это подвигнет его на собственные исследования и разработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анур А., Старовойтов А.В., Владов М.Л. Опыт применения георадиолокации для выявления зон развития провалов в городе. Вестник МГУ, сер. Геология, 1999, с. 55-57.
2. Василенко Е.В., Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я., Наварро Ф.Х., Токарев М.Ю., Калашников А.Ю., Мирошниченко Д.Е., Резников Д.Е. Радиофизические исследования ледника Альдегонда на Шпицбергене в 1999 году. Матер. гляциолог. исслед., вып. 90, с. 86-99.
3. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Георадиолокационные исследования верхней части разреза. 2002, Изд-во МГУ, с. 91.
4. Ефимова Н.Н. Применение георадиолокации при решении задач инженерной геофизики. Автореферат дисс. канд. техн. наук, 1999, СПб, с.16.
5. Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны. 1999, Изд-во МГУ, с. 244.
6. Калинин А.В., Владов М.Л., Старовойтов А.В., Шалаева Н.В. Высокоразрешающие волновые методы в современной геофизике. Разведка и охрана недр, 2002, № 1, с. 23-27.
7. Калинин А.В., Владов М.Л., Шалаева Н.В. Оценка глубинности георадиолокационных исследований на основе классической теории. Вестник МГУ, сер.Геология, № 3, 2003
8. Москва. Геология и город. Под ред. В.И. Осипова и О.П. Медведева, М., 1997, с. 400.
9. Омеляненко А.В. Георадиолокация мерзлых рыхлых отложений. Автореферат дисс. канд. техн. наук, М., 1989, с. 17.
10. Рекомендации по определению физико-механических свойств мерзлых дисперсных грунтов геофизическими методами. ПНИИИС Госстроя СССР, 1989, М., с. 55.
11. Сейсмическая стратиграфия. Под ред. Ч.Пейтона., 1982, т. 1, М., «Мир», с. 373.
- 12.Сергеев Е.М., Голодковская Г.А., Зиангиров Р.С., Осипов В.И., Трофимов В.Т. Грунтоведение. 1971, Изд-во МГУ, с. 596.
13. Старовойтов А.В., Владов М.Л. Интерпретация данных георадиолокационных наблюдений. Разведка и охрана недр, 2001, № 3, с. 11-14.
14. Талалов А.Д., Даев Д.С. О структурном механизме частотной дисперсии электрических свойств гетерогенных горных пород. Физика Земли, № 8, 1996, с. 56 – 66.
15. Финкельштейн М.И., Мендельсон В.А., Кутев В.А. Радиолокация слоистых земных покровов. М., Сов. Радио, 1977, 176 с.
16. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. М., Недра, 1986, 128 с.
17. Финкельштейн М.И., Карпухин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н.

- Подповерхностная радиолокация. М., Радио и Связь, 1994, 216 с.
18. Фролов В.Т. Литология. 1995, Изд-во МГУ, т.3, с. 352.
 19. Хаттон и др. Обработка сейсмических данных. М., Мир, 1990.
Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка. 1 и 2 том. М., Мир, 1987.
 20. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Фролов А.Д., 1998, Пушино, с. 514.
 21. Annan A.P., Davis J.L. Impuls radar sounding in permafrost. Radio Science, 1976, vol. 11, № 4, pp. 383-394.
 22. Arcone S.A., Lawson D.E., Delaney A.J., Strasser J.C., Strasser J.D. Ground-penetrating radar reflection profiling of groundwater and bedrock in an area of discontinuous permafrost. Geophysics, 1998, vol. 63, № 5, p. 1573-1585.
 23. Beres M., Haggenger P., Green A.G., Horstmeyer H. Using two- and three-dimensional georadar methods to characterize glaciofluvial architecture. Sedimentary Geology, 1999, vol. 129, p. 1-24.
 24. Brewster M.L., Annan A.P. Ground-penetrating radar monitoring of a controlled DNAPL release: 200 MHz radar. Geophysics, 1994, vol. 59, № 8, p. 1211-1221.
 25. Casas A., Lazaro R., Vilas M., Busquet E. Detecting karstic cavities with ground penetrating Radar at different geological environments in Spain. 1996, 6th International conference on Ground Penetrating Radar (GPR'96), p. 455-460.
 26. Davis J.L., Annan A.P. Ground-penetrating Radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysical Prospecting, 1989, 37, p. 531-551.
 27. Davis J.L., Killey R.W.D., Annan A.P., Vanghan C. Surface and Borehole Ground-Penetrating Radar Surveys for Mapping Geological Structure. NWWA/EPA, conf., 1984, San-Antonio, Texas, Feb.7-9, pp.681-712.
 28. Jol H.M., Young R., Fisher T.G., Smith D.G., Meyers R.A. Ground penetrating radar of eskers, kame terraces, and moraines: Alberta and Saskatchewan, Canada. 1996, 6th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR'96), Sendai, Japan, p. 439-443.
 29. Jol H.M., Junck M.B., Kaminsky G.M. High resolution ground penetrating radar imaging (225-900 MHz) of geomorphic and geologic setting: examples from Utah, Washington and Wisconsin. 2002., Proceedings of the Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR'2002).
 30. Hoekstra P., Deloney A. Dielectric properties of soil at UHF and microwave frequencies. Journal of Geophysical Research, v.79, N11, 1974, pp.1699-1708.
 31. Houck R.T. Measuring Moisture Content Profiles Using Ground-Penetrating Radar. NWWA/EPA conf. 1984, San-Antonio, Texas, Feb. 7-9, pp.637-653.
 32. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. « The Rock Physics Handbook», Cambridge University Press, 1998

33. Rea J., Knight R. The use of Ground Penetrating Radar for aquifer characterization: an example from southwestern British Columbia. Proc. of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, 1995, Orlando, Florida, p. 279-288.
34. Van Overmeeren R.A. Radar facies in unconsolidated sediments in the Netherlands – a radar stratigraphy. J. Appl. Geophys. Special issue, 1998, 40, p. 1-40.

Учебное издание

Владов Михаил Львович
Старовойтов Анатолий Васильевич

Введение в георадиолокацию

ЛР № 040414 от 18.04.1997. Подписано в печать 18.03.2004. Формат 60х90/16
Бумага офс. №1. Офсетная печать. Усл. печ. л. 9.6. Тираж 200 экз.

Ордена «Знак Почета» Издательство Московского университета.
125009, г. Москва, ул. Б. Никитская, 5/7.

Отдел печати Геологического факультета МГУ
119899, Москва, Ленинские горы

