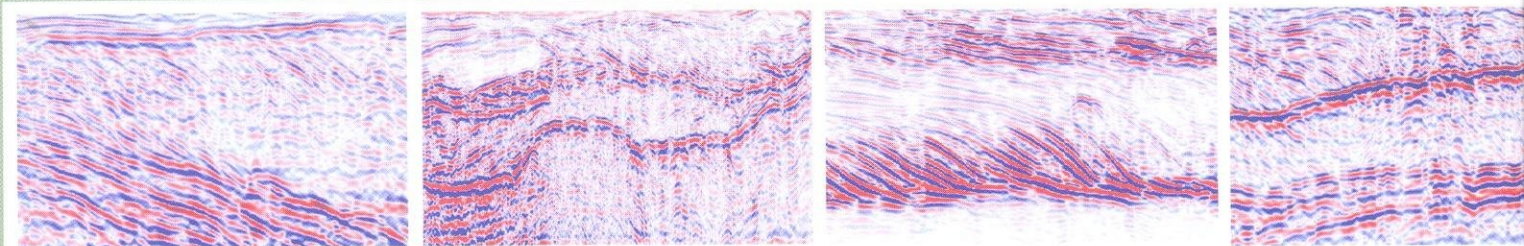


А.В. Старовойтов



ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ



МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА СЕЙСМОМЕТРИИ
И ГЕОАКУСТИКИ

А.В. Старовойтов

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Рекомендовано УМС по геологии
УМО по классическому университетскому образованию
в качестве учебного пособия для студентов,
обучающихся по специальности 011200 «Геофизика»

Издательство
Московского университета
2008

УДК 550.837.2:621.396.6

ББК 26.2

С 57

Рецензенты:

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

доктор геол.-мин. наук Ю.Д. Зыков

Старовойтов А.В.

С 57 Интерпретация георадиолокационных данных.

Учебное пособие – М.: Издательство МГУ, 2008. – 192 с.

ISBN 978-5-211-05541-4

*В оформлении обложки использованы изображения,
предоставленные Ю.П. Кропачевым, ВСЕГЕИ*

В пособии рассмотрены основные принципы методики интерпретации георадиолокационных данных. На многочисленных примерах показаны возможности георадиолокации при решении разнообразных инженерно-геологических и геотехнических задач.

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

*Печатается по решению Ученого совета геологического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова*

УДК 550.837.2:621.396.6
ББК 26.2

ISBN 978-5-211-05541-4

© Старовойтов А.В., 2008

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
ВВЕДЕНИЕ	15
ЧАСТЬ I. Методика интерпретации георадиолокационных данных	18
Глава 1. Некоторые характеристики записи	21
1.1. Изменение диэлектрической проницаемости (ϵ)	21
1.2. Вертикальная и горизонтальная разрешающая способность	22
1.3. Искажение формы границ на временных разрезах	23
1.4. Соотношение горизонтального и вертикального масштабов на георадиолокационных разрезах	26
Глава 2. Выделение волн-помех	28
2.1. Воздушные волны-помехи	28
2.2. Волны-помехи второго типа (кратные и неполнократные)	30
Глава 3. Выделение георадарных комплексов	35
Глава 4. Выделение георадарных фаций	42
Глава 5. Геологическая привязка георадарных комплексов и фаций	49
5.1. Определение скоростей распространения электромагнитных волн	49
5.2. Геологическая привязка георадиолокационных данных	52
ЧАСТЬ II. Примеры использования георадиолокационных данных при решении различных задач	55
Глава 6. Поиск объектов искусственного и естественного происхождения	56
Глава 7. Гидрогеологические исследования	67
Глава 8. Геологические исследования	77
Глава 9. Исследования в районах развития многолетнемерзлых пород	90
Глава 10. Исследования на пресноводных акваториях	100
Глава 11. Обследование железнодорожных насыпей	122
Глава 12. Исследования полотна автомобильных дорог и взлетно- посадочных полос аэродромов	145
12.1. Исследование полотна автомобильных дорог	146
12.2. Исследование взлетно-посадочных полос аэродромов	151
Глава 13. Использование георадиолокации в строительстве и реставрации	158
13.1. Изучение конструкций	159
13.2. Изучение причин деформаций различных сооружений	176
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	183
ЛИТЕРАТУРА	184

ПРЕДИСЛОВИЕ

Интерес к использованию подповерхностного радиолокационного зондирования (Ground Penetrating Radar, в дальнейшем GPR), судя по кругу работ, за последние 30 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 десять лет 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, EAGE и других организаций посвящены радарным исследованиям верхней части разреза.

Бурно развивается аппаратная база. Кроме георадаров широкого спектра использования, выпускается и специализированная аппаратура для узких целей — работы в скважинах, шахтах, для дефектоскопии конструкций, работе на автомобильных и железных дорогах, с различных движущихся средств от наземных до авиационных.

Активно происходит внедрение георадиолокационных исследований в практику инженерно-геологических изысканий на разных стадиях проектирования и строительства, в практику мониторинга сооружений и их оснований, в практику геоэкологических и археологических исследований.

Только начинается, но представляется весьма перспективным внедрение георадиолокационного метода исследований в службы транспортных систем — автодорог, железных дорог и трубопроводов различного назначения.

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 талыми грунтами, между коренными и осадочными породами и т.д.

При этом георадиолокация развивается не на «пустом месте».

ГЕОРАДИОЛОКАЦИЯ И СЕЙСМОРАЗВЕДКА — ВОЛНОВЫЕ МЕТОДЫ ГЕОФИЗИКИ

К собственно волновым методам в современной геофизике относятся сейсморазведка, подповерхностная георадиолокация и радиоволновые просвечивания. 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 (МОВ) 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 А представлен результат сейсмических наблюдений над слоистой средой, а на рисунке Б — 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.

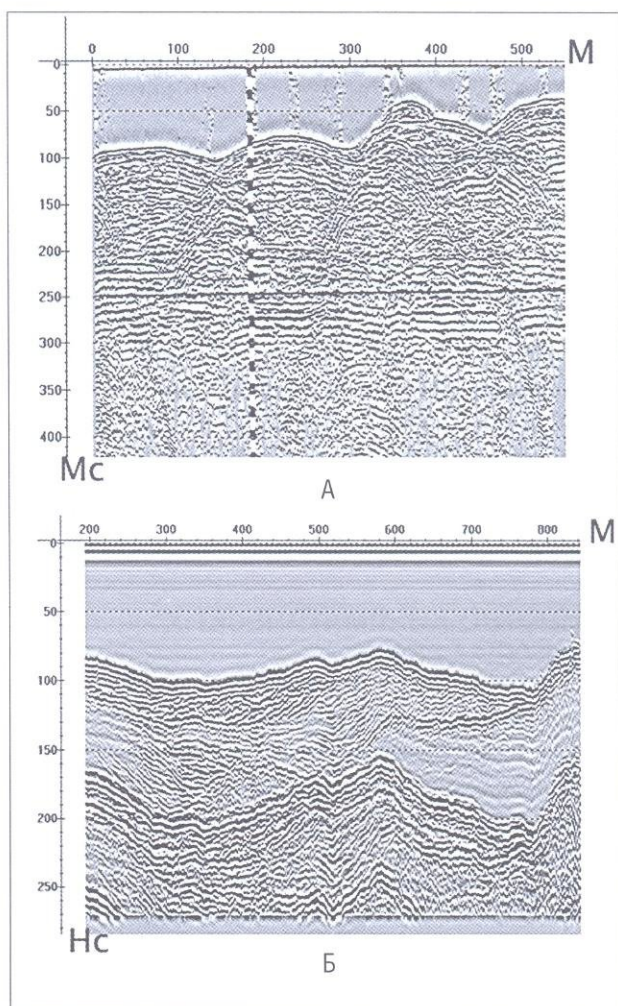
РЕШЕНИЕ ПРЯМЫХ ЗАДАЧ

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:

Типичные примеры полевых данных при работе на акваториях:

- А — методом непрерывного сейсмоакустического профилирования;
Б — методом георадиолокации



$S(j\omega) = S_0(j\omega) * K(j\omega)$, 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.

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 георадиолокации 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 сейсмостратиграфический подход к интерпретации результатов обработки полевых данных успешно применяется и в георадиолокации.

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:

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

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 способность границ определяется 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 $0,0000001 \text{ г/см}^3$, для воды 1500 м/с и 1 г/см^3 , а для твердой компоненты лежат в широких пределах 3000–7000 м/с и $2,6\text{--}3,8 \text{ г/см}^3$ 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 5–15 см/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.

Таким образом, несмотря на то, что метод подповерхностной георадиолокации является технологически новым, при проектировании методики работ, обработке и интерпретации результатов используются подхо-

ды, приемы и адаптированные соответствующим образом программные средства современной сейсморазведки, где область обработки данных является наиболее развитой и развивающейся дальше.

СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

Современные системы обработки георадиолокационных данных в подавляющем большинстве своем базируются на представлениях, почерпнутых из сейсморазведки. Это справедливо, если вспомнить о единстве структуры данных и представлений о распространении волн в реальной среде (см. выше).

Это обстоятельство определило и общность архитектуры систем обработки производства различных фирм, как правило, производящих аппаратуру для георадиолокации. Кроме того, общность задач, решаемых с помощью георадиолокации, определяет и функциональную общность построения и параметризации процедур, наполняющих блоки обработки в разных системах.

Основными общими чертами разных систем обработки являются:

- наличие подразделов предварительной обработки и глубокой обработки;
- возможность ведения протокола обработки с возможностью возврата и продвижения вперед по списку процедур;
- вынос ряда преобразований из списка процедур в разряд «инструментов» с соответствующей панелью на экране компьютера;
- почти повторяющие друг друга списки процедур, в основе которых лежат одинаковые алгоритмы, и наличие «инструментов»;
- наличие блоков трехмерной обработки и представления результатов георадиолокационной съемки.

Ниже, в качестве примера, приводится список обрабатывающих процедур для системы «**RADEXPLORER**»:

Основные возможности программы:

- Автоматический выбор оптимальных параметров обработки в зависимости от параметров записи.
- Интерактивное построение потоков обработки с возможностью сохранения их на диске для последующего использования.
- Возможность отмены примененных операций (*undo*) с неограниченным числом шагов.
- Возможность интерактивного определения скоростей слоев и глубин залегания локальных объектов.

- Корреляция отражений (пикирование) с сохранением полученных пикировок в табличный текстовый файл.
- Удобный редактор модели среды.

Обрабатывающие процедуры:

- Удаление постоянной составляющей.
- Смещение нуля времени.
- Редакция трасс.
- Пространственная интерполяция.
- Подавление «звона» антенны.
- Двумерная фильтрация.
- Коррекция амплитуд.
- Предсказывающая деконволюция.
- Полосовая фильтрация.
- F–K Миграция Столта.
- Мгновенная амплитуда (преобразование Гильберта).
- Учет рельефа.

Приложение **3D Gazer** — инструмент трехмерной визуализации георадарных данных, обработанных в программе RadExplorer.

Эффектная 3D визуализация позволяет получить лучшее представление о строении изучаемого объекта.

Предусмотрена возможность прослеживания линейных объектов: труб, кабелей и других коммуникаций.

В режиме частичной прозрачности отображаются только высокоамплитудные участки профилей. Теперь ничего не мешает сконцентрироваться на главном!

Поверх радарограмм вы можете отобразить полупрозрачную схему съемки или план помещения, в котором проводились работы.

Основные отличия систем обработки данных георадиолокации касаются, как правило, трех аспектов.

Во-первых, это лояльность системы к пользователю, не имеющему высокой квалификации в области обработки данных — «заготовки» параметров преобразования полевых записей на основе опыта производителей системы, обучающие элементы системы, помощь и подробные подсказки.

Во-вторых, это уровень автоматизации отдельных процедур вроде корреляции отражений, анализа гиперболических осей синфазности и т.д. и/или автоматизированного выполнения части или всего заранее созданного протокола обработки.

В-третьих, это возможности и формы представления результата обработки — построение двумерных и трехмерных образов исследуемой среды с учетом априорной информации (скважин, результатов других исследований и т.д.) и данных георадиолокации.

Представляется, что после знакомства с описанием ряда систем разных производителей, пользователь сможет выбрать наиболее подходящую, опираясь на свои требования и вышеприведенный анализ.

Задачей обработки является подготовка георадиолокационных записей к процессу интерпретации, которому и посвящена данная книга.

Что следует понимать под словами «подготовка георадиолокационных записей»?

Во-первых, извлечение **количественной (численной) информации о геометрии объекта** на разрезе в масштабе времени — где по профилю наблюдения и на каких временах расположены объекты, дающие отражения, дифракцию или какое время потребовалось для прохождения волны от источника к приемнику, а также при наличии дифрагированных волн — **значений скоростей распространения волн** от линии наблюдения до объекта.

Во-вторых, приготовление разреза (двумерной информации) в масштабе времени или куба данных в масштабе времени (трехмерной информации) в одном или нескольких видах (различные процедуры или графы обработки), максимально наглядных для **качественного выделения и анализа образов изучаемого объекта** в поле электромагнитных волн.

Очевидно, что энергия полезных волн, их частотный состав, их отношения к подобным характеристикам волн-помех и шуму имеют первостепенное значение при подготовке георадиолокационных записей для дальнейшей успешной интерпретации. Однако, при интерпретации практически не используются непосредственно **количественные динамические характеристики георадиолокационной записи**.

Необходимо отметить, что в сейсморазведке и, соответственно, в обрабатывающих системах сейсмики уже используются количественные динамические характеристики сейсмических записей для **количественного описания свойств пород**, например, параметра поглощения сейсмической энергии, анализа отражающих свойств границ и т.д. Добытая таким образом информация успешно используется при дальнейшей интерпретации.

Причинами такого отставания георадиолокации от сейсморазведки как раз и являются их различия в физической природе полей, «молодость» георадиолокации — ничтожные в сравнении с сейсморазведкой объемы добытой и проанализированной информации, практическое отсутствие базы для лабораторных исследований и как следствие отсутствие сопоставимого с сейсморазведкой банка данных о выражении свойств реальных сред в поле электромагнитных волн. Сюда же следует отнести и отсутствие развитой основы для математического моделирования высокочастотных электромагнитных полей в моделях реальных сред.

В этих условиях представляется чрезвычайно важным осмысленное накопление фактов и их анализ с целью извлечения информации, чему и посвящена эта книга.

В отличие от некоторых изданий (учебных пособий) предшествующих данной книге, (например, Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. 2005, Изд-во МГУ, с. 153.) здесь отсутствуют разделы, посвященные рассмотрению физических основ георадиолокации и описанию собственно приемов обработки — функций, процедур и примерных графов.

Основной причиной написания книги по интерпретации георадиолокационных данных является отрадный факт быстрого и широкого вне-

дрения этого метода в нашу жизнь. Даже на современном, относительно, например, сейсморазведки невысоком уровне понимания физических основ и развития обработки необходимо уметь решать прикладные задачи с помощью вот такого несовершенного, но обладающего массой достоинств метода исследований.

С другой стороны, среди многочисленных пользователей георадиолокации из разных областей науки и народного хозяйства с физическими основами волновых методов и приемами обработки получаемой информации более или менее основательно знакомятся только геофизики с соответствующей подготовкой в процессе своего образования.

В тоже время, геологу, инженерному геологу, экологу, археологу, строителю, представителям эксплуатационных транспортных служб уже довольно широко и успешно применяющим георадиолокационные исследования в своей практике подробное изложение физических основ и принципов обработки вряд ли необходимо для работы.

Сомнение вызывает и то, что последовательное изложение основ будет понятно без соответствующей подготовки, а краткое популярное — просто ненужно, поскольку по прочтении будет немедленно забыто или, что хуже, создаст иллюзию простоты и безграничных возможностей метода георадиолокации. Тем более, что об этом при необходимости можно прочитать в специальных изданиях, например, [7, 25, 26, 27, 30, 18 и др.] и (или) на сайтах компаний-производителей и продавцов георадаров при описаниях систем обработки, например, www.geotech.ru, www.radsys.lv и производителей обрабатывающих систем, например, www.radexpro.ru.

*Заведующий кафедрой сейсмометрии и геоакустики
Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук М.Л. ВЛАДОВ*

ВВЕДЕНИЕ

Это учебное пособие представляет собой переработанные и значительно дополненные 2 и 3 части пособия по курсу георадиолокационных исследований приповерхностной части разреза, изданного в 2005 году (Владов М.Л., Старовойтов А.В. «Введение в георадиолокацию». Изд-во МГУ).

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

Интенсивно развивается отечественное производство георадаров, значительно расширился круг организаций, активно применяющих этот метод для решения своих конкретных задач. Вместе с тем практически отсутствуют общедоступные публикации об интерпретации георадиолокационных данных. Как правило, специалисты, применяющие этот метод в производственных целях и занимающиеся решением своих узкоспециализированных задач, довольно поверхностно знакомы с другими областями применения георадиолокации. Поэтому представляется важным познакомить не только студентов и аспирантов с практическим использованием данных подповерхностной георадиолокации, но и продемонстрировать различные области применения результатов этого метода и показать его основные возможности. Автор надеется, что данное пособие хотя бы частично восполнит этот пробел. В него добавлены новые главы об использовании георадиолокации при обследовании железнодорожных насыпей, автомобильных дорог и взлетно-посадочных полос аэродромов и значительно расширены главы о георадиолокационных исследованиях на пресноводных акваториях, в условиях развития многолетнемерзлых пород и в строительстве.

Георадиолокационный метод изучения геологической среды для нашей страны является все еще технологически новым методом. Непрерывно расширяется аппаратная база, создаются и уже используются скважинные георадары и многоканальные специализированные приборы, используемые для обследования автомобильных дорог и железнодорожных насыпей. 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 георади-

олокации 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 методикой интерпретации георадиолокационных исследований при решении широкого круга инженерно-геологических, гидрогеологических, строительных, геоэкологических и других задач, связанных с изучением строения приповерхностной части геологической среды до глубин порядка 10–15 метров. С помощью этого руководства можно получить основные представления о методике интерпретации георадиолокационных данных, полученных при обследовании не только верхней части разреза, но и разнообразных конструкций. 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 рассматриваются физические основы этого метода и вопросы по обработке, 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, магистрантов и аспирантов различных геофизических и геологических 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.

Первая часть посвящена методике интерпретации георадиолокационных данных.

Во второй 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 само-

стоятельной научной работы. Вместе с тем, автор надеется, что данное пособие будет служить также своего рода атласом примеров георадиолокационных образов различных объектов, как это имело место и в сейсморазведке. Ссылки на основные литературные источники приводятся, в основном, в начале каждого раздела.

В получении и обработке георадиолокационных материалов, использованных в данном пособии, принимали участие, кроме М.Л. Влодова и автора, ряд сотрудников кафедры сейсмометрии и геоакустики — А.Ю. Калашников, Н.В. Шалаева, А.П. Ермаков, аспирант А.Н. Ошкин, а также представители других организаций — В.П. Золотарев («Radar Systems, Inc», г. Рига, Латвия), Н.П. Семейкин (ООО «Логис»), В.В. Монахов (НПЦ «ГЕОТЕХ»), В.В. Капустин (ООО «ИнжСтройизыскания»), Н.И. Потапов и С.В. Мартынов (ГУП «Гормост») и ряд других. Всем им автор искренне признателен. При исследованиях использовались георадары серии «Зонд 12е» производства «Radar Systems, Inc» (г. Рига, Латвия), георадары «Око» (ООО «Логис») и георадар SIR-20 (GSSI). Приведенные материалы обрабатывались с помощью систем «RadExPro Plus» и «RadExplorer» («Деко-геофизика»), «GeoScan32» (НПЦ «ГЕОТЕХ»), «RADAN» (GSSI).

Автор будет благодарен за любые замечания, пожелания и критику данного пособия, направленные по адресу 119991, Российская Федерация, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, Геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, тел./факс 939-43-70, E-mail: starovoytov_msu@mail.ru.

Часть I. МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

После математической обработки георадиолокационные данные поступают к интерпретатору, хотя и на стадии обработки его участие также является весьма желательным. Наилучшие результаты достигаются в том случае, когда специалист по обработке и интерпретатор обладают достаточными знаниями для профессионального общения в области интерпретации и обработки соответственно. При решении многих задач, как правило, не связанных с решением чисто геологических задач, обработку и интерпретацию может проводить один специалист. Обработка, как правило, улучшает полученные данные, однако начинать анализ материалов все же необходимо с просмотра полевых данных. Некоторые важные особенности волновой картины в процессе обработки становятся менее заметны, о чем будет сказано в разделах, посвященных обсуждению конкретных материалов.

Георадиолокация, также как и сейсморазведка, является волновым методом [11], 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 в 80-х годах прошлого века для поиска нефтегазовых ловушек неантиклинального типа, получила название сейсмической стратиграфии [20]. Данная методика основана на анализе динамических и кинематических особенностей всей волновой картины — как сильных, так и слабых отражений. Развитие сейсмостратиграфии было обусловлено следующими факторами:

- 1. Интенсивным развитием аппаратной и методической базы, что привело к значительному улучшению качества получаемых данных;*
- 2. Совершенствованием алгоритмов и программ обработки и интерпретации;*
- 3. Накоплением данных бурения не только по суше, но и на акваториях, что позволило более качественно проводить интерпретацию сейсмических данных, используя всю волновую картину.*

Интерпретация георадиолокационных данных за последние годы проходит такой же путь развития, по которому шло и совершенствование сейсмостратиграфии. Непрерывно расширяются области применения георадиолокации. В анализ вовлекается вся волновая картина, а не только сильные отражения. Существенно увеличивается частота сканирования, модернизируются виды представления материалов.

Задачи, решаемые с помощью георадиолокации, можно объединить в четыре основные группы:

1. *Изучение геологического строения разреза;*
2. *Поиск разнообразных объектов;*
3. *Изучение различных конструкций;*
4. *Изучение физико-механических свойств отложений и объектов.*

Первая группа задач связана с детальным изучением разреза — литологии, структуры отложений, гидрогеологических особенностей и т.д. Сюда же можно отнести изучение строения полотна автомобильных дорог, железнодорожных насыпей, взлетно-посадочных полос аэродромов, работы по изучению разрезов на пресноводных акваториях и т.д.

Во вторую входят задачи по поиску или обнаружению разнообразных объектов как естественного, так и искусственного происхождения. К ним относятся трубопроводы различного назначения, кабели, коллекторы, карстовые пустоты, археологические объекты, места захоронений и т.д.

В последнее время довольно часто георадиолокация применяется при изучении различных конструкций (третья группа). В нее входит определение толщин и строения стен, фундаментов, перекрытий, привязка фундаментов на местности, восстановление проектной документации и т.д.

Четвертая группа задач связана с поиском корреляционных зависимостей между какими либо физико-механическими или инженерно-геологическими свойствами разреза или объекта с особенностями волновой картины на радарограммах. Если по первым трем группам задач (или по трем направлениям) за последние годы отмечается значительное продвижение и накоплен обширный экспериментальный материал, то в четвертой положение существенно хуже. Развитие в этом направлении, на наш взгляд, позволит резко расширить области применения георадиолокации.

Нетрудно заметить, что при решении многих задач специальные геологические знания интерпретатор практически не использует, в то время как проводить геологическое (в широком смысле) изучение разреза без специальных геологических, инженерно-геологических и гидрогеологических сведений практически невозможно. Как следует из анализа публикаций, это иногда приводит к большим ошибкам.

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 в сейсмостратиграфии получили название сейсмических седимента-

ционных комплексов, а при интерпретации данных георадиолокации — 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 интерпретации 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.

Ниже в соответствующих главах будут проанализированы примеры использования георадиолокационного метода при решении различных задач. Для удобства восприятия некоторые области применения будут выделены в отдельные разделы, хотя по типу задач они относятся к одной группе (например, изучение автомобильных дорог, железнодорожных насыпей, взлетно-посадочных полос аэродромов и т.д.).

Прежде чем перейти к главе, посвященной выделению волн-помех, необходимо напомнить о некоторых особенностях записи, которые представляются крайне важными при дальнейшем рассмотрении материала.

ГЛАВА 1. **Некоторые** **характеристики** **записи**

Перед анализом полученных данных (т.е. перед собственно интерпретацией) необходимо обсудить ряд вопросов, которые уже частично были рассмотрены ранее [3]. Эти вопросы представляются важными при обсуждении результатов георадиолокационной съемки. Основными из них являются следующие:

1.1. Изменение диэлектрической **проницаемости (ϵ)**

и соответственно скорости распространения электромагнитных волн в различных типах отложений и пород. В Главе 1 [3] приводятся данные (см. Таблицу 1.1) о значениях удельного электрического сопротивления пород постоянному току и диэлектрическая проницаемость в метровом диапазоне волн для наиболее распространенных типов пород. При интерпретации данных георадиолокации приходится сталкиваться с отложениями и искусственными материалами, в которых содержание флюида (например, воды) может существенно меняться, что приводит к резкому изменению диэлектрической проницаемости. В Таблице 1.1 показаны экспериментальные значения ϵ для некоторых материалов. Обращает на себя внимание тот факт, что незначительное изменение содержания воды в плотном песке и в почвах приводит к большим изменениям диэлектрической проницаемости, тогда как существенное изменение содержания керосина в песке (от 6% до 30%) практически никак не сказывается на из-

ТАБЛИЦА 1.1.
Значения диэлектрической проницаемости и скорости распространения электромагнитных волн для различных материалов [17]

МАТЕРИАЛ		ϵ	V (см/нс)
	Воздух	1	30
	Снег	1–2	30–21
	Асфальт	3–5	17–13
	Лед	4	15
	Бетон	4–11	15–9
Породы	Гранит (сухой)	4–7	15–11
	Песчаник (сухой)	6	12
	Сланцы	5–15	13–7
	Известняки (сухие)	4–8	15–10
	Базальты (сухие)	8–9	10
Почвы и отложения		4–30	15–5
Нефть		2,5	19
Вода (пресная и соленая)		81	3,3
Песок плотный	сухой	2,93	17
	1,5% воды	5	13
	3,0% воды	11	9
	4,5% воды	39,1	5
	6% керосина	2,89	17
	12% керосина	3,01	17
	18% керосина	3,20	16
	24% керосина	3,30	16
	30% керосина	3,59	15,8
Почвы	7,78% воды	3,95	15
	32,1% воды	7,93	10,7
	36,8% воды	21,9	6,4
Суглинок сухой		2,44	19,2

менениях ϵ . Таким образом, в песках и почвах с различным содержанием воды скорость может меняться до трех раз, что при подобных изменениях ϵ по латерали приводит к резкому изменению времен прихода отраженных волн.

Особенно сильно этот эффект сказывается на положении на временных разрезах первоначально субгоризонтальных границ — при движении от сухой части разреза к влагонасыщенной оси синфазности отраженных от этой границы волн «ныряют» и, учитывая большие искажения масштабов на радарограммах (см. часть 4 этой главы) проследить границу на таких участках часто довольно сложно.

Так, например, при горизонтальном положении отражающей границы, расположенной на глубине 3,0 метра, на сухой части разреза ($V=12$ см/нс) двойное время прихода отраженной от данной границы волны будет 50 нс. Эта же граница, если над ней находятся сильно увлажненные отложения ($V=5$ см/нс), будет находится уже на времени 120 нс (двойное время). Если переход между сухой и влагонасыщенной частью разреза довольно резкий (например, в случае протечки из трубы), то на временном разрезе будет наблюдаться структура, напоминающая «сброс».

1.2. Вертикальная и горизонтальная разрешающая способность

В Главе 4 [3] даны определения вертикальной и горизонтальной разрешающей способности. Теоретическая вертикальная разрешающая способность составляет $1/4$ – $1/2$ длины волны [32]. В Таблице 1.2 даны оценки значений вертикальной разрешающей способности для песков различной степени увлажнения и различных антенн — 50, 100 и 200 МГц.

ТАБЛИЦА 1.2.
Теоретическая оценка
вертикальной разрешающей способности
георадиолокационных исследований при
изучении осадочных отложений в типичных
обстановках осадконакопления для различных
антенн [42].

АНТЕННА	ЛИТОЛОГИЯ		
	Водонасыщенные пески ($V = 0,06$ м/нс)	Влажные пески ($V = 0,10$ м/нс)	Сухие пески ($V = 0,15$ м/нс)
50 МГц	0,3–0,6 м	0,5–1,0 м	0,75–1,5 м
100 МГц	0,15–0,30 м	0,25–0,50 м	0,375–0,75 м
200 МГц	0,075–0,15 м	0,125–0,25 м	0,1875–0,375 м

Как видно, при работах с одной и той же антенной разрешающая способность по вертикали ухудшается в сухих песках по сравнению с водонасыщенными.

Горизонтальная разрешающая способность определяется размерами первой зоны Френеля. На рисунке 1.1 показаны волновые картины от участков отражающей границы различной протяженности. При размерах объектов меньше первой зоны Френеля наблюдается только дифракционная картина. Если длина объекта (например, длина пласта) превышает несколько зон Френеля (рис. 1.1а), протяженный объект выделяется отчетливо. На этом же рисунке видно, что субгоризонтальная граница, протяженность которой равна первой зоне Френеля, лишь угадывается на разрезе. На реальных радарограммах, где будут присутствовать также шу-

РИС. 1.1. Отражение от тонкого пласта ограниченной протяженности (протяженность выражена в долях ширины первой зоны Френеля [50]).

А — разрез модели, расстояние между вертикальными прямыми равно диаметру первой зоны Френеля; Б — разрез

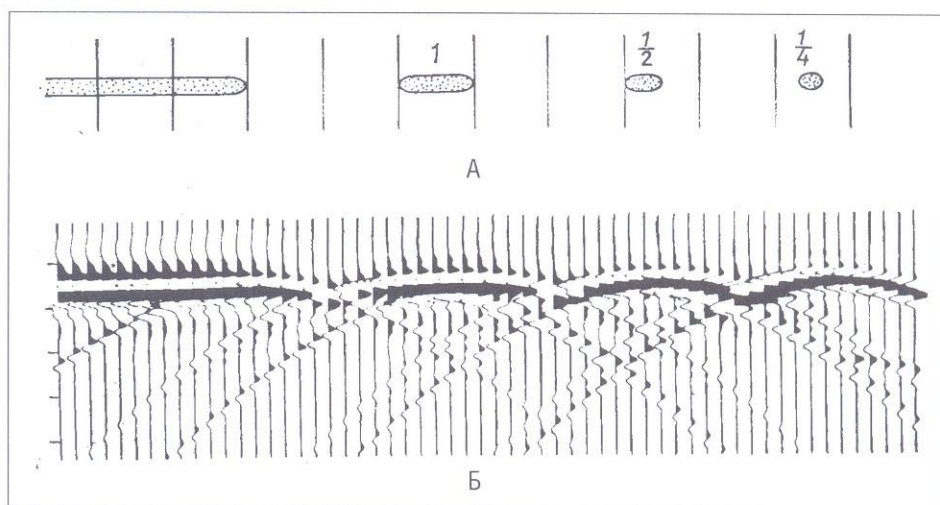


ТАБЛИЦА 1.3.
Диаметры первой зоны Френеля (в см) для частот 300, 500 и 1000 МГц, скорости 12 и 8 см/нс и глубин от 1 до 5 метров

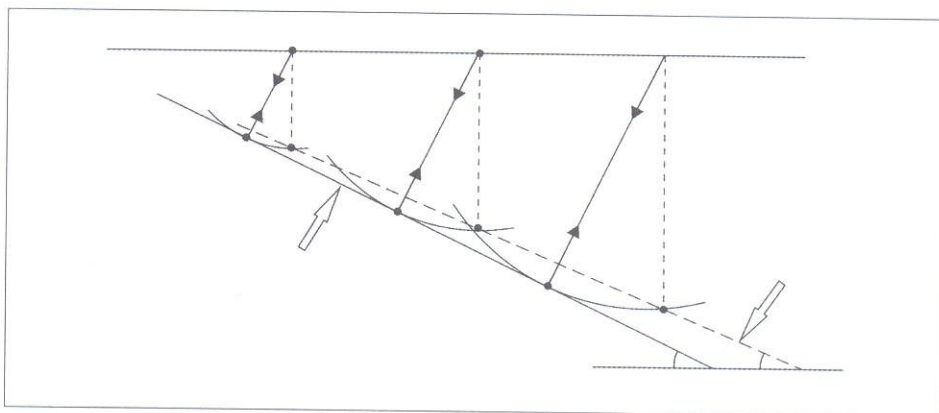
мы и другие отражающие границы (т.е. будет наблюдаться интерференция волн), определить форму границы такой протяженности практически не представляется возможным. В Таблице 1.3 показаны для сравнения размеры первой зоны Френеля, рассчитанные для нескольких частот, для глубин от 1 до 5 метров при скоростях распространения электромагнитных волн 12 и 8 см/нс.

ЧАСТОТА		300 МГц		500 МГц		1000 МГц	
СКОРОСТЬ		8 см/нс	12 см/нс	8 см/нс	12 см/нс	8 см/нс	12 см/нс
ГЛУБИНА В МЕТРАХ	1,0 м	23	28	18	22	13	15
	1,5 м	28	35	22	27	15	19
	2,0 м	33	40	25	31	18	22
	2,5 м	37	45	28	35	20	25
	3,0 м	40	49	31	38	22	27
	3,5 м	43	53	34	41	24	29
	4,0 м	47	57	36	44	25	31
	4,5 м	49	61	38	47	27	33
	5,0 м	52	64	40	49	28	35

1.3. Искажение формы границ на временных разрезах

На георадиолокационных профилях регистрируются отраженные волны. При горизонтальном расположении границ в разрезе оси синфазности отраженных от них электромагнитных волн на временных разрезах также будут расположены горизонтально. Если граница имеет отличную от горизонтальной форму, ее морфология на радарограмме может значительно отличаться от реальной. В случае наклонной границы на временном разрезе она будет находиться несколько выше, причем с увеличением глубины расхождение между реальной глубиной и глубиной, определенной по времен-

РИС. 1.2. Плоская наклонная отражающая граница (сплошная линия) и соответствующая ей поверхность на временном разрезе (пунктирная линия) [13]

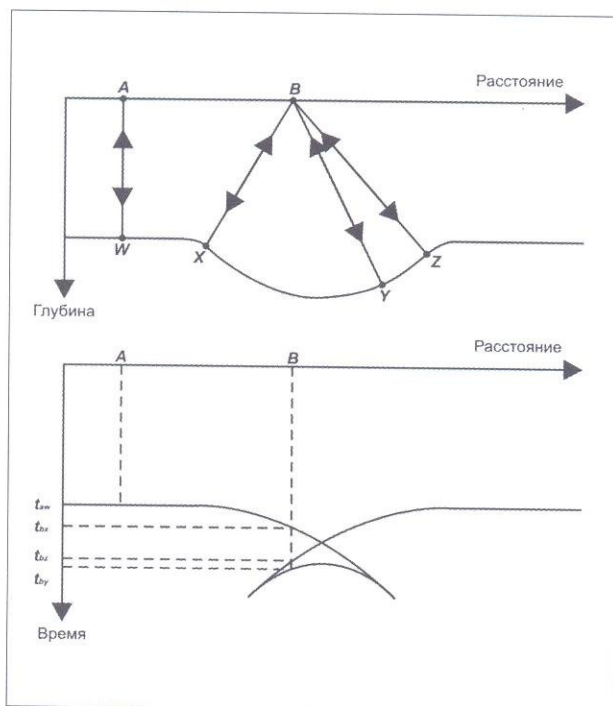


ному разрезу в точке наблюдения, будет увеличиваться (рис. 1.2). В сейсмо-разведке это явление получило название сейсмического сноса.

Форма криволинейных границ, таких, например, как отрицательные структуры, на временных разрезах также может сильно искажаться — меняется как сама форма отрицательной структуры, так и ее глубина (рис. 1.3).

РИС. 1.3. Моделирование волновой картины над отрицательной структурой:

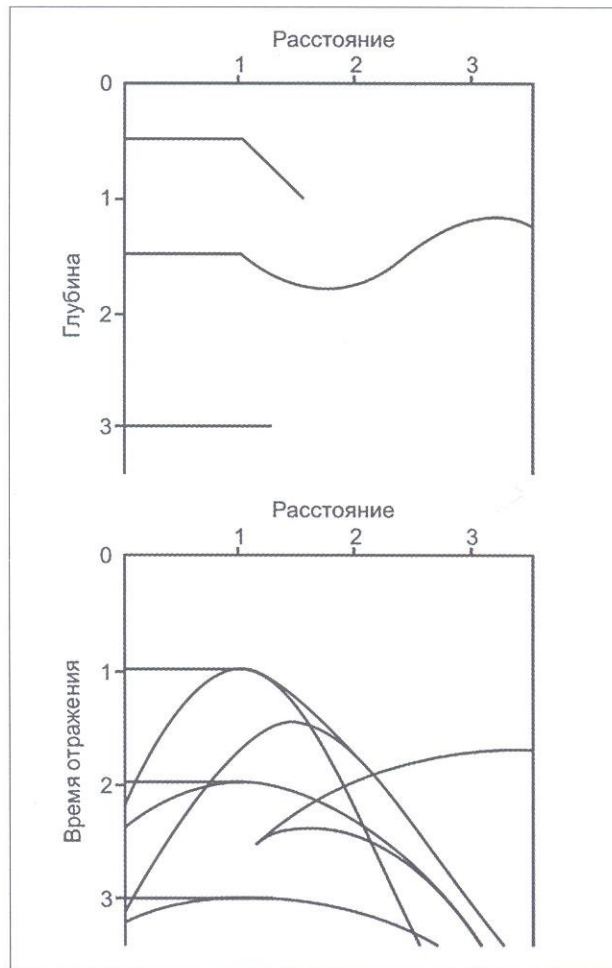
верхний рисунок — синклиналичная структура, нижний рисунок — соответствующая ей «петля» оси синфазности отраженных волн на не мигрированном разрезе [13]



Данные особенности формирования волновой картины при наличии границ сложной формы необходимо учитывать при структурном анализе георадиолокационных профилей. На рис. 1.4. представлена модель разреза и соответствующие ей оси синфазности отраженных волн, которые могли бы наблюдаться на не мигрированном разрезе. Волны-помехи (кратные и неполнократные), которые еще более усложнили бы интерпретацию, в данном случае не учитываются.

РИС. 1.4. Формирование волновой картины на структурной модели:

верхний рисунок — структурная модель геологического разреза; нижний рисунок — соответствующие оси синфазности отраженных волн на не мигрированном разрезе [54]



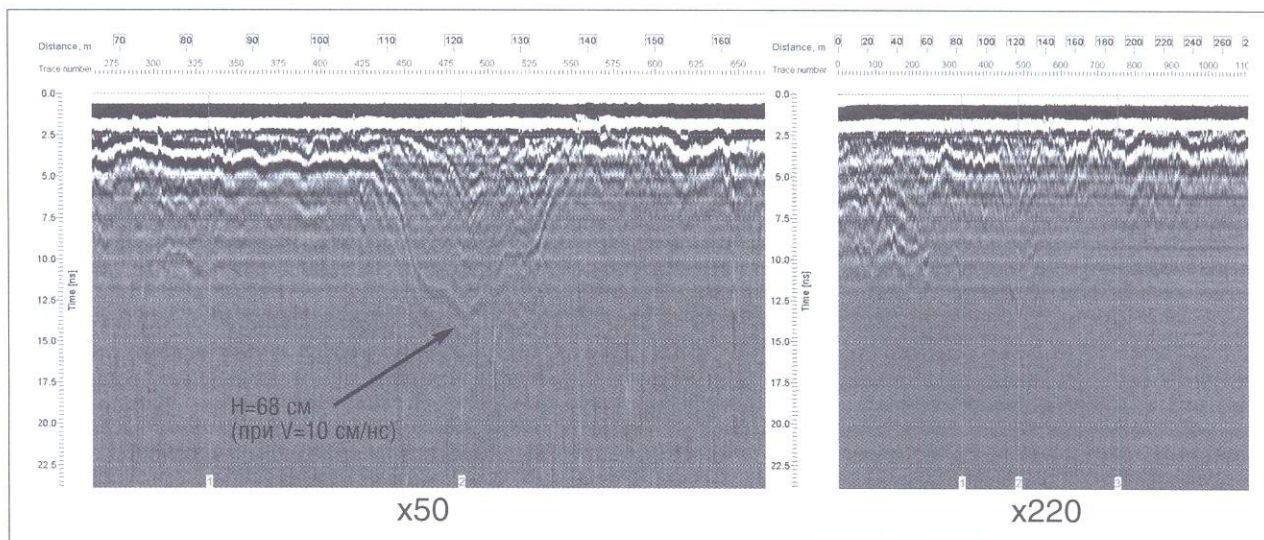
Видно, что даже без учета волн-помех, ожидаемая волновая картина будет достаточно сложной. На резких изгибах и окончаниях границ образуются дифрагированные волны, отрицательной структуре будет соответствовать «петля» оси синфазности, лишь горизонтальные участки границ будут выглядеть без изменений. Интерпретатор должен из нижней картинке восстановить верхнюю. Очевидно, что без знания основ формирования волновой картины провести интерпретацию на высоком уровне в случаях, изображенных на рис. 1.2–1.4, бывает весьма затруднительно. При решении ряда геологических задач точное знание морфологии отражающих границ имеет большое значение. К таким задачам можно отнести работы по поиску россыпных месторождений, когда необходимо знать реальную глубину палеопонижений в кровле коренных пород и их форму, чтобы правильно оценить объемы грунта и квалифицированно выбрать необходимое оборудование (например, драгу). Необходимо напомнить, что существует процедура обработки — миграция — которая в некоторых случаях позволяет достаточно хорошо восстанавливать местоположение и форму локальных объектов [30].

1.4. Соотношение горизонтального и вертикального масштабов на георадиолокационных разрезах

Георадиолокационные разрезы практически всегда выводятся с разными соотношениями горизонтального и вертикального масштабов. Это соотношение определяется масштабом съемки. При изучении протяженных объектов (полотна автомобильных дорог, железнодорожных насыпей, взлетно-посадочных полос аэродромов и т.д.) и при проведении региональных геологических исследований для удобства представления результатов приходится прибегать к выводу материалов, где соотношение масштабов достигает многих десятков и даже сотен раз. Если наклон реальных границ составляет первые градусы, то при таких соотношениях масштабов оси синфазности отраженных от них волн на радарограмме могут иметь наклон около $70\text{--}80^\circ$. При таких углах визуальное проследить оси синфазности отраженных волн на радарограмме не представляется возможным. Очевидно, что границы с большими углами также будут не видны. На рис. 1.5 дан пример радарограммы через зону просадки с различными искажениями масштабов. На левом фрагменте профиля отчетливо видна зона просадки, на правом ее практически не видно. Ширина зоны просадки около 30 метров. Чтобы не пропустить подобные ано-

РИС. 1.5. Фрагмент протяженного профиля через зону просадки полотна автомобильной дороги.

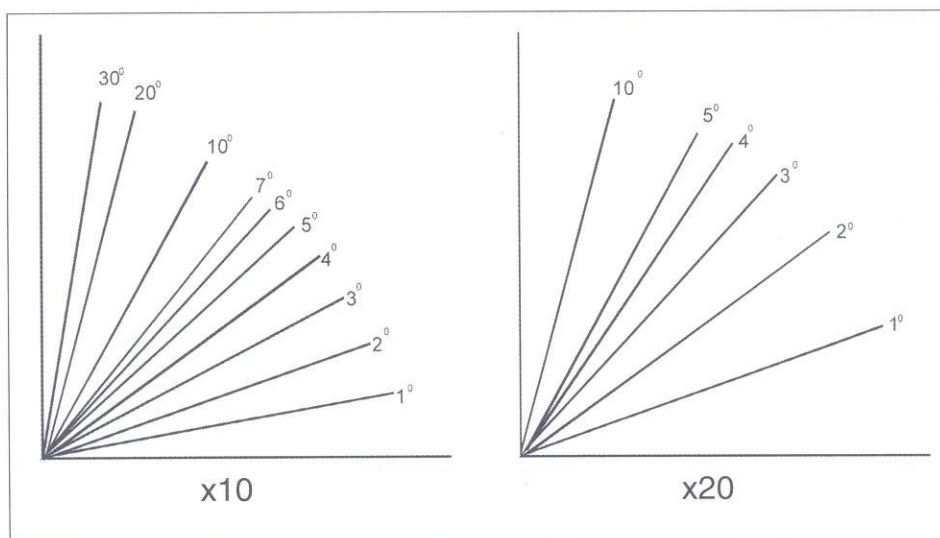
Левый фрагмент выведен с искажением масштабов 1:50, Правый — 1:220.
Материалы
А.М. Кулижникова



мальные зоны полевые данные необходимо просматривать как можно с меньшим искажением масштабов. Вместе с тем необходимо отметить, что некоторое искажение масштабов играет и положительную роль, так как помогает подчеркнуть малозаметные особенности разреза или объекта. На рис. 1.6 приведены рассчитанные углы наклона отражающих границ при небольших искажениях — 1:10 и 1:20.

На левом графике рисунка 1.6 видно, что даже при небольшом соотношении масштабов (1:10) реальные углы наклона около $10\text{--}30^\circ$ на радарограммах будут близки к вертикальным. При соотношении 1:20 угол уже в 10° будет иметь наклон около 80° .

РИС. 1.6. Искажение углов наклона отражающих границ на георадиолокационных профилях при соотношении масштабов 1:10 и 1:20



Знание приведенных выше особенностей формирования волновой картины имеет большое значение не только на стадии интерпретации, но и при выборе графа обработки.

ГЛАВА 2.

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 мелководье.

2.1. Воздушные волны-помехи

часто встречаются при работах в городских условиях, в лесу и при исследованиях внутри помещений. В последнее время большая часть антенн с частотой выше 90–100 МГц являются экранированными. Они 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 гиперболических осей синфазности, которые предположительно могут быть воздушными отражениями, необходимо оценить скорость распространения электромагнитных волн. Эта процедура входит практически во все современные программы обработки. 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 воздуш-

РИС. 2.1. 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: $16 \text{ нс} / 2 \times 30 \text{ см/нс} = 2,4 \text{ метра}$.

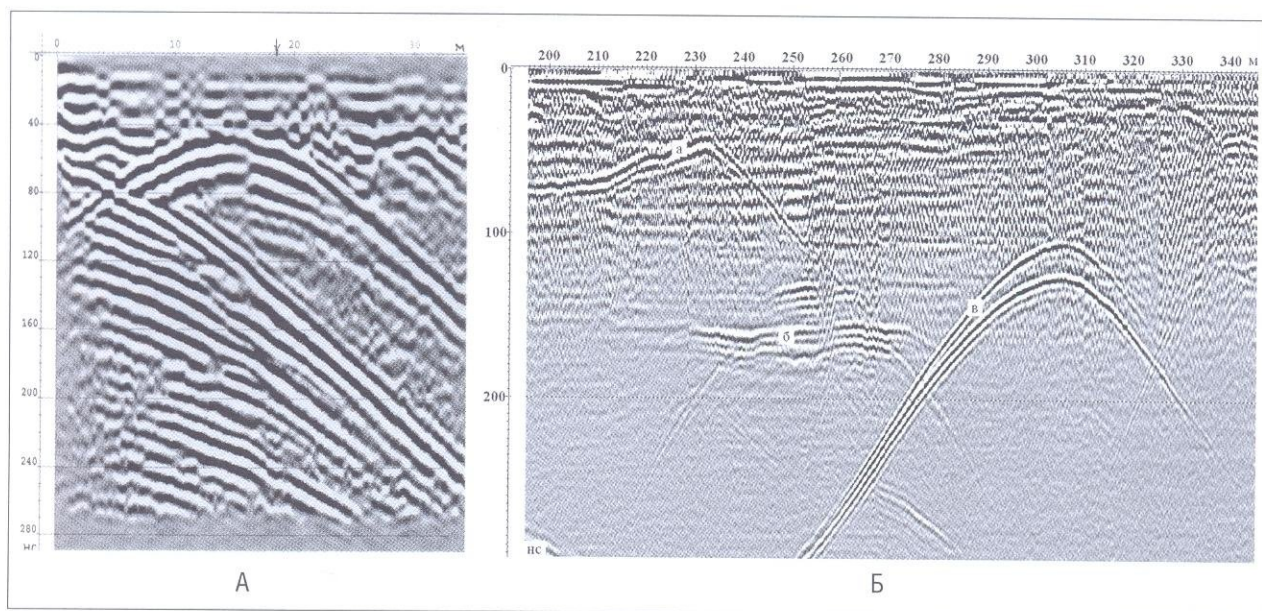
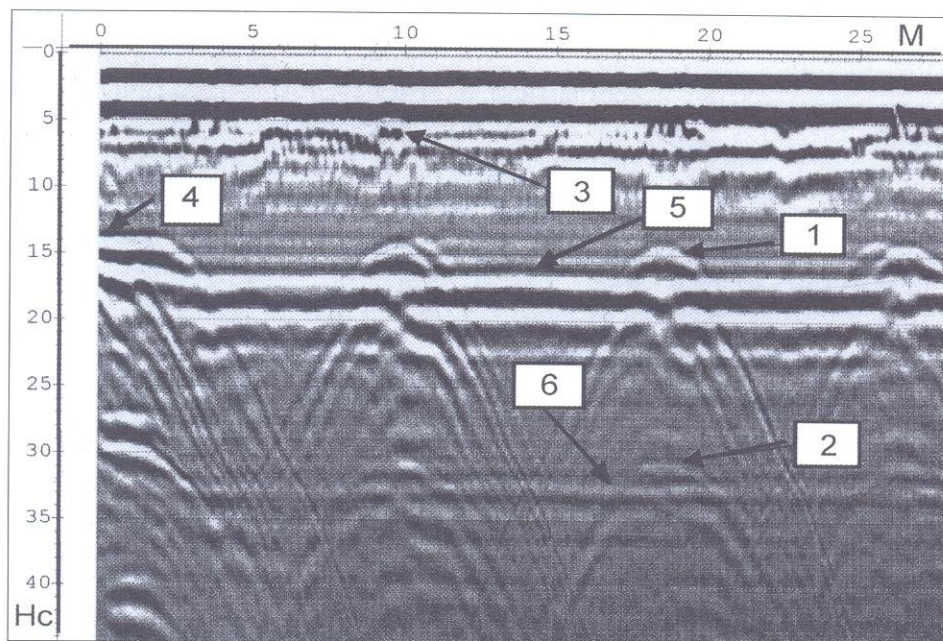


РИС. 2.2. Фрагменты радарограмм (не экранированные антенны) с различными типами воздушных волн-помех:

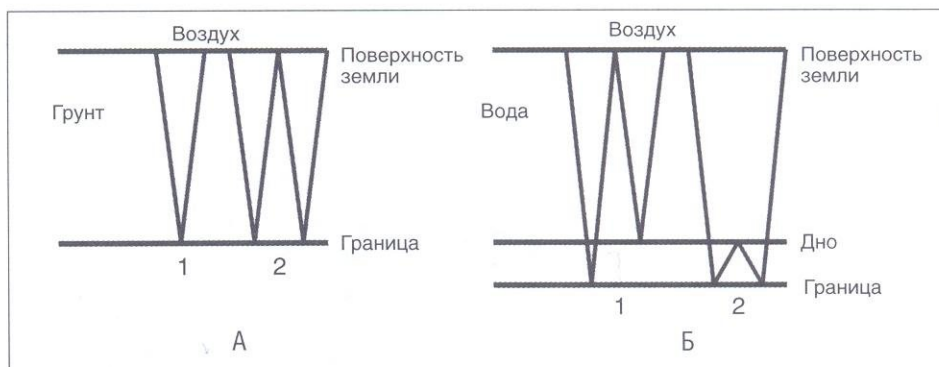
А — от объектов, находящихся в плоскости профиля (гиперболические оси синфазности — от проводов, высота которых над землей 6 метров; наклонные оси — от стены здания). Б — от объектов, находящихся сбоку от профиля: а — от металлической ограды, б — от здания, в — от металлического столба.

2.2. Волны-помехи второго типа (кратные и неполнократные)

также часто присутствуют на георадиолокационных записях, особенно при работах на реках и озерах. Для образования некоторых из них, 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. 2.3 А, Б изображены схемы кратных и неполнократных отражений, наиболее часто встречающихся при георадиолокационных наблюдениях.

РИС. 2.3. Схемы формирования наиболее часто встречающихся кратных и неполнократных волн при работах на суше (А) и воде (Б):

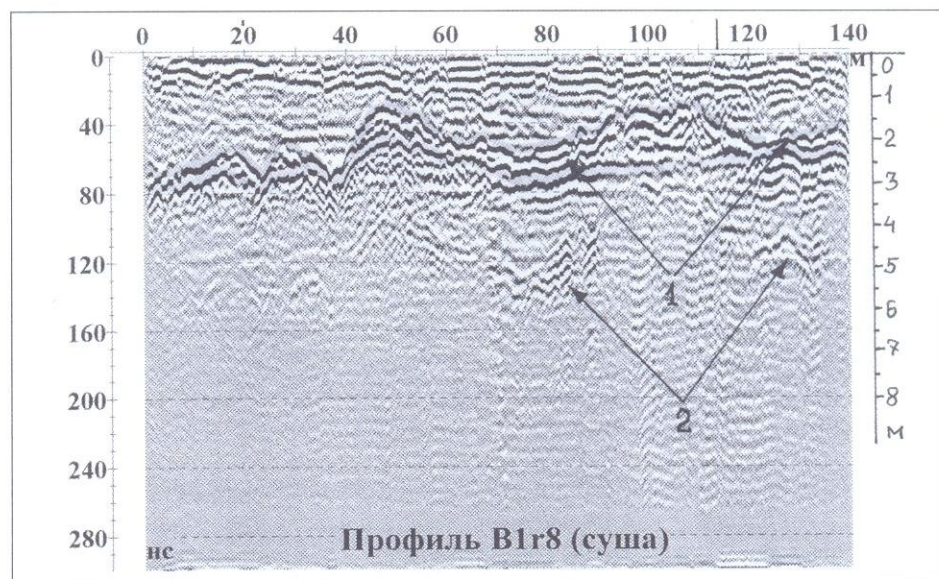
А: 1 — однократная и 2 — двухкратная волны (могут наблюдаться также 3-х, 4-х кратные и т.д.);
Б: 1 — неполнократная в водном слое и 2 — неполнократная в слое (здесь не показаны кратные отражения от дна и поддонной границы, которые также будут присутствовать)



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 отраже-

РИС. 2.4. Фрагмент радарограммы, полученной на суше. Использовалась антенна 300 МГц (экранированная):

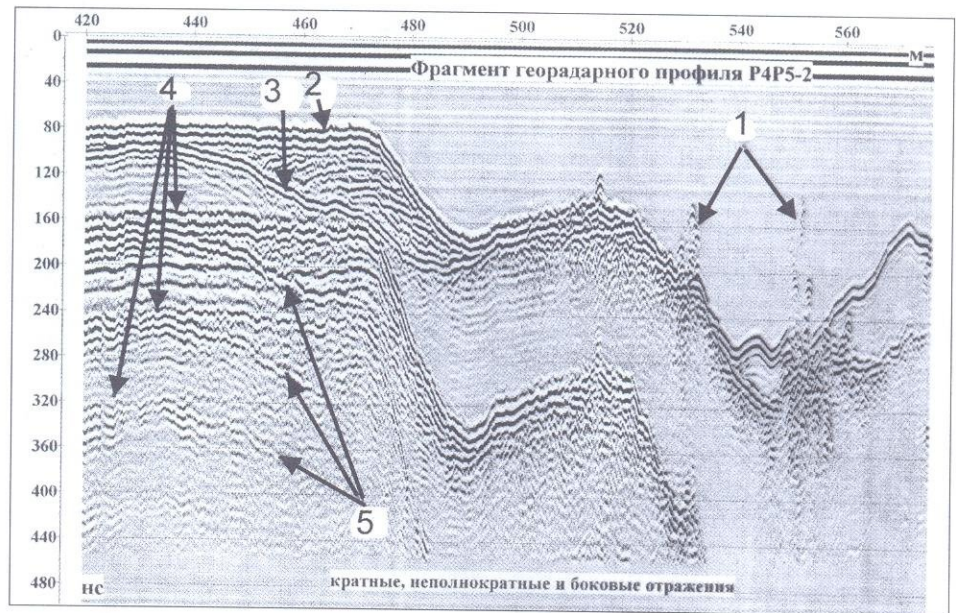
1 — оси синфазности однократных отражений от кровли коренных пород (гнейсогранитов); 2 — оси синфазности кратной волны



ний (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 2.4, 2.5 и 2.6.

РИС. 2.5. 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)



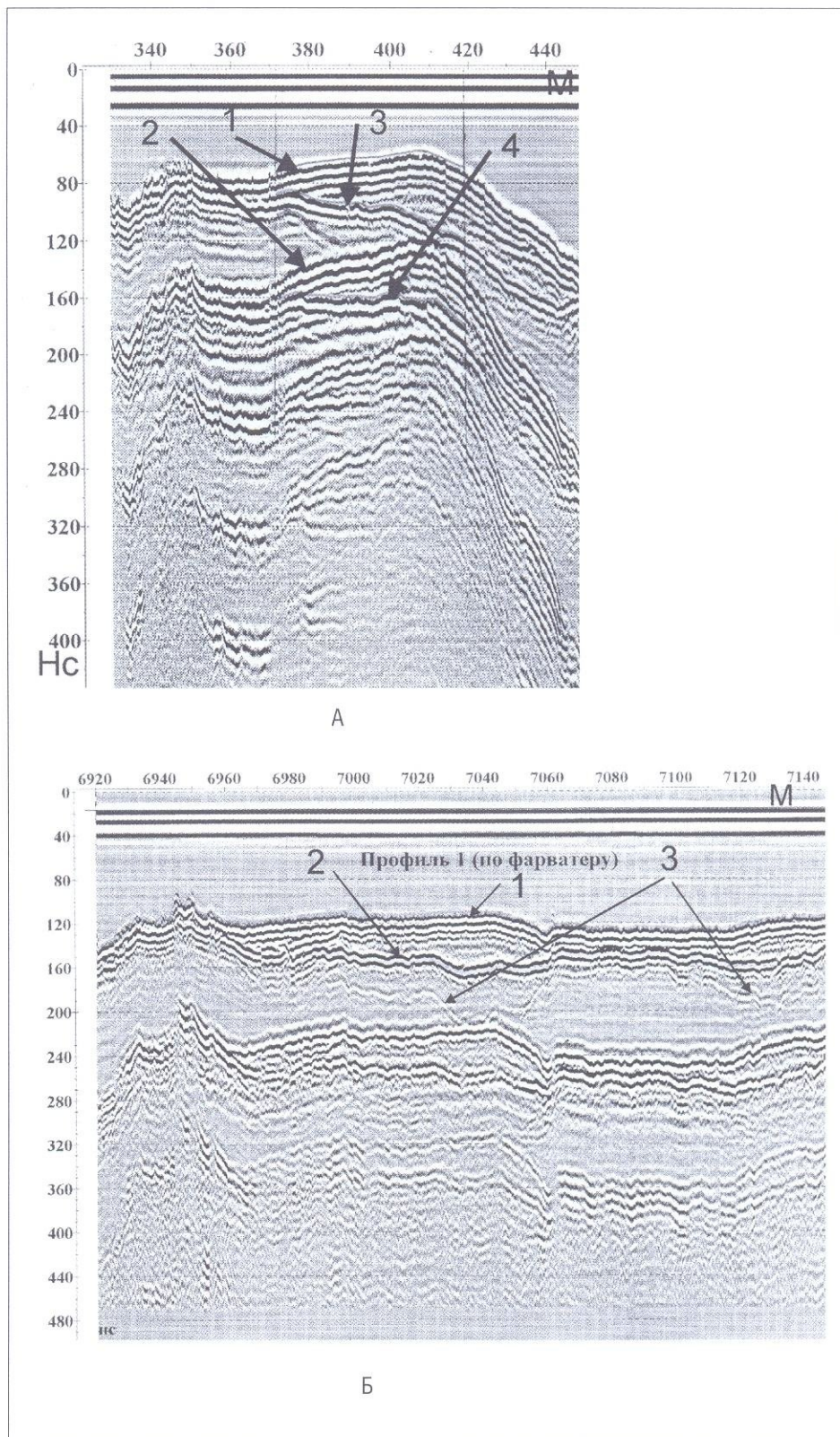
На рис. 2.5 отчетливо видно, что кратные отражения от дна (4) при горизонтальном дне также имеют горизонтальную форму, тогда как неполнократные отражения (5) от кровли коренных пород (3) полностью повторяют рельеф кровли коренных. При работах на воде иногда могут возникать и боковые отражения (1) от объектов, находящихся сбоку от линии профиля. Такими объектами могут быть большие валуны, выступы коренных пород и т.д.

На рис. 2.6А 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 часто можно наблюдать и неполнократные отражения внутри слоя, которые на сейсмоакустических данных встречаются крайне редко. На рис. 2.6Б 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. Как уже упоминалось выше, при решении задач поиска россыпных месторождений, определение рельефа кровли коренных пород и глу-

РИС. 2.6. 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. 2.3А). Б — неполнократная волна в слое (см. рис. 2.3Б): 1 — дно; 2 — кровля коренных пород; 3 — неполнократная волна от кровли коренных пород в слое

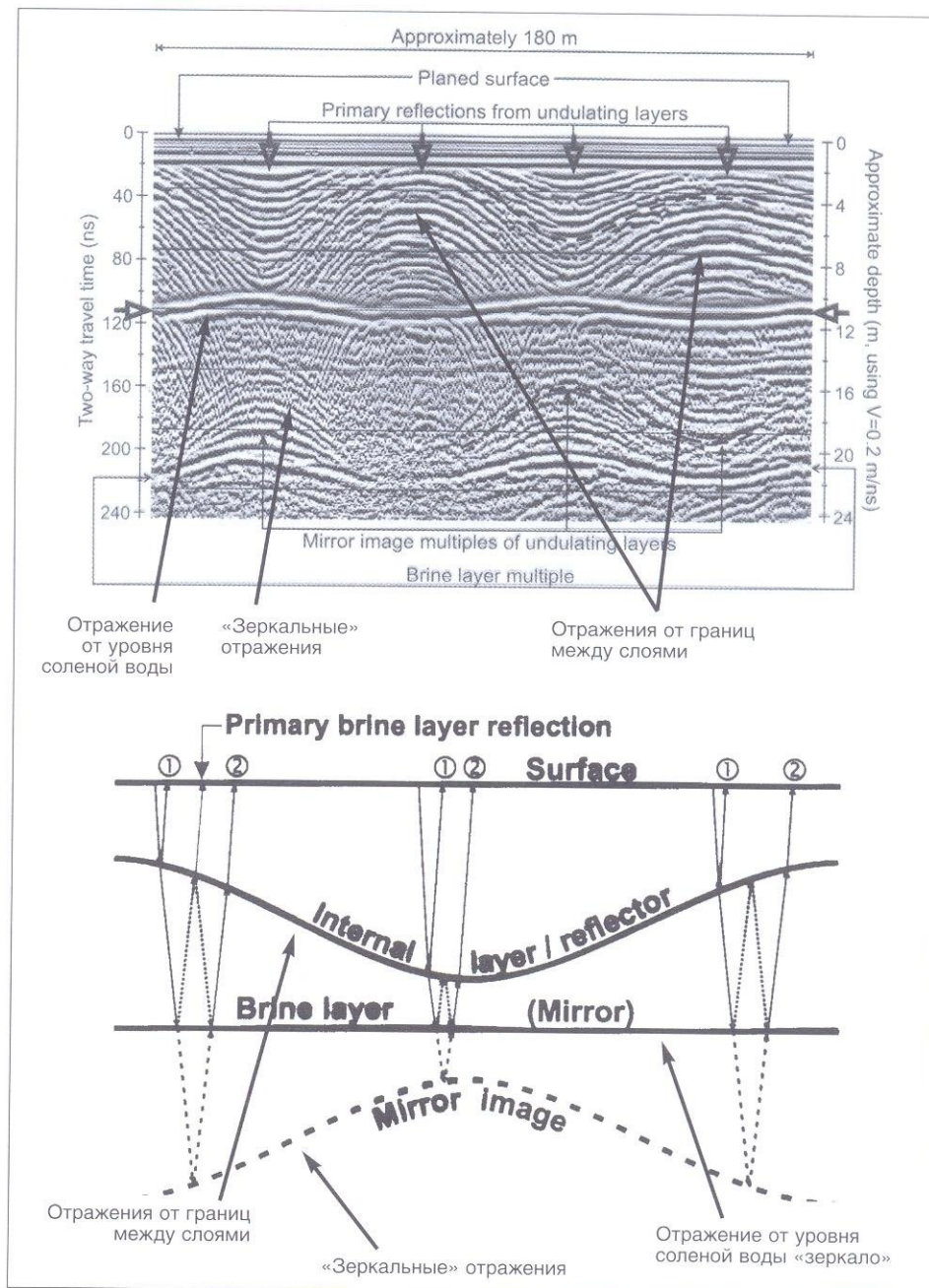


бины ее залегания имеет большое значение, так как в зависимости от глубины кровли производится выбор того или иного оборудования, необходимого для вскрышных работ. Цена оборудования зависит от его мощности и производительности, иными словами, ошибка по глубине может привести к большим неоправданным финансовым затратам.

На рис. 2.7. представлен довольно редкий случай, когда оси синфазности отраженных от внутренних границ раздела волн имеют волнистую форму (верхний рисунок), а в разрезе имеется интенсивная отра-

РИС. 2.7. Пример «зеркальных» неполнократных отражений, когда слои имеют волнистый рельеф, а резкая отражающая граница является горизонтальной.

Верхний рисунок — георадиолокационный профиль, нижний — интерпретация



жающая граница горизонтальной формы, которая обусловлена наличием уровня соленых вод. Вследствие этого возникают многочисленные неполнократные волны-помехи, которые представляют собой «зеркальные» отражения (см. нижний рисунок). Их образование связано с дополнительным пробегом отраженной волны между поверхностью соленых вод и отражающими границами волнистой формы, расположенными над ней.

Прогнозировать образование воздушных волн-помех необходимо на стадии проведения работ. При этом по возможности производится измерение расстояний до объекта, который может быть причиной их возникновения. Это, как правило, значительно облегчает в дальнейшем идентификацию этих волн-помех, т.е. делает интерпретацию более достоверной.

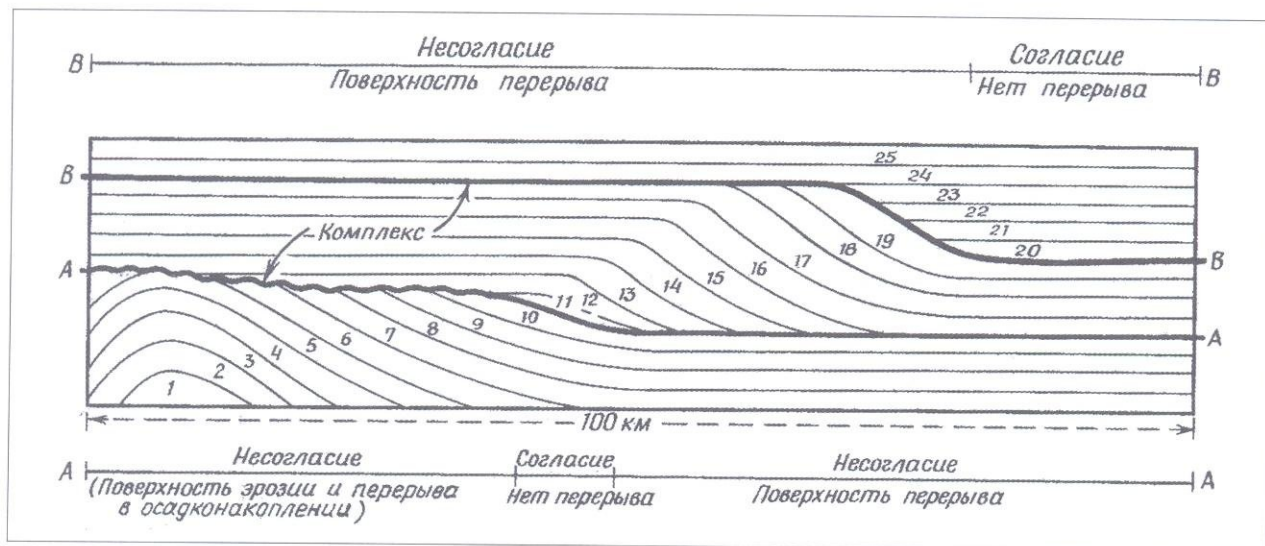
ГЛАВА 3. Выделение георадарных комплексов

После обработки и выделения волн-помех радарограммы готовы к интерпретации. Целью геологической интерпретации георадиолокационных данных в самом общем виде является либо детальное расчленение разреза, либо поиск или обнаружение разнообразных объектов. И в том, и в другом случае желательно получить какие-либо свойства разреза или объекта — скорость распространения электромагнитных волн или диэлектрическую проницаемость, влажность и т.д. В некоторых случаях при исследованиях требуется и расчленение разреза, и поиск объектов. Детальное изучение разреза основано на тех же методических приемах, которые были разработаны и опробованы в сейсморазведке при поиске ловушек нефти и газа неструктурного типа [20]. Разрез в этом случае представляется сложением 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. 3.1). При выделении осадочного комплекса анализируются только физические взаимоотношения между самими слоями. На этом этапе никаких сведений по геологии, как правило, не требуется. Сопоставление сейсмических разрезов и данных бурения показало, 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, 22].

Накопленный к настоящему времени опыт показывает, что и в случае георадиолокационных наблюдений оси синфазности отраженных электромагнитных волн приурочены в основном к границам слоев с различной литологией. Исключение составляют границы раздела, обуслов-

РИС. 3.1. Основные элементы осадочного комплекса [20].

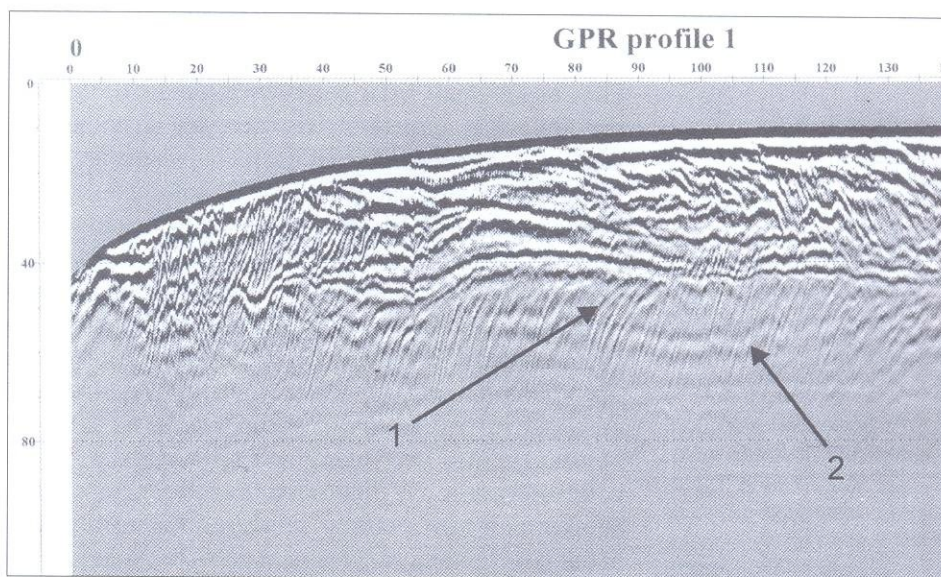
Его границами являются поверхности А и В, которые по латерали постепенно переходят из несогласных в согласные залегающие поверхности раздела. Отдельные слои (от 1 до 25) прослежены по поверхностям напластования



ленные различной степенью водонасыщения (в первую очередь это уровень грунтовых вод — УГВ) или различным типом флюида (например, вода—лед). Тогда при наклонном залегании слоев могут возникать ситуации, когда на радарограммах все пересекающиеся оси синфазности будут реальными границами, только горизонтальные оси будут приурочены либо к УГВ, либо к кровле многолетнемерзлых пород (ММП), а наклонные оси синфазности — к литологическим границам (рис. 3.2). Следует однако помнить (см. Главу 2), что при наличии пересекающихся осей синфазности одна из систем осей может быть волной-помехой.

РИС. 3.2. Фрагмент георадиолокационного профиля через прибрежные валы (бережье Каспийского моря). Использовалась экранированная антенна 300 МГц.

1 — оси синфазности от наклонных границ в косослоистой толще; 2 — уровень грунтовых вод (УГВ)



Если на радарограмме все оси синфазности залегают субгоризонтально и разрез сложен горизонтально залегающими отложениями, то выделение границ УГВ или ММП представляется довольно сложной задачей и требует дополнительной информации. Этот вопрос будет рассмотрен в других разделах.

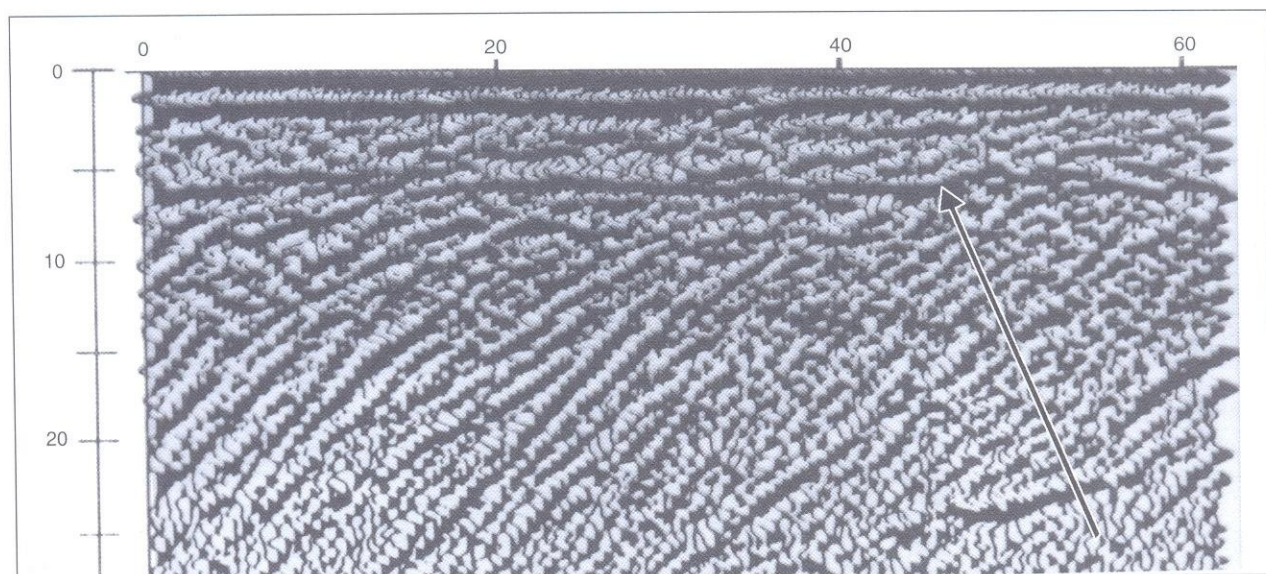
Таким образом, чтобы выделить комплекс, необходимо установить и проследить в его кровле и подошве несогласные границы. Несогласной называется поверхность эрозии (размыва) или перерыва в осадконакоплении. Среди множества типов несогласий на радарограммах реально можно выделить два типа — угловое и параллельное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

Обнаружение углового несогласия, как правило, не вызывает затруднения. В этом случае наблюдается прекращение прослеживания одной системы осей синфазности на другой (рис. 3.3). Более сложным и зачастую неоднозначным является выделение стратиграфических или параллельных несогласий, когда оси синфазности волн, отраженных 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 ча-

РИС. 3.3. Пример записи углового несогласия в кровле нижнего косослоистого комплекса (показано стрелкой).

В верхнем георадарном комплексе короткие оси синфазности расположены субгоризонтально [52]

сти кровли осадочного комплекса (рис. 3.1), 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. 3.9 (кровля нижнего комплекса). При отсутствии угловых и (или) параллельных несогласий (представленных интенсивными осями синфазности) граница между комплексами проводится по смене волновой картины (рис. 3.9, граница между средним и верхним комплексами).

Для сейсмических данных разработана классификация видов залегания слоев на верхней и нижней границах комплекса [20], которую можно использовать и при интерпретации георадарных данных (рис. 3.4). Примеры волновых картин несогласий на реальных материалах показаны на рис. 3.5—3.8: эрозионный срез — часть толщи размыва (рис. 3.5); кровельное прилегание — эрозия отсутствует, наблюдается неотложение осадков (часто встречается в дельтовых областях, рис. 3.6); налегание в подошве — первоначально горизонтально залегающие слои постепенно выклиниваются у первоначально наклонной поверхности осадконакопления (рис. 3.7); прилегание в подошве — первоначально наклоненные слои постепенно выклиниваются вниз по падению у изначально наклонной (либо горизонтальной) поверхности (рис. 3.8).

РИС. 3.4. 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

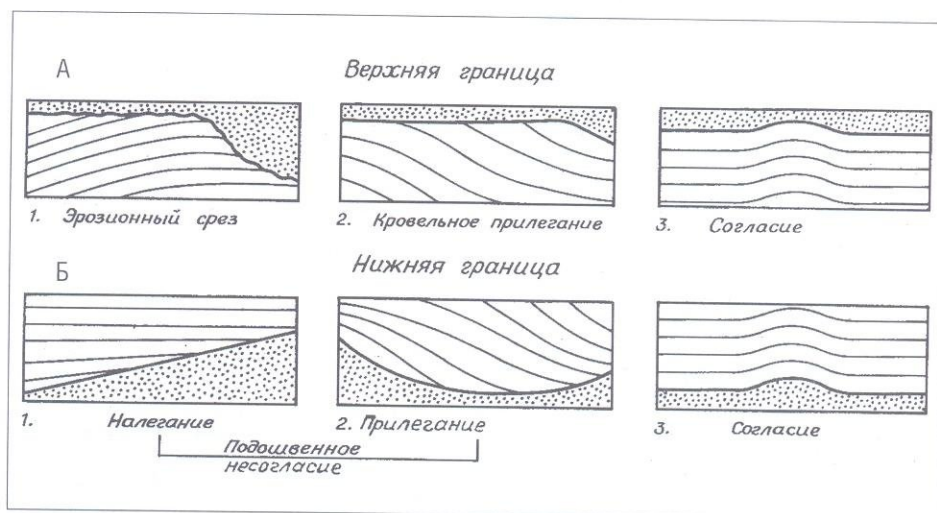


РИС. 3.5. Пример записи углового несогласия в кровле — эрозионного среза (показан стрелкой)

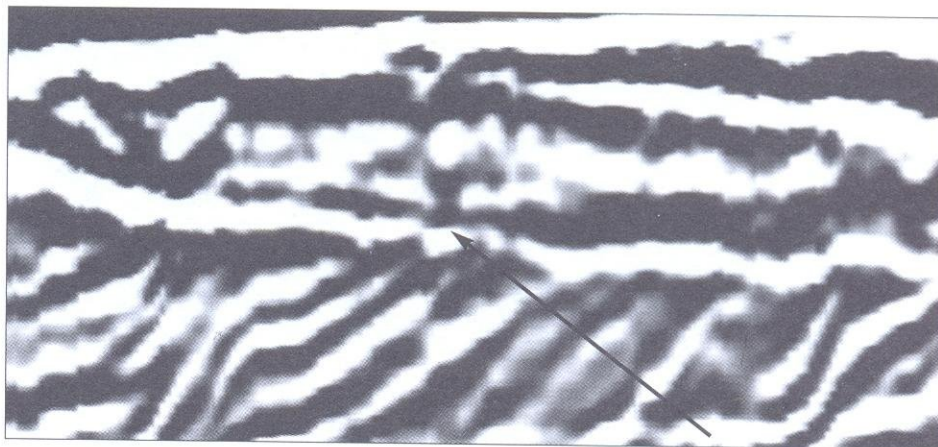
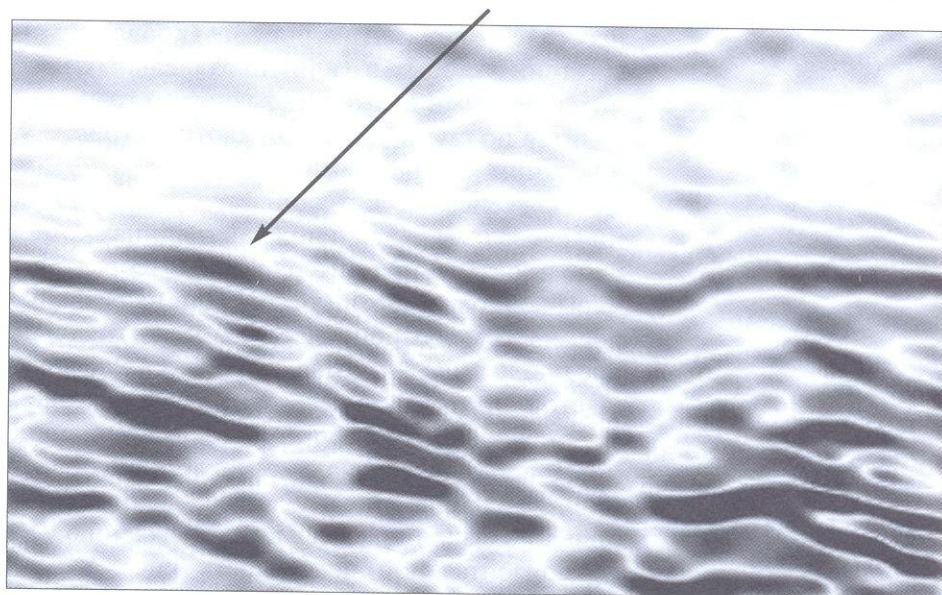


РИС. 3.6. Пример записи несогласия в кровле — кровельного прилегания (показано стрелкой)



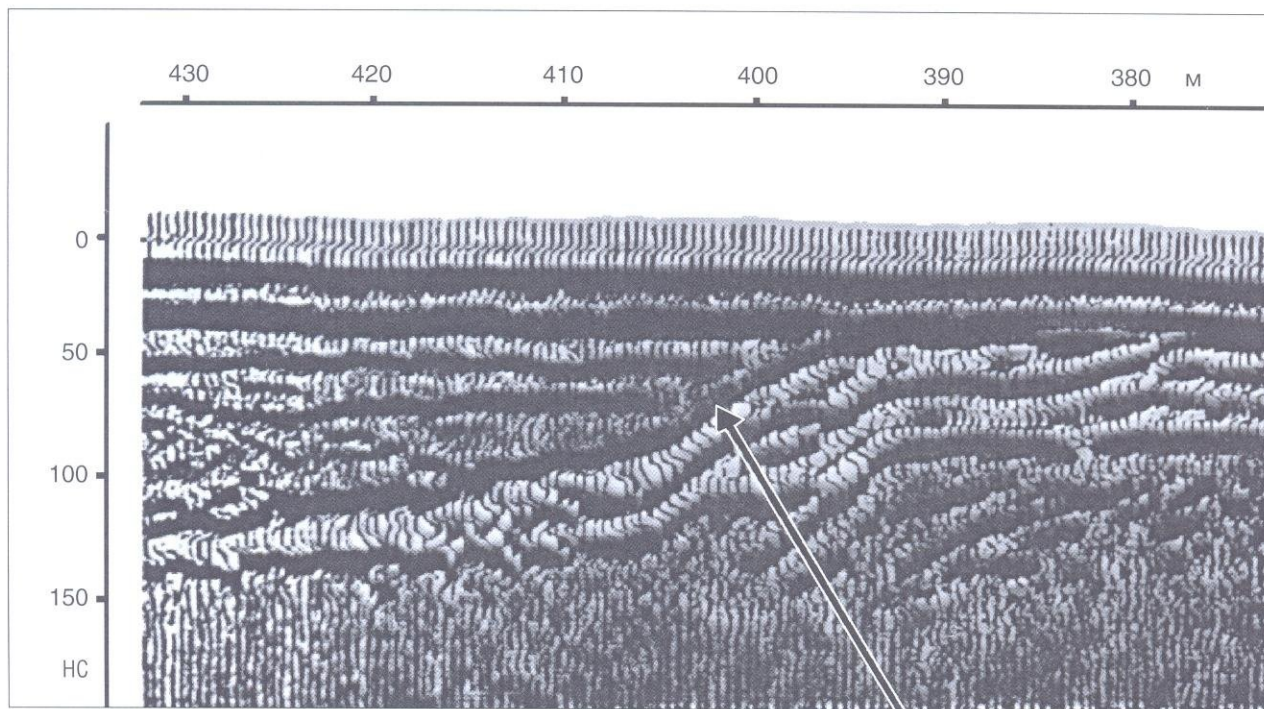
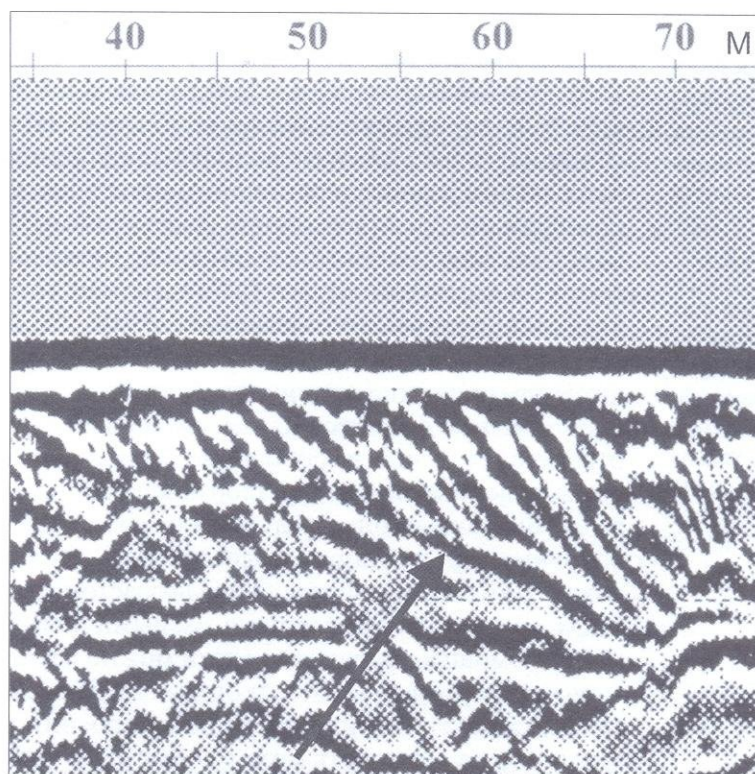


РИС. 3.7. Пример записи углового несогласия — налегание в подошве (показано стрелкой)

РИС. 3.8. Пример записи углового несогласия — прилегания в подошве (показано стрелкой).

Фрагмент радарограммы, полученной с экранированной антенной 300 МГц.

В подошве комплекса первоначально наклоненных слоев наблюдается постепенное их выклинивание вниз по падению у изначально наклонной (либо горизонтальной) поверхности



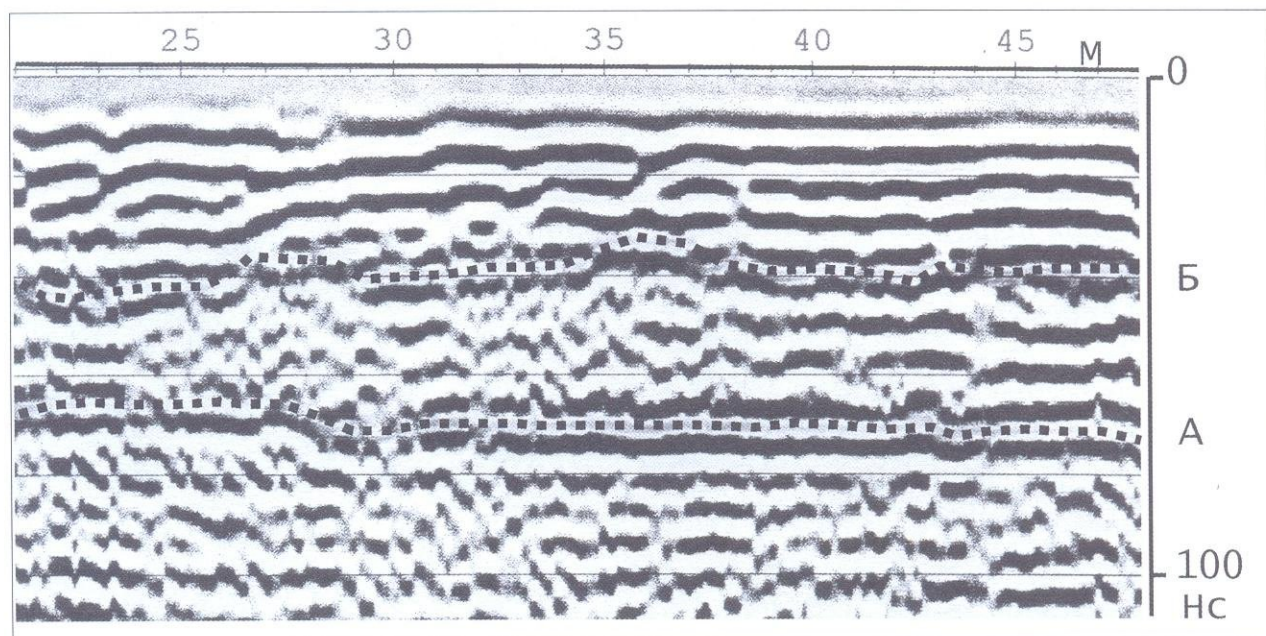


РИС. 3.9. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного с не экранированной антенной 150 МГц. Выделено три георадарных комплекса, разделенных границами А и Б.

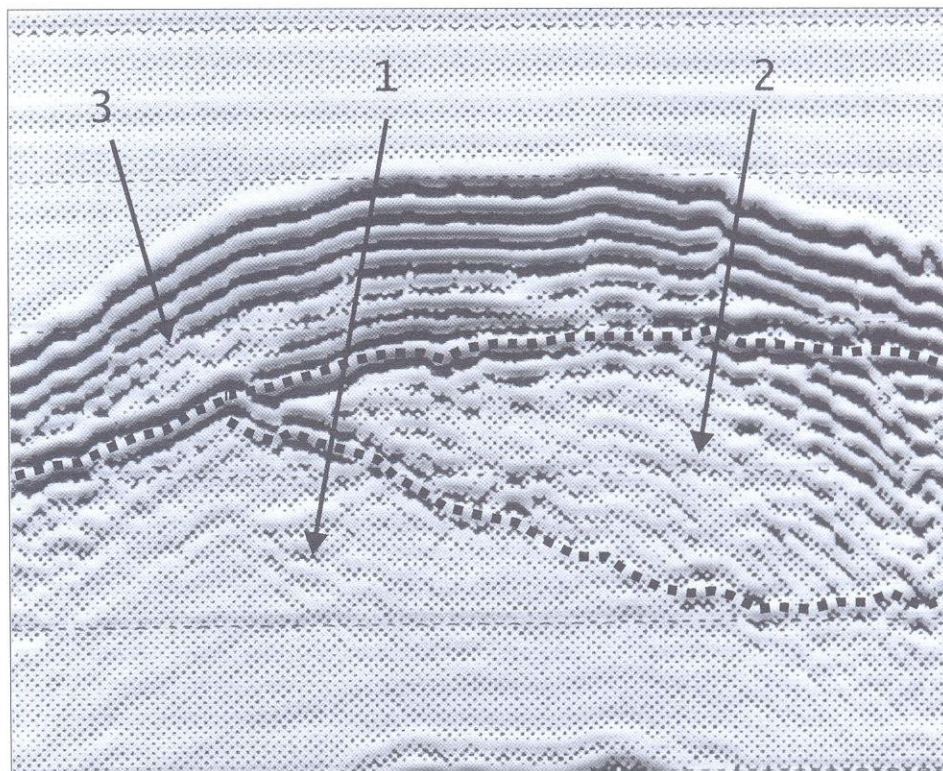
Граница между нижним и средним комплексами (А) проведена по интенсивным осям синфазности, между средним и верхним — по смене волновой картины. По данным бурения нижний комплекс представлен юрскими глинами, средний — аллювиальными отложениями среднего плейстоцена, верхний — современными техногенными отложениями

На рисунках 3.9 и 3.10 представлены фрагменты георадиолокационных профилей с выделенными георадарными комплексами. На первом из них границы комплексов выделены по отличиям в волновой картине (левая часть отражающего горизонта Б) и протяженным осям синфазности (отражающий горизонт А). Признаков угловых несогласий на этой радарограмме не наблюдается, выделяются только стратиграфические несогласия. На рис. 3.10 имеется несколько видов угловых несогласий. Второй комплекс на этом рисунке, представленный косослоистой толщей, залегает на нижележащем комплексе 1 по схеме подошвенного прилегания (см. рис. 3.8) и очевидно, был сформирован при преобладающем латеральном разнотектоническом материале. Граница между радарными комплексами 3 и 1 (левая часть радарограммы) проведена по резкому изменению типа волновой картины и по четко выраженным осям синфазности большой амплитуды. Граница между комплексами 2 и 3 представляет собой угловое несогласие (рис. 3.10).

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 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.

С помощью 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 ла-

РИС. 3.10. Фрагмент радарограммы, полученный с экранированной антенной 300 МГц. Исследования проводились на реке с резиновой лодки. Выделено три георадарных комплекса (показаны цифрами со стрелками). Границы между комплексами проведены штрих-пунктирными 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

терали 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 и состава, 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 4.

Выделение георадарных фаций

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 [20]. 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, см. [28]). 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 — амплитуда отражений (интенсивность осей синфазности);
- 3 — частотный состав записи;
- 4 — протяженность осей синфазности;
- 5 — форма фациальных единиц в пространстве;
- 6 — скорость распространения волны.

Последний параметр (скорость) используется в тех случаях, когда его удастся 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 [42, 43, 44, 56].

Конфигурация осей синфазности является наиболее очевидной и поддающейся прямому анализу характеристикой волновой картины при георадиолокационных исследованиях. На рис. 3.9 (см. Главу 3) 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 по данным бурения аллювиальными отложениями, 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. 3.9, Глава 3). 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.

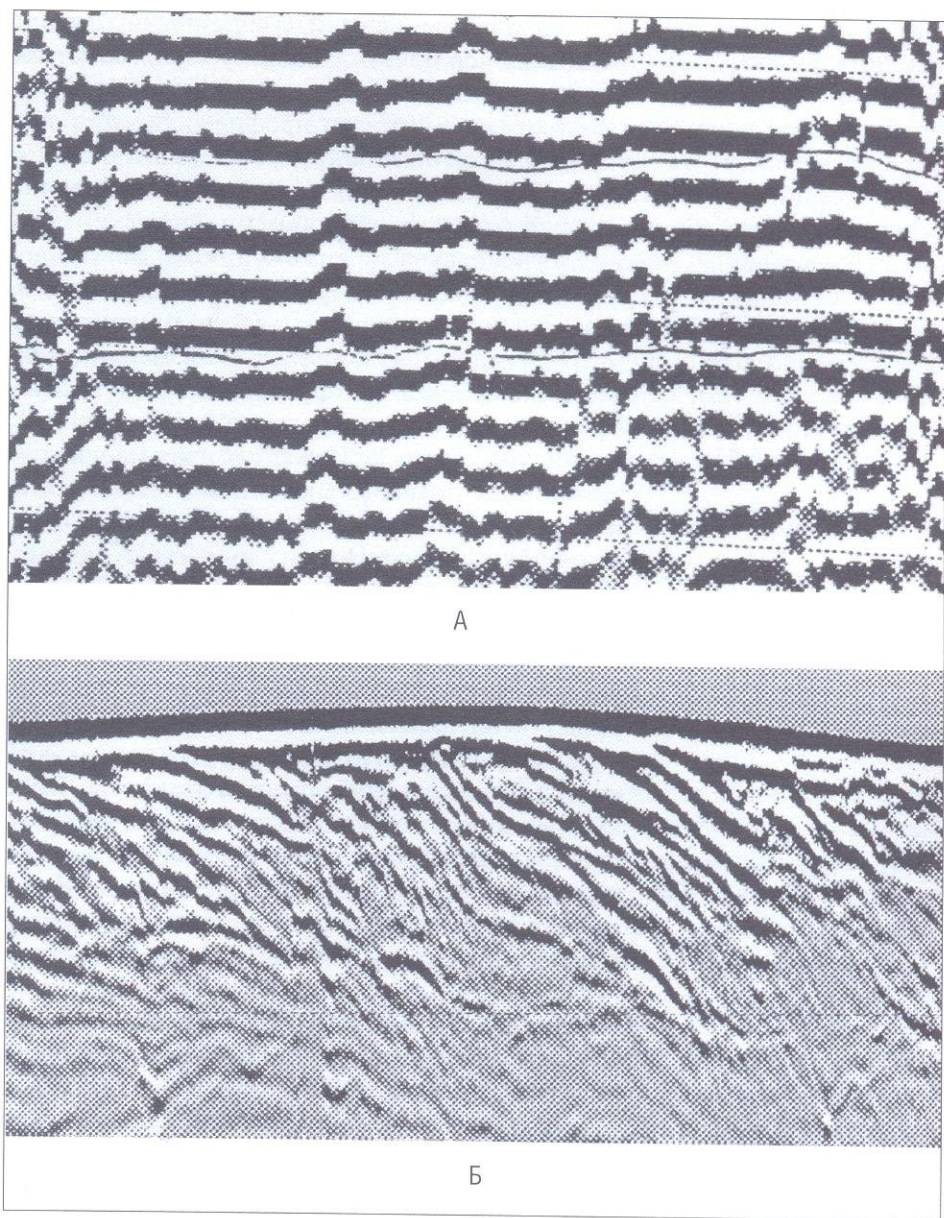
В отличие от сейсмических наблюдений, когда исследования проводятся, как правило, на больших площадях, георадиолокационные работы зачастую выполняются на ограниченных участках и их глубинность значительно меньше. Поэтому нередко возникают ситуации, когда на изучаемой площадке не наблюдается очевидных 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. 4.1—4.3 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. 4.1б, 4.2а и 4.3б 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.

Натурные исследования, проведенные нами, показывают, что образование различных осей синфазности на радарограммах, полученных при изучении песчаных отложений, обусловлено изменением гранулометрического состава песков, наличием ожелезненных прослоев 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. 4.4 показан фрагмент профиля, выполненного на реке. Разрез представлен здесь коренными

РИС. 4.1. 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)

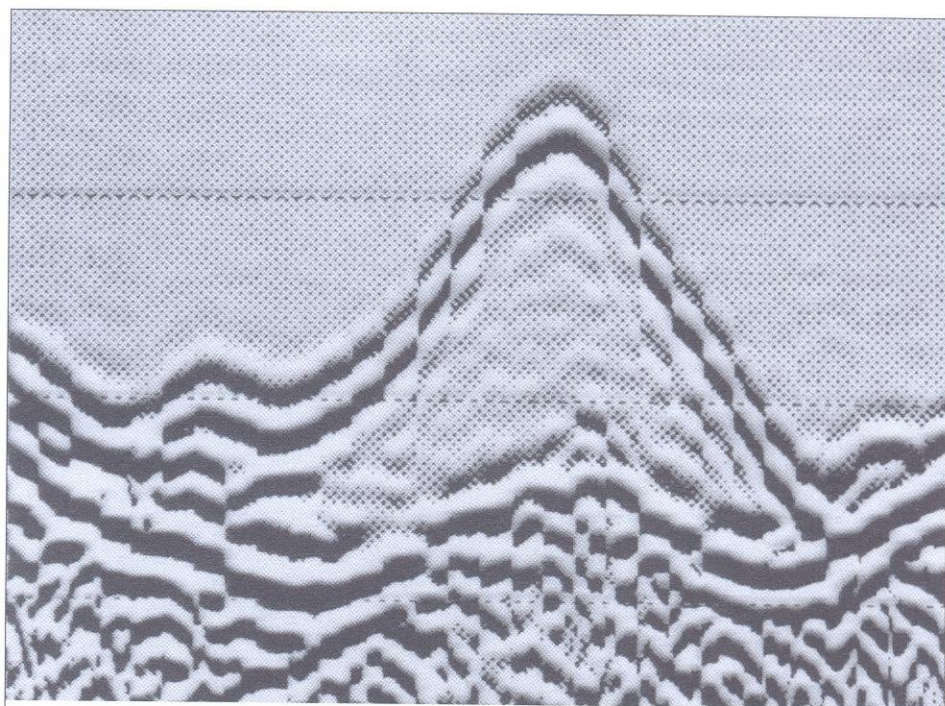


отложениями (гранитами), перекрытыми тонким покровом терригенных осадков. На радарограмме терригенные отложения выделяются как верхний георадарный комплекс, в пределах которого наблюдаются три типа волновой картины (слева направо 3, 4 и 5), причем переходы между ними довольно постепенные — от субгоризонтальных (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).

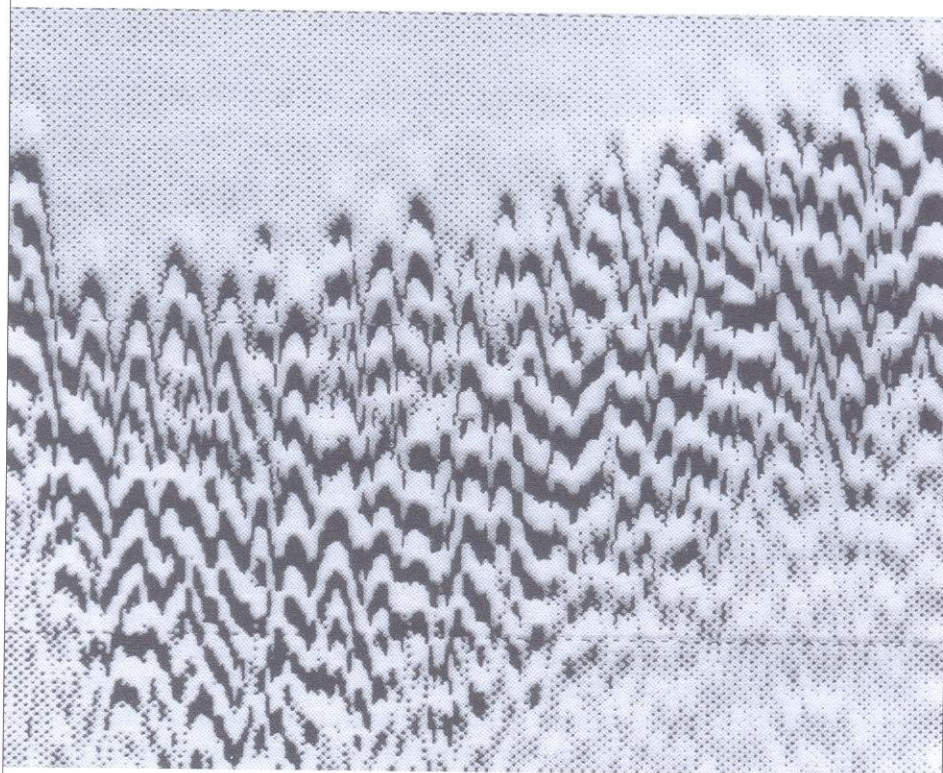
При проведении детальных одноканальных сейсмоакустических наблюдений на акваториях на частотах в сотни герц и выше глубинность исследований часто зависит от присутствия в разрезе газонасыщенных от-

РИС. 4.2. Фрагменты радарограмм с различными типами волновых картин:

А — «прозрачный» тип (отложения представлены песками); Б — «хаотический» тип (преимущественно гравийно-галечниковые отложения)



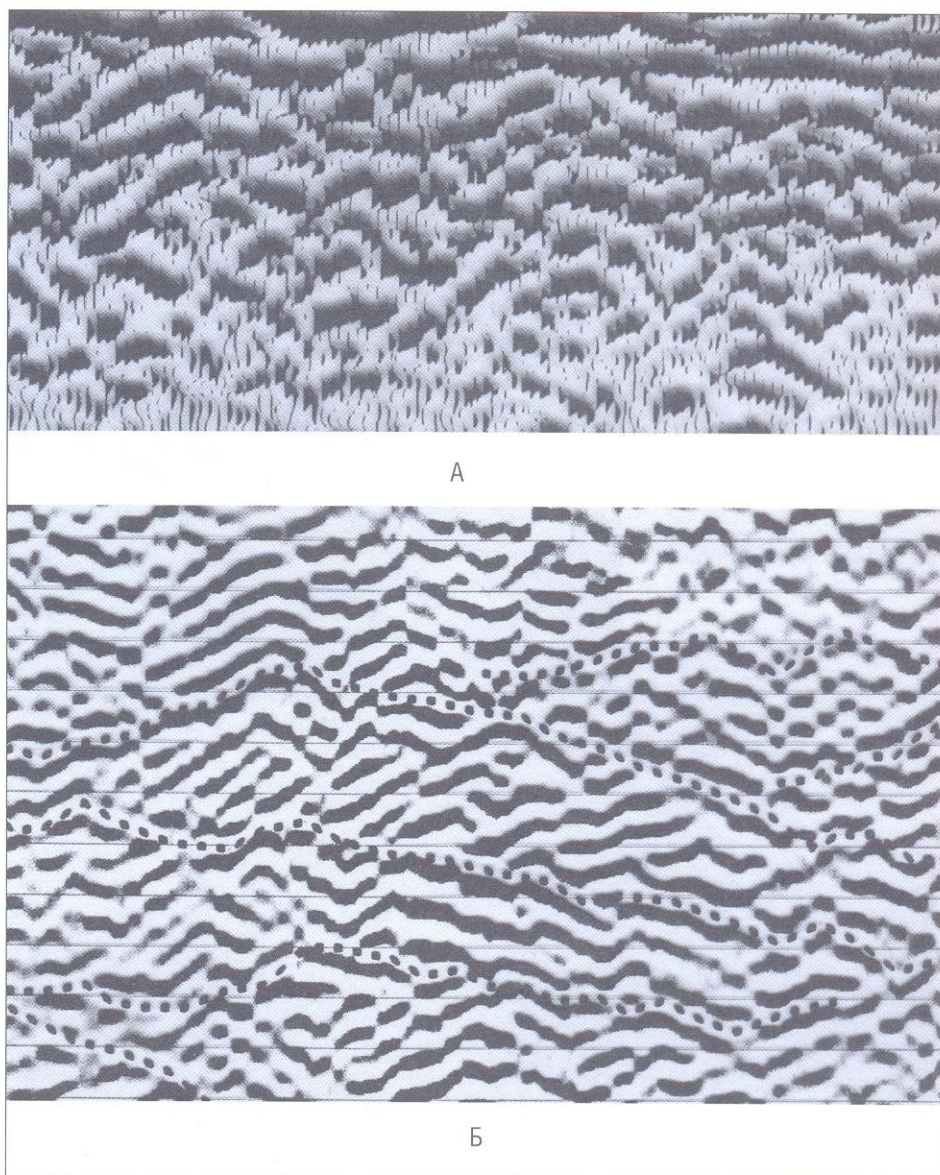
А



Б

РИС. 4.3. Фрагменты радарограмм с различными типами волновых картин:

А — бугристый (отложения представлены алевритами); Б — линзовидный (отложения представлены преимущественно песками)



ложений, 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. 4.5а показан георадиолокационный профиль, выполненный на участке добычи песчано-гравийных отложений. Варианты интерпретации представлены на рис. 4.5 б, в: б — без привлечения дополнительных данных; в — с привлечением дополнительных материалов. Вариант интерпретации на рис. 4.5б 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

РИС. 4.4. 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

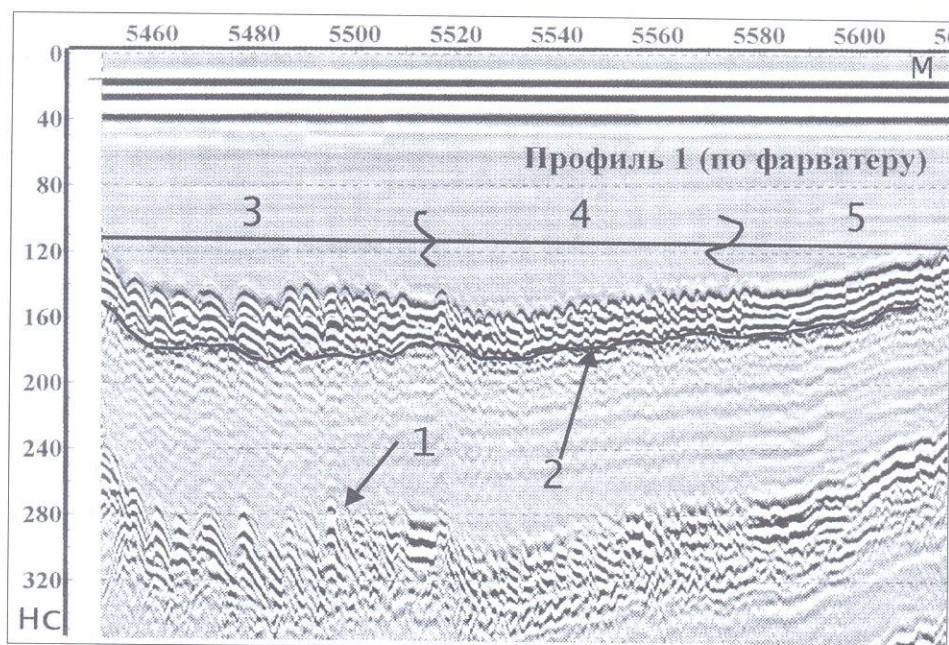
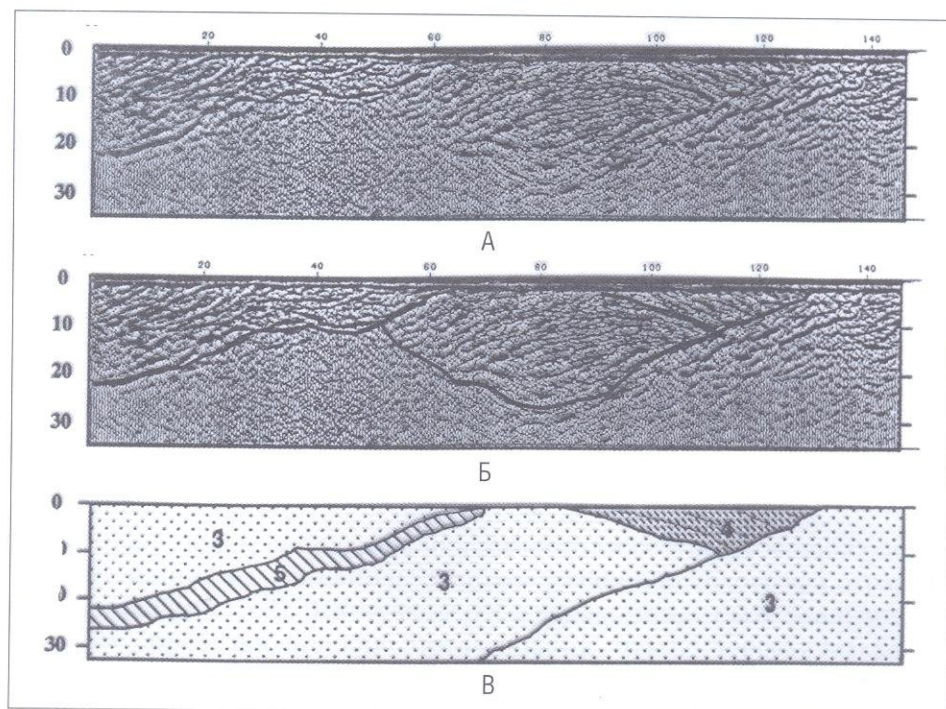


РИС. 4.5. Георадиолокационный профиль, выполненный на участке добычи песчано-гравийных отложений (по [52] с дополнениями автора):

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



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.

ГЛАВА 5. Геологическая привязка георадарных комплексов и фаций

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.

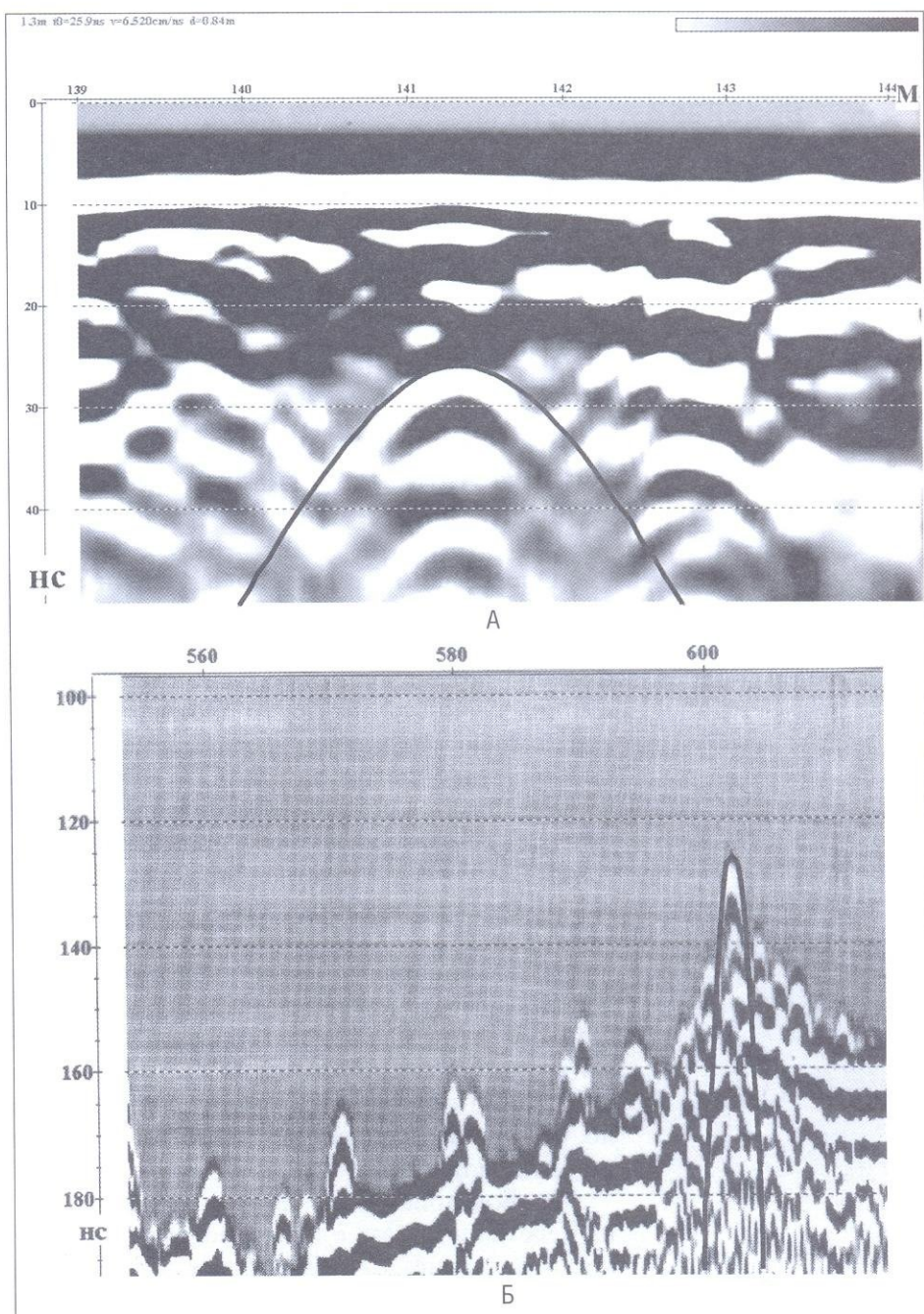
5.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

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. 5.1). 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. 5.2). 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.

РИС. 5.1. 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

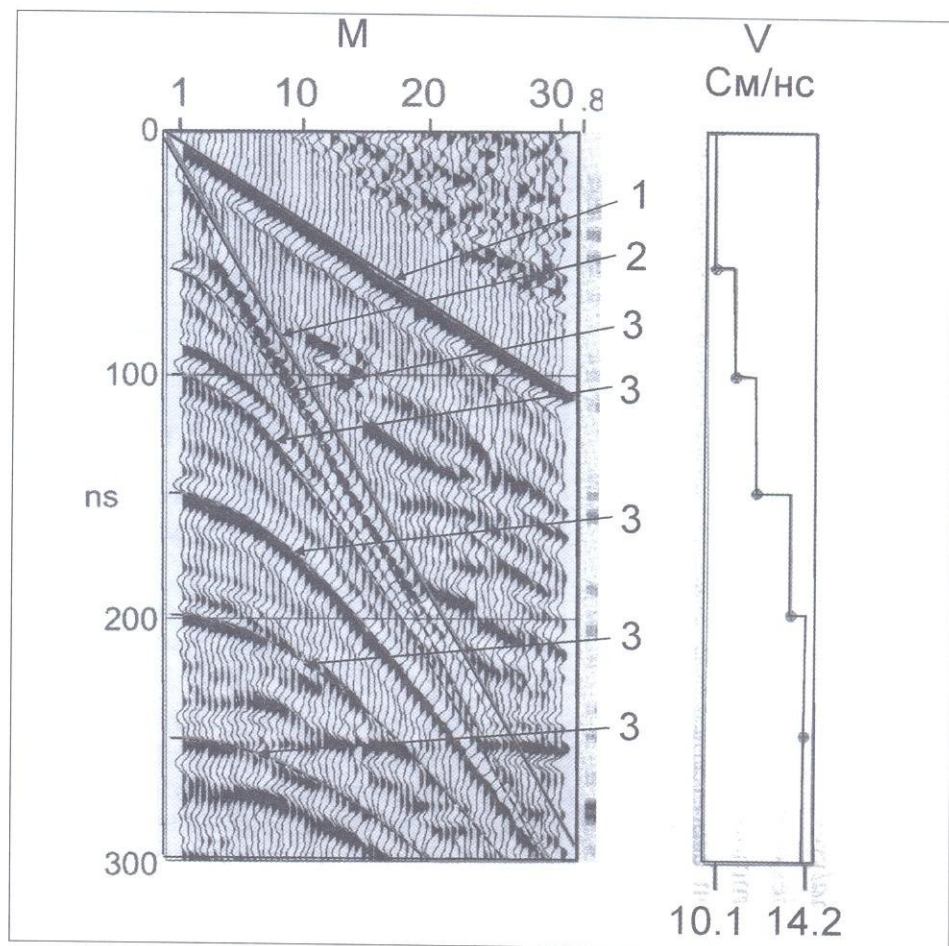


И в первом и во втором способах имеется ряд ограничений, которые существенно снижают их применимость:

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;

РИС. 5.2. Оценка скоростей электромагнитных волн по годографам отраженных волн (слева — годографы, справа — интервальные скорости, [37]).

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

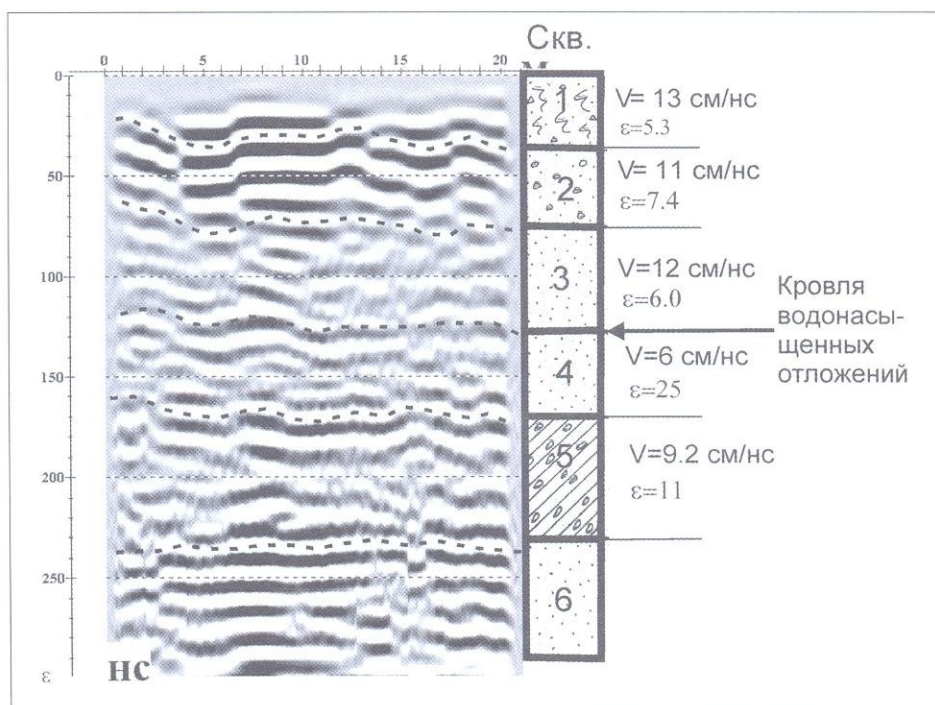


2 — интенсивные оси синфазности встречаются в разрезах также нечасто и, как было показано выше (см. гл. 2 и 3), они не всегда являются единственными границами между георадарными комплексами. Иными словами, оценка значений скоростей может быть произведена только для отдельных частей разреза (на рис. 5.2 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 вол-

РИС. 5.3. 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



ны (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. 5.3. 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 — $V=c/\sqrt{\epsilon}$, если имеется возможность измерить диэлектрическую проницаемость в этих слоях. Однако в реальных условиях такая ситуация встречается крайне редко.

5.2. 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 осуще-

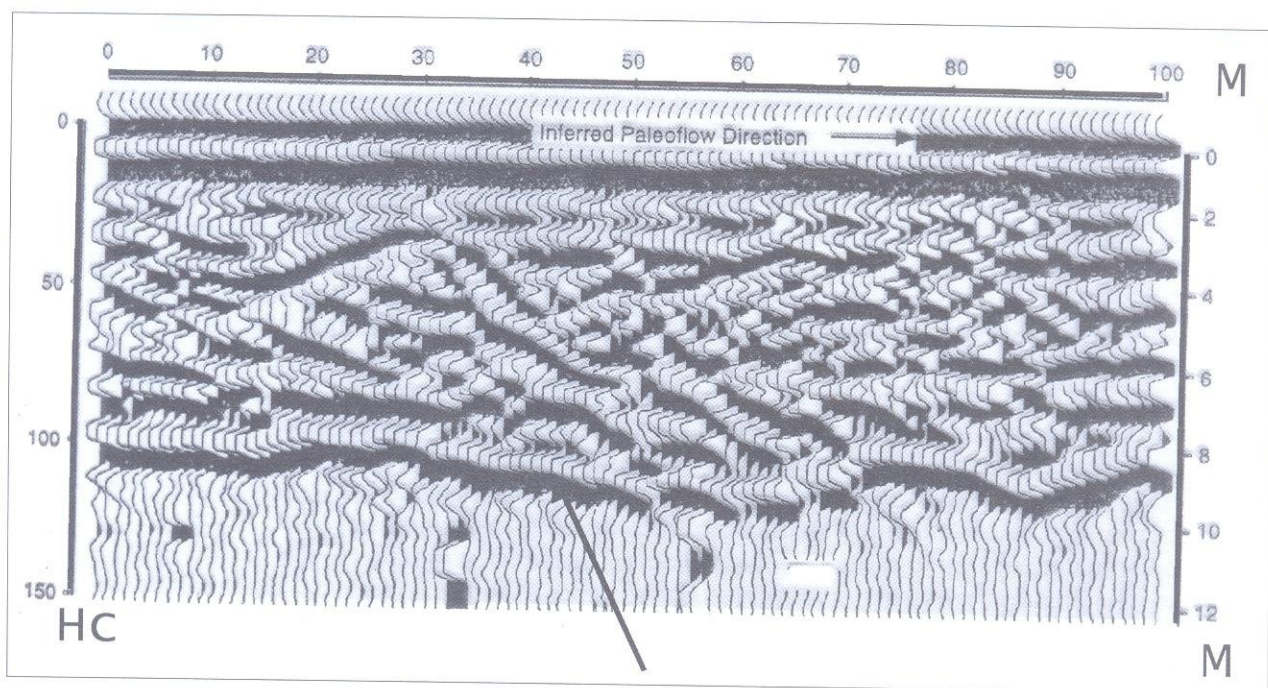


РИС. 5.4. Георадарный профиль, полученный с антенной 100 МГц ($V=16$ см/нс).

Стрелкой показана кровля ледниковых глин [43]

ствляется одним из перечисленных выше способов (см. раздел 5.1 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. 5.4). Подобный слой можно сравнить с часто выделяемым при интерпретации сейсмоакустических данных «акустиче-

ским» 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 4, рис. 4.5).

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.

Часть II. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ПРИ РЕШЕНИИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАДАЧ

В данном разделе представлены материалы георадиолокационных исследований, полученные как сотрудниками кафедры сейсмометрии и геоакустики, так и специалистами других организаций во время выполнения опытно-методических и производственных работ. Очевидно, что практически невозможно одной группой специалистов охватить исследованиями все направления, где используется георадиолокация. В то же время у различных фирм накоплен огромный экспериментальный материал, который они любезно разрешили использовать при написании последующих разделов. В каждом конкретном случае будет указано, материалы каких организаций были использованы для иллюстрации того или иного положения. Все 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), изучение строения автомобильных дорог, железнодорожных насыпей и взлетно-посадочных полос аэродромов, 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. Автор надеется, 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 проверка этих георадиолокационных данных в ряде случаев показывает, что эти признаки «работают». Автор также надеется, что, обратив внимание на такие примеры, общими усилиями решение этих проблем будет найдено.

ГЛАВА 6.

Поиск объектов искусственного и естественного происхождения

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. 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. 5.1А). 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, три металлических трубопровода диаметром 140 см и находящихся на глубине 120 см во **влажных суглинках** на радарограммах, полученных с антеннами 75, 300 и 500 МГц, не выделяются. На рис. 6.1Б представлен фрагмент георадиолокационного профиля, полученный с антенной 300 МГц, через этот участок. На радарограмме должны были бы присутствовать дифрагированные волны, или отмечаться хотя бы какое то изменение волновой картины, однако никаких аномальных зон не выделяется. Этот пример еще раз показывает, что глины и суглинки, особенно увлажненные, характеризуются сильным поглощением электромагнитных волн.

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 (рис. 6.3). 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.

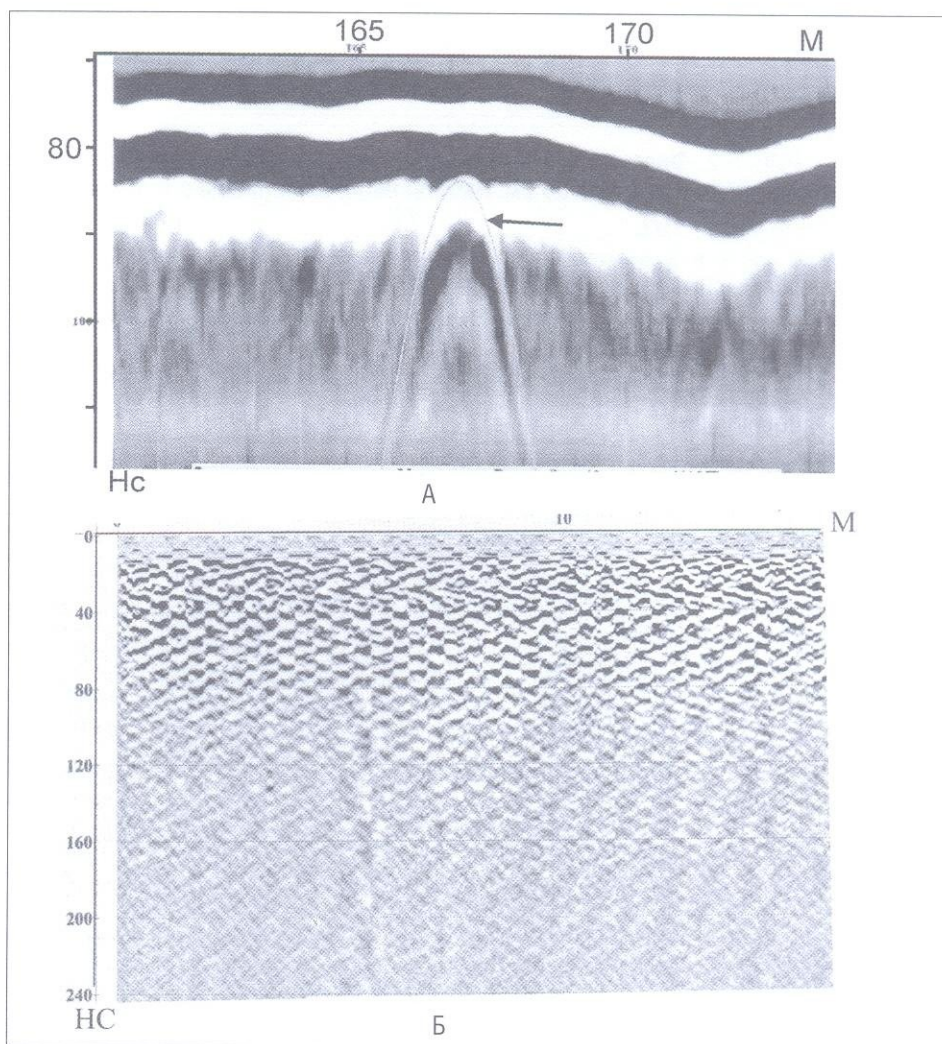
Если объекты имеют достаточно большие размеры в плане, то на георадиолокационных профилях кроме осей синфазности дифрагированных волн, которые могут образовываться на их краях, будут выделяться также оси синфазности отраженных от верхней кромки объекта волн. В реальных условиях, вследствие интерференции 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. 6.1. А — 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; Б — фрагмент георадиолокационного профиля через участок, на котором расположены три металлические трубы диаметром 140 см. Глубина до верхней кромки труб 120 см. Использовалась антенна 300 МГц



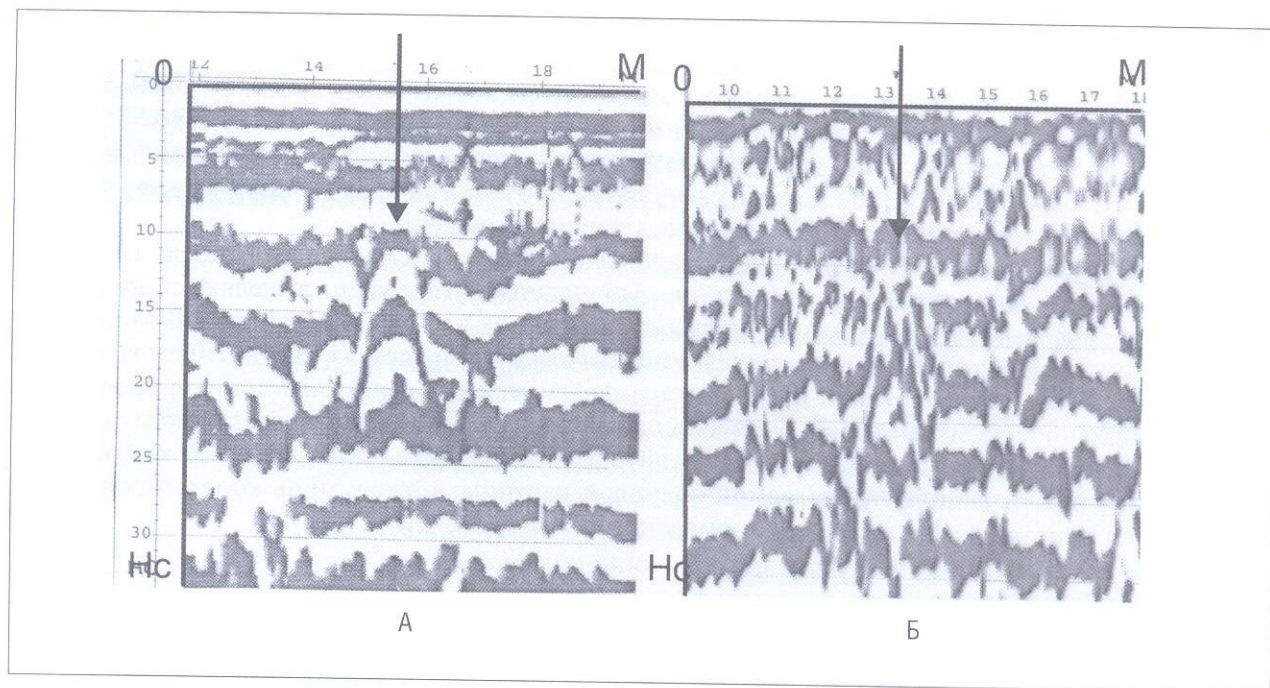


РИС. 6.2. Фрагменты георадиолокационных профилей, пройденных над трубой диаметром 20 см и расположенной на глубине 50 см. Работы были выполнены с интервалом в две недели. В обоих случаях использовалась антенна 500 МГц.

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. 6.3. Изображение на георадиолокационном разрезе отражений от пластиковой и металлической труб, находящихся в песке.

Видно, что полярность отражений меняется. Трубы находятся на одинаковой глубине

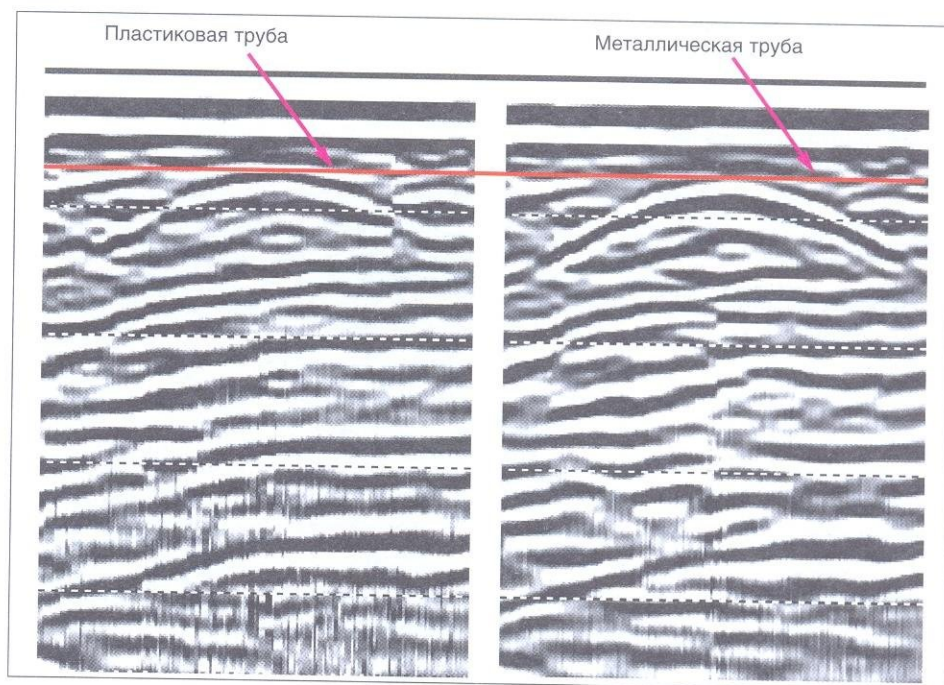


РИС. 6.4. Фрагмент радарограммы, полученной с антенной 300 МГц.

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

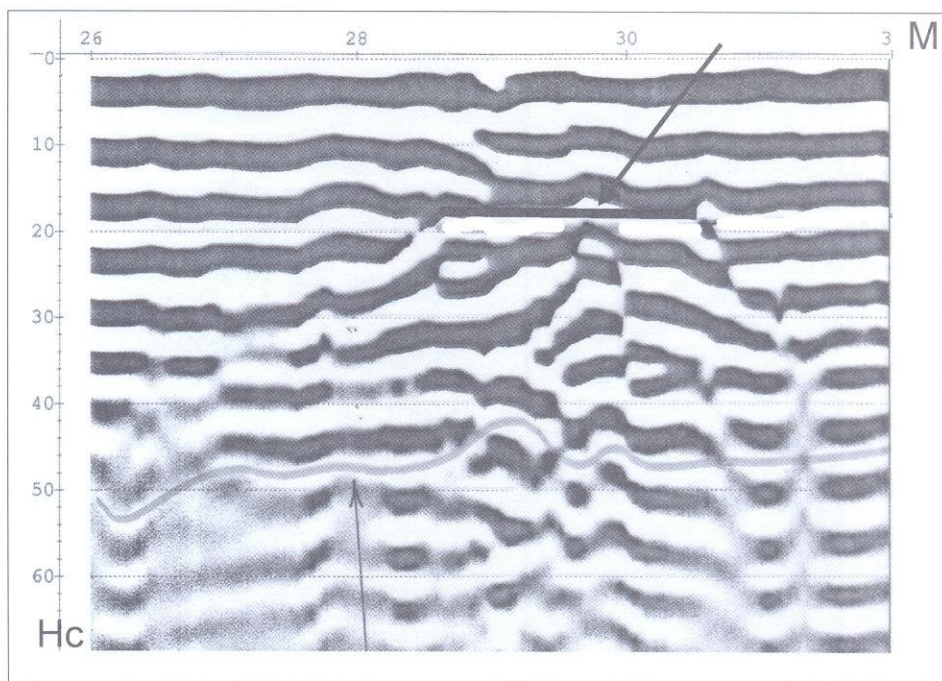


РИС. 6.5. Фрагмент георадиолокационного профиля, полученного с экранированной антенной 300 МГц.

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

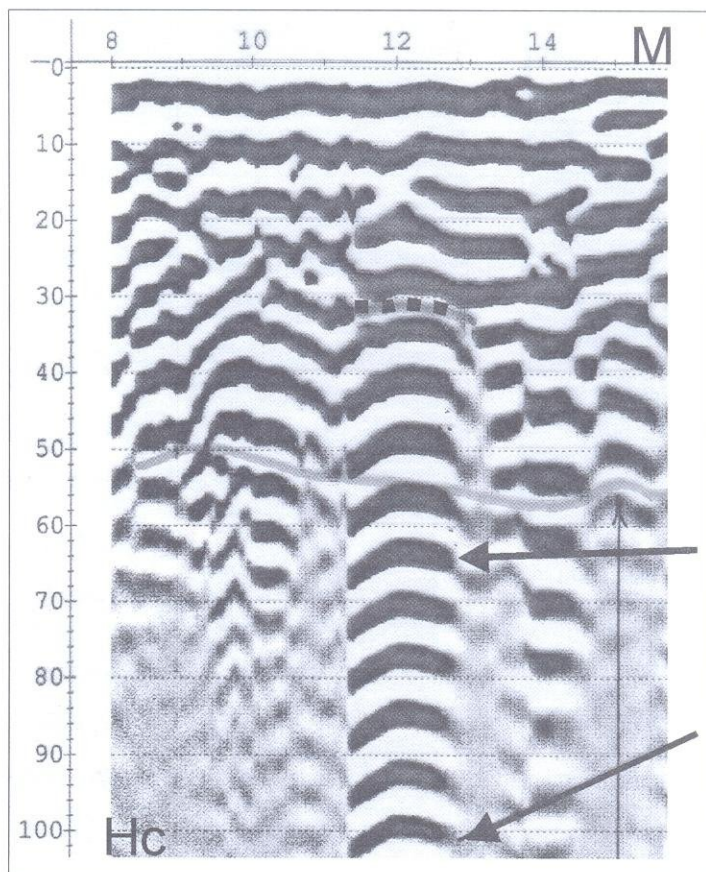


РИС. 6.6. Фрагмент георадиолокационного профиля над электрическим кабелем (пикет 2,7 м, глубина — 0,7 м при $V=8,2$ см/нс), выполненного с экранированной антенной 300 МГц.

1 — характерная «звучащая» запись. Наличие кабеля подтверждено вскрытием

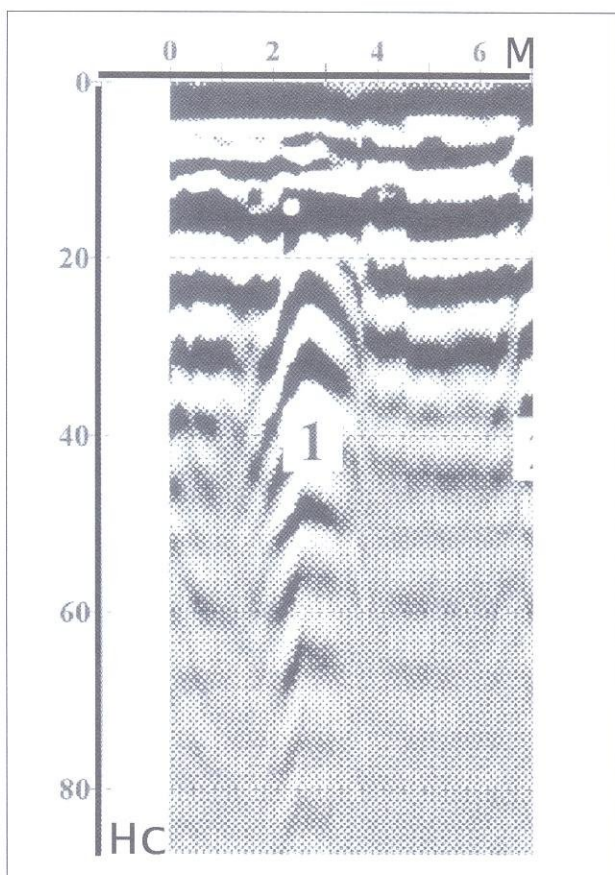


РИС. 6.7. Фрагмент георадиолокационного профиля, проходящего над известным коллектором (глубина до верхней кромки коллектора 1,8 м, высота — 1,6 м). Использовалась экранированная антенна 300 МГц. Ширина коллектора — 2 м (пикеты 5–7 м).

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 графикам 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

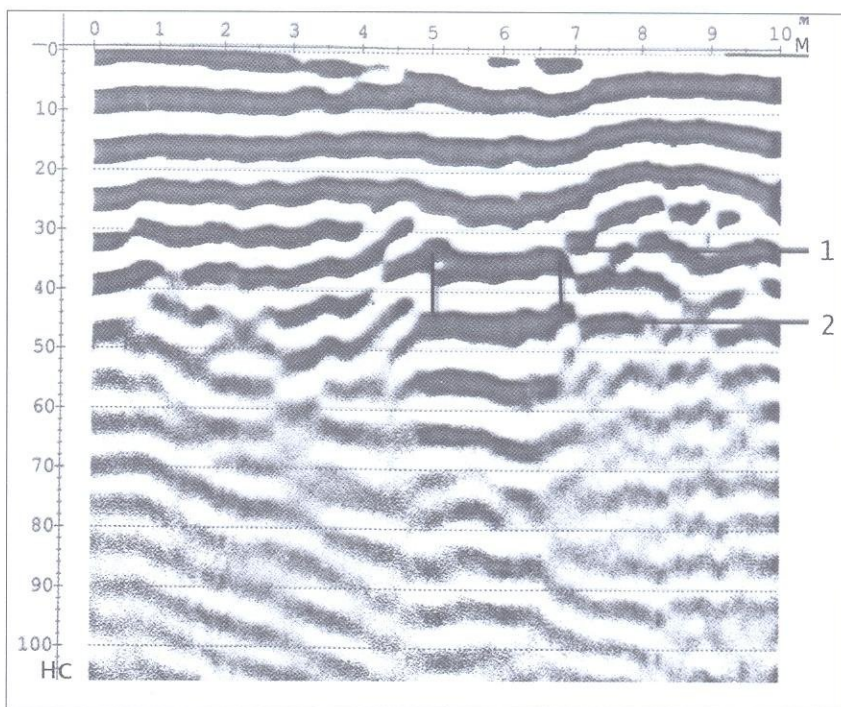


РИС. 6.8. Фрагмент георадиолокационного профиля, пройденного вдоль обрыва. Использовалась экранированная антенна 300 МГц. Разрез представлен изверженными породами. В стенке обрыва находится вход в пещеру, измеренная максимальная высота которой немного меньше 6 метров, что хорошо согласуется с высотой, 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 [39]

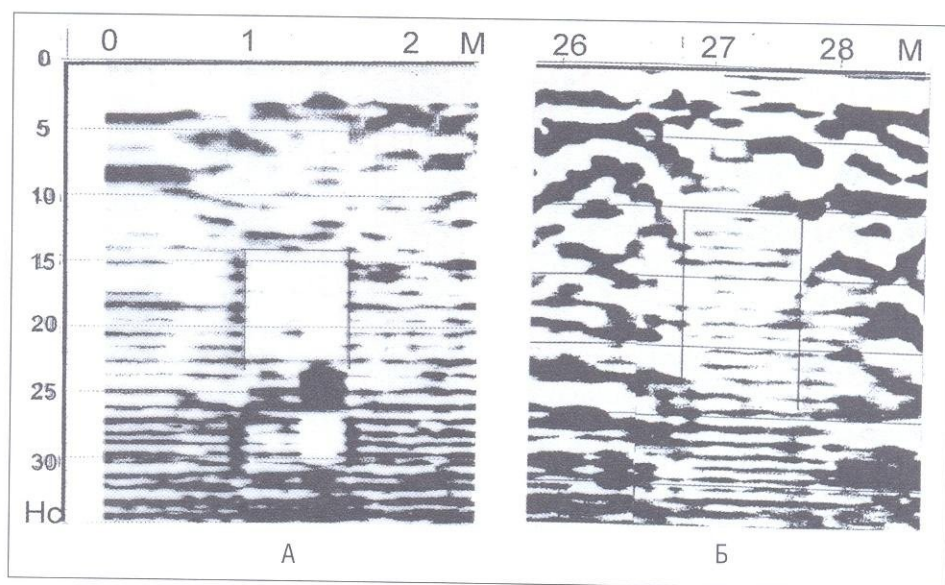
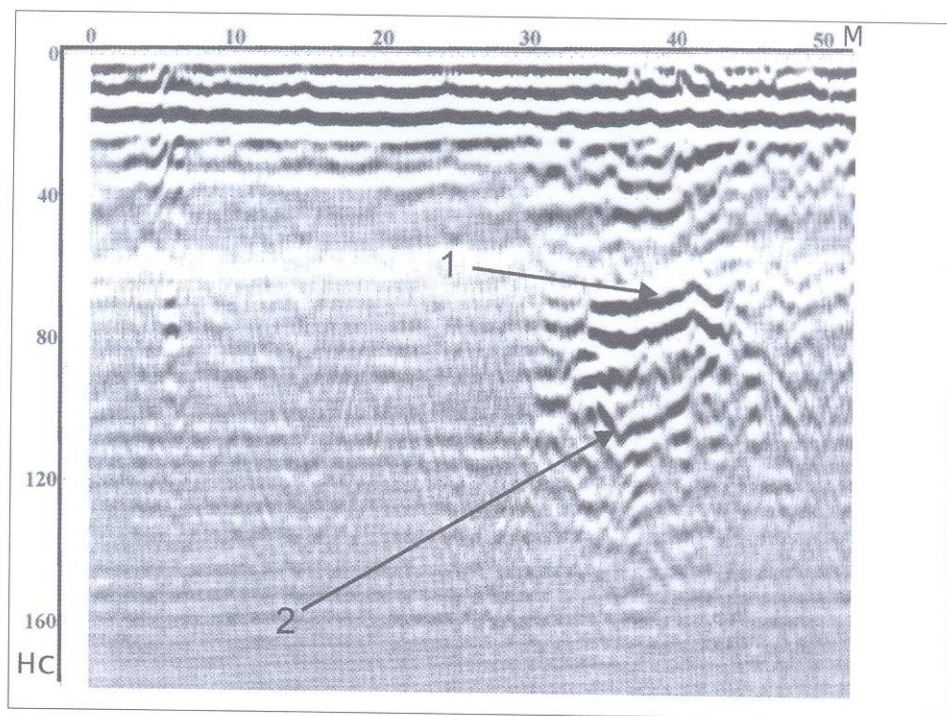


РИС. 6.9. Фрагменты георадиолокационных профилей, выполненных с антенной 900 МГц. Целью исследований было обнаружение остатков фундамента здания и их привязка на местности. План фундамента был известен. Сопоставление георадиолокационных данных и плана здания показало, что на радарограммах выделяются 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

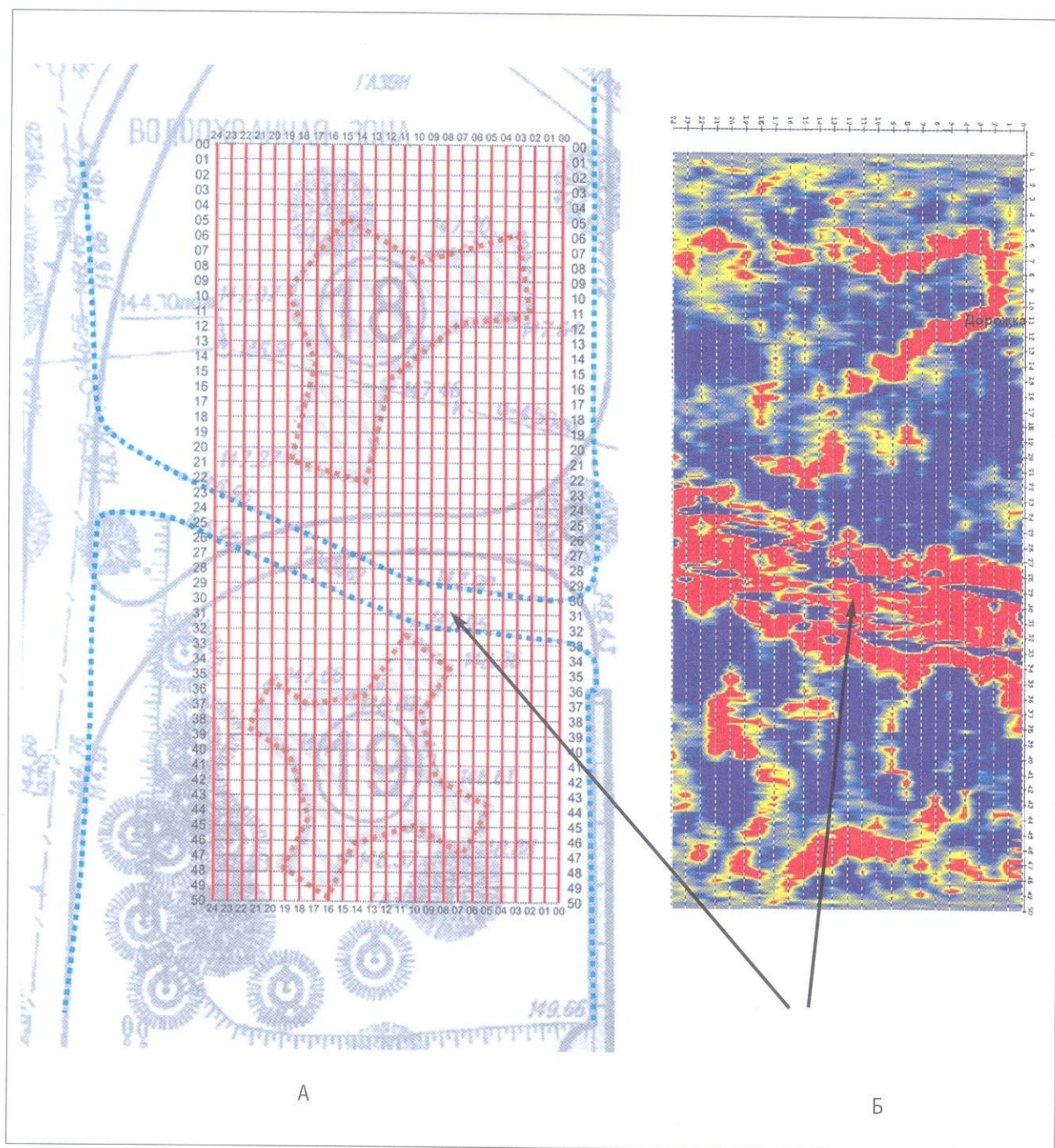


РИС. 6.10. Схема расположения георадиолокационных профилей и амплитудный горизонтальный срез. Цель исследований — привязка на местности остатков фундаментов разрушенных зданий (дворцово-парковый ансамбль Царицыно):

А — схема расположения профилей и планы фундаментов; Б — амплитудный горизонтальный срез по всему изученному участку. Яркая аномалия в центре участка совпадает с грунтовой дорожкой (показана стрелками). На правом рисунке (Б) отчетливо видны очертания фундаментов зданий, показанных на левом рисунке (А). Работы проводились зимой, высота снежного покрова около 40 см



В верхней части рисунка представлен горизонтальный амплитудный срез, на котором видно, что зоны высокоамплитудной записи, показанные синим цветом, имеют форму полукруга. Амплитудные аномалии привязаны к фундаменту, который на небольшом участке был вскрыт

Как видно, выделенные аномалии довольно хорошо совпадают с планом фундамента.

При поиске мест массовых захоронений использовался другой картировочный признак. Было сделано предположение о том, что нарушенная верхняя часть разреза по структуре волнового поля должна отличаться от участков, где залегают неизмененные грунты (рис. 6.13А).

Известно, что рвы, как правило, играют роль дренажных канав, вследствие чего уровень грунтовых вод (УГВ) часто имеет выгнутую форму. Оси синфазности, показанные на радарограмме стрелкой, по-видимому, соответствуют поверхности водонасыщенных отложений, т.е. УГВ (см. рис. 6.13А). По результатам георадиолокационных исследований было произведено вскрытие, которое подтвердило, что обнаруженные рвы являются местом массовых захоронений (рис. 6.13Б и В).

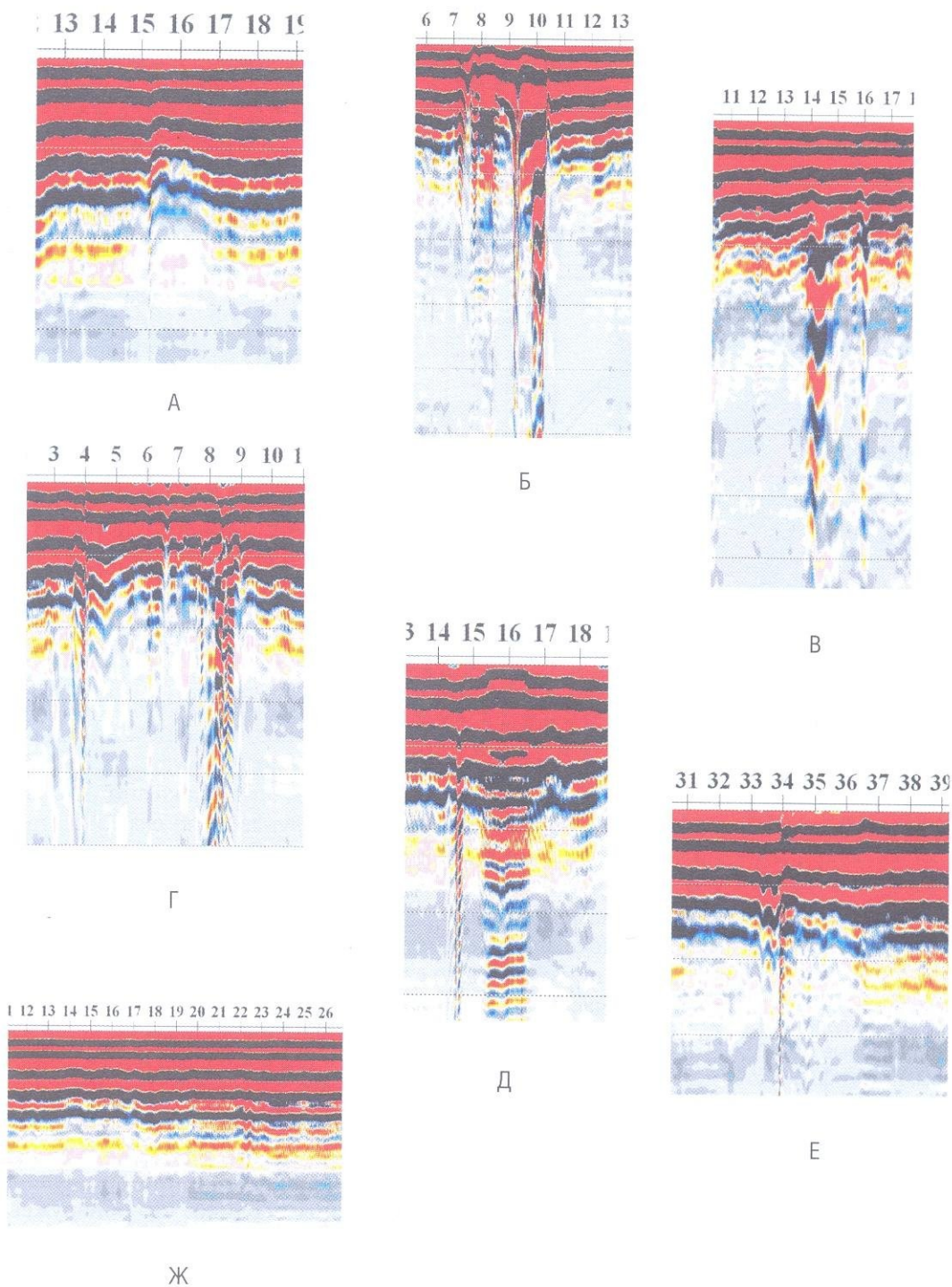


РИС. 6.12. Фрагменты георадиолокационных профилей с различными типами аномальных зон (А—Е) и участок без аномального типа записи (Ж)

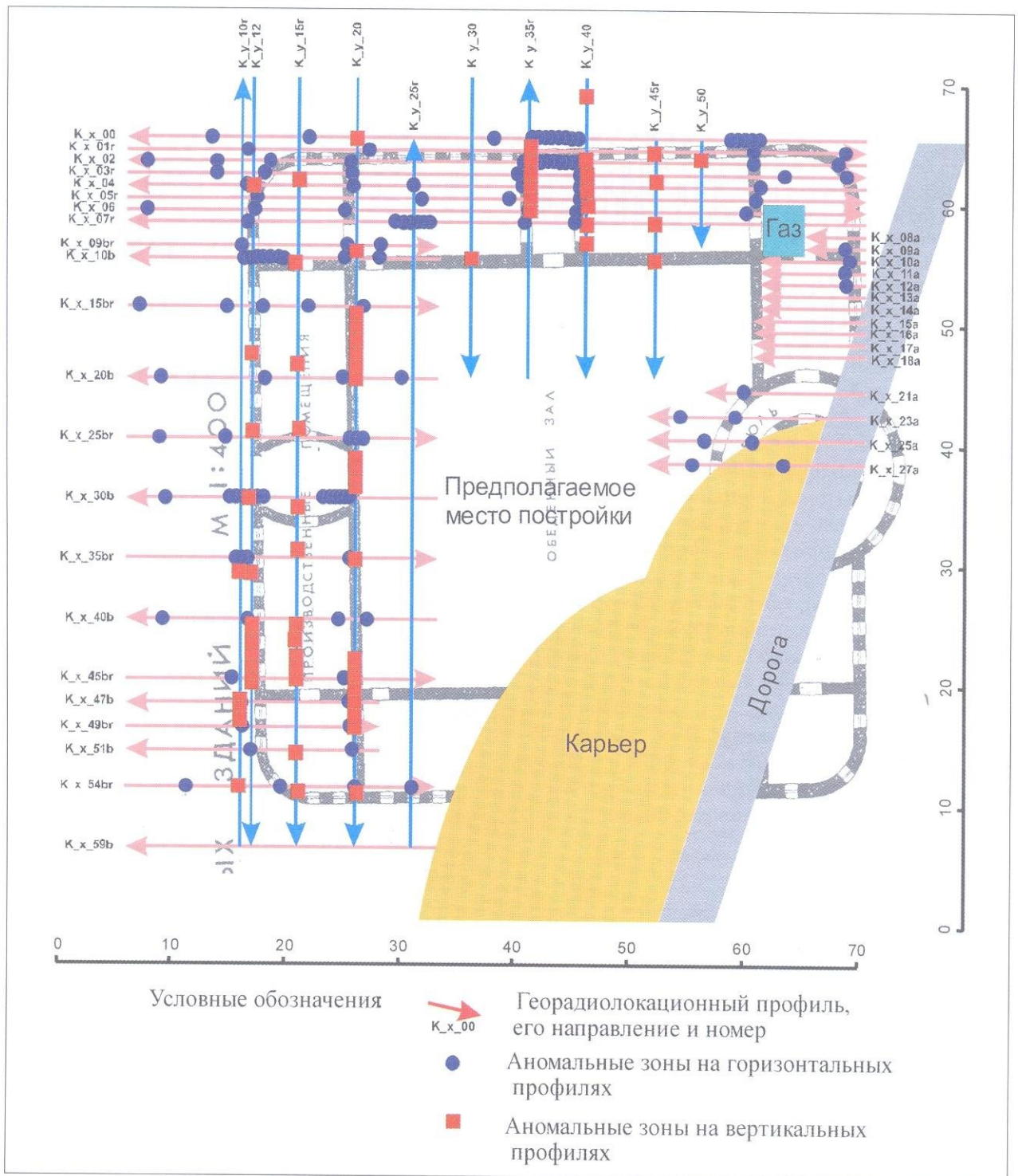
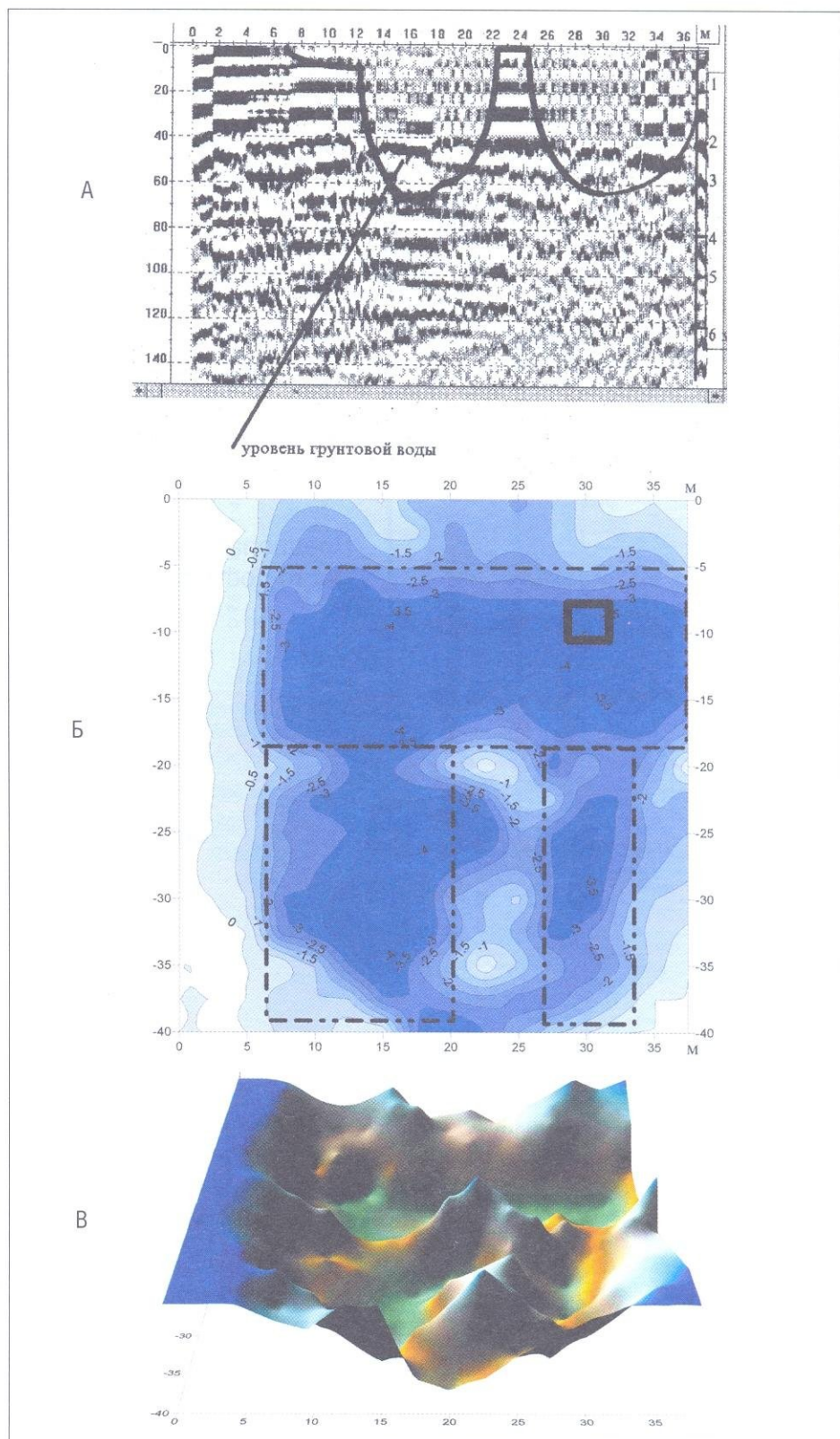


РИС. 6.13. Схема расположения георадиолокационных профилей с выделенными аномальными зонами, совмещенная с планом фундамента разрушенной постройки. На месте правого нижнего угла здания в настоящее время находится карьер

РИС. 6.14. Поиск мест массовых захоронений.

А — фрагмент радарограммы (стрелкой показан предполагаемый уровень грунтовых вод); Б — карта глубин до границ неизмененного грунта в метрах (пунктиром показаны контуры рвов, сплошной линией — место вскрытия захоронения); В — трехмерное изображение карты, показанной на рис. 6.13Б

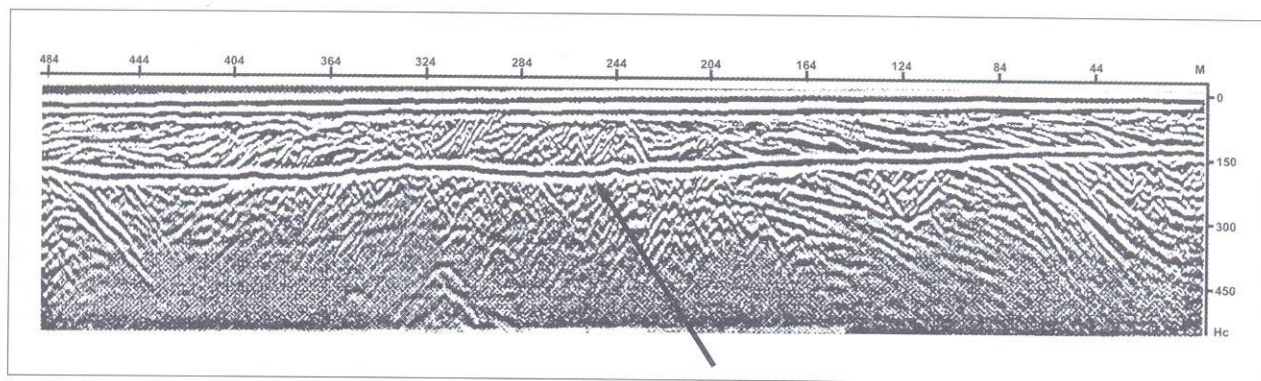


ГЛАВА 7. Гидро- геологические исследования

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 [3]. 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.

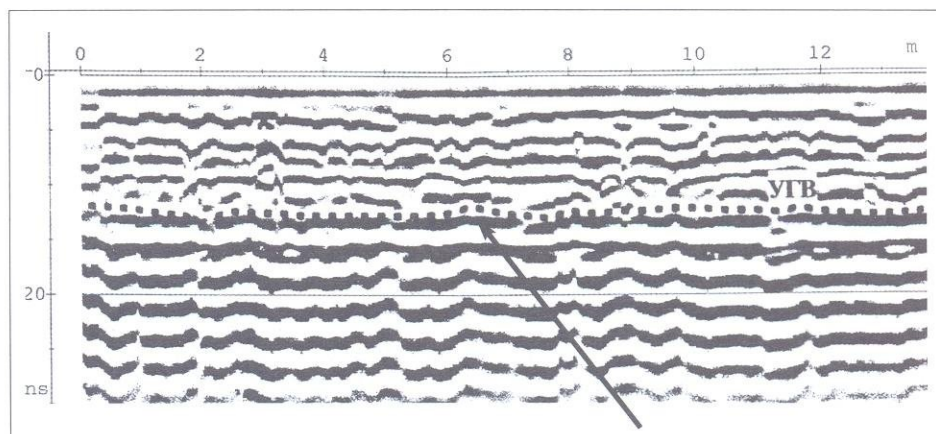
В терригенных разрезах, представленных песчано-глинистыми и более грубыми отложениями переход между зоной аэрации и влагонасыщенными породами будет более резким в грубозернистых отложениях — песках и галечниках. Иными словами, поверхность влагонасыщения на радарограммах будет представлена четкими протяженными осями синфазности большой амплитуды. 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, обусловленных литологическими границами и уровнем грунтовых вод, выделение УГВ значительно облегчается. На рис. 7.1 представлен разрез такого типа, сложенный супесями. Оси синфазности отраженных от УГВ волн большой амплитуды имеют субгоризонтальную форму, тогда как структура разреза довольно сложная.

РИС. 7.1. Выделение уровня грунтовых вод (показан стрелкой) в сложнопостроенном супесчаном разрезе



В некоторых случаях ниже границы УГВ наблюдается специфический тип волновой картины, который часто называют «звучащим» (рис. 7.2). Амплитуда и период этой «звучащей» записи с увеличением времени практически не меняются. Разрез представлен суглинками —

РИС. 7.2. Фрагмент радарограммы с характерным «звучащим» типом волновой картины ниже уровня грунтовых вод (УГВ показан стрелкой)

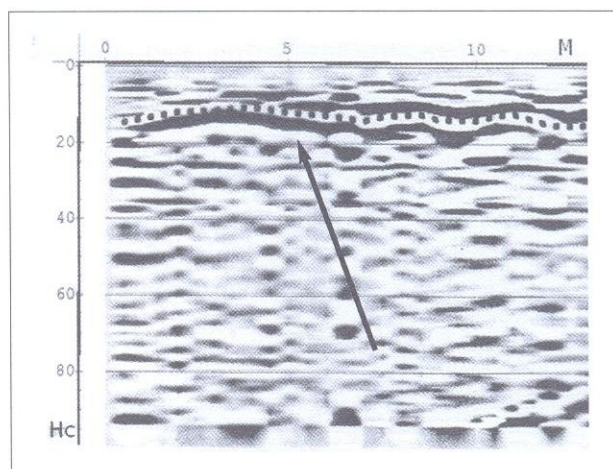


рядом с георадиолокационным профилем находился шурф — поэтому можно было провести прямое сопоставление волновой картины, литологии и степени водонасыщения.

При однородном строении разреза, сложенном, например, крупнозернистыми песками (рис. 7.3), в которых отсутствуют отражающие границы, оси синфазности отраженных от УГВ волн выделяются отчетливо.

РИС. 7.3. 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

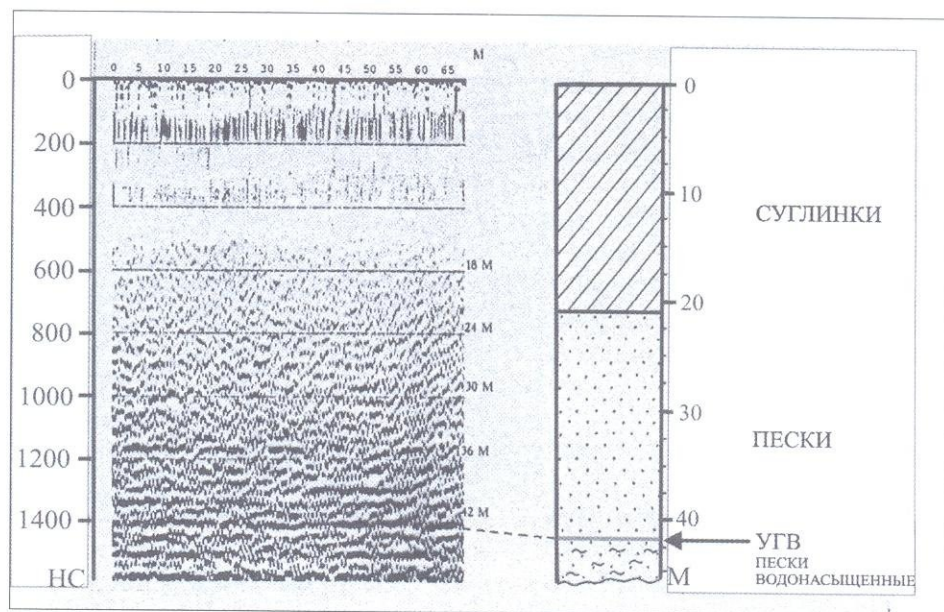


На приведенных выше радарограммах (рис. 7.1–7.3) УГВ находится на небольших глубинах (первые метры). Однако имеются георадары, которые позволяют выделять УГВ на больших глубинах. На рис. 7.4 показан фрагмент обработанного профиля, выполненного георадаром «Питон-02» (в настоящее время не выпускается). Уровень грунтовых вод по данным бурения находится здесь на глубине около 42 метров.

Если разрез сложен мелкозернистыми песками или супесями, то кроме осей синфазности, связанных с УГВ, на радарограммах могут выделяться оси синфазности или отмечаться изменения волновой картины, обусловленные капиллярным поднятием, причем высота капиллярного поднятия сильно зависит от гранулометрического состава отложений

РИС. 7.4. Выделение УГВ на больших глубинах. Использовался георадар «Питон-02» с антенным блоком 60 МГц.

Справа показан схематический геологический разрез. По данным бурения уровень грунтовых вод находится на глубине около 42 метров. Слева дана радарограмма после обработки. Наиболее протяженные оси синфазности на времени 1400 нс были приняты за УГВ (при пересчете в масштаб глубин использовалась средняя скорость распространения электромагнитных волн 6 см/нс, так как большая часть разреза водонасыщенная)



(см. Таблицу 7.1). С возрастанием дисперсности грунтов размер пор в них уменьшается, и в соответствии с этим увеличивается высота капиллярного поднятия. При наличии капиллярного поднятия граница между водонасыщенными отложениями и грунтами зоны аэрации может быть нечеткой («размытой»).

**ТАБЛИЦА 7.1.
Высота капиллярного
поднятия для некоторых
типов отложений [21]**

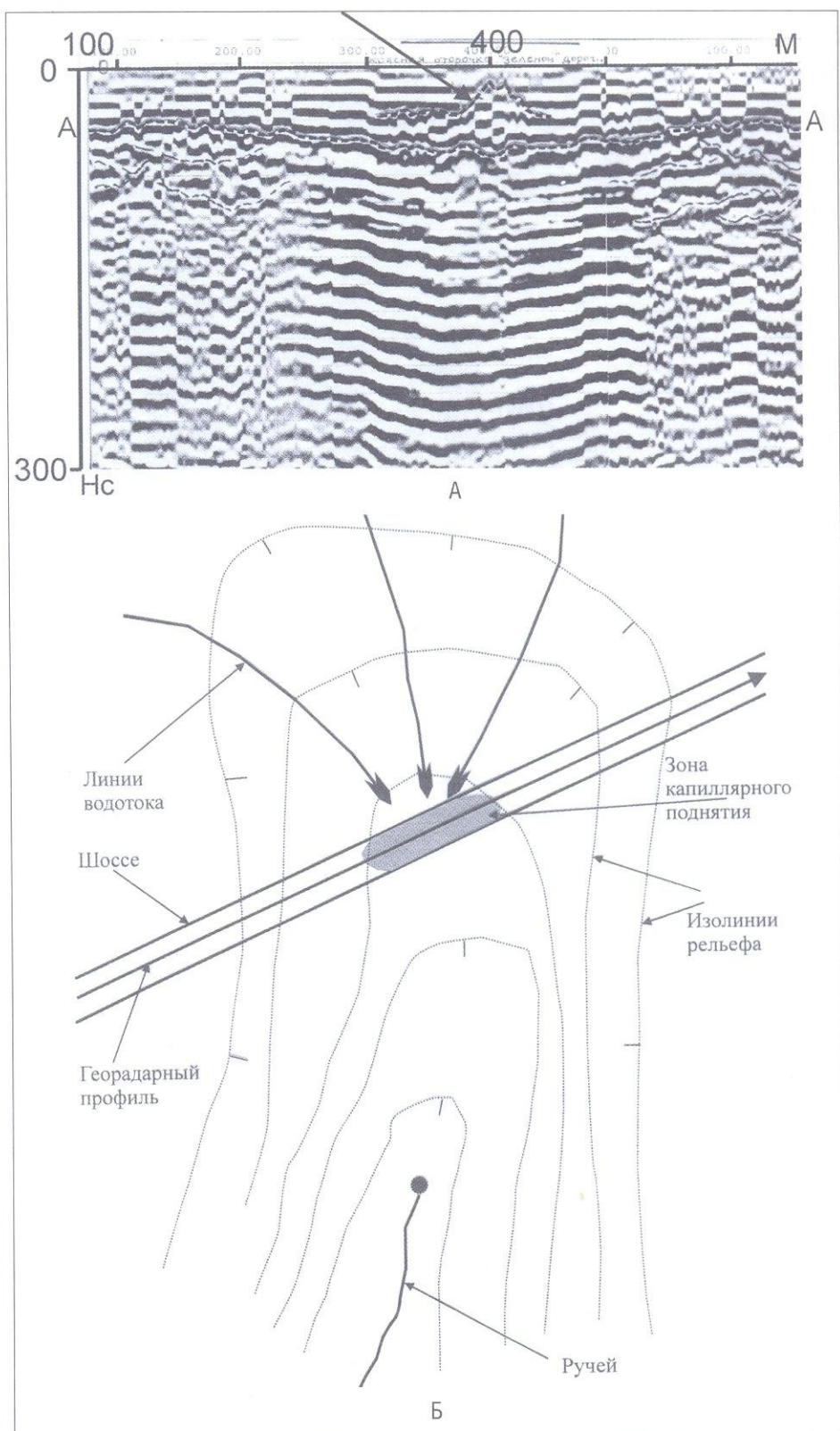
ТИП ОТЛОЖЕНИЙ	H_k , м
Песок крупнозернистый	0,02 – 0,04
Песок среднезернистый	0,15 – 0,35
Песок мелкозернистый	0,35 – 1,0
Супесь	1,0 – 1,5
Суглинок	3,0 – 4,0
Глина	до 8,0
Лессы	до 4,0 за два года

На рис. 7.5А представлена радарограмма, на которой предположительно выделяется зона капиллярного поднятия. Целью исследований было выяснение причины быстрого по сравнению с другими участками разрушения и деформации асфальтного покрытия автомобильной дороги, что предположительно увязывалось с близким залеганием грунтовых вод. Изучаемый фрагмент дороги находится в верховьях оврага (рис. 7.5Б). Ниже по склону в тальвеге оврага наблюдается выход грунтовых вод. Георадиолокационные исследования показали наличие здесь на глубинах 1,5–2,0 м границы сильного увеличения увлажнения, выделяющейся на радарограмме по интенсивным протяженным осям синфазности отраженных волн (отражающий горизонт А–А). Особенно отчетливо выделяется широкая отрицательная ось синфазности, расположенная

РИС. 7.5. Выделение зоны капиллярного поднятия:

А — фрагмент радарограммы (предполагаемая зона капиллярного поднятия показана стрелкой).

Линия А-А — граница УГВ; Б — схема расположения георадиолокационного профиля (объяснения см. в тексте)



немного ниже пунктирной линии А—А. В центральной части профиля (пикеты 250—530 м) наблюдается зона так называемой «звучащей» записи, которая, на основании опытно-методических работ в Западной Сибири (см. рис. 7.2), 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. По-видимому, для укрепления дорожного полотна на этом участке дороги необходимо устройство дренажной системы.

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.

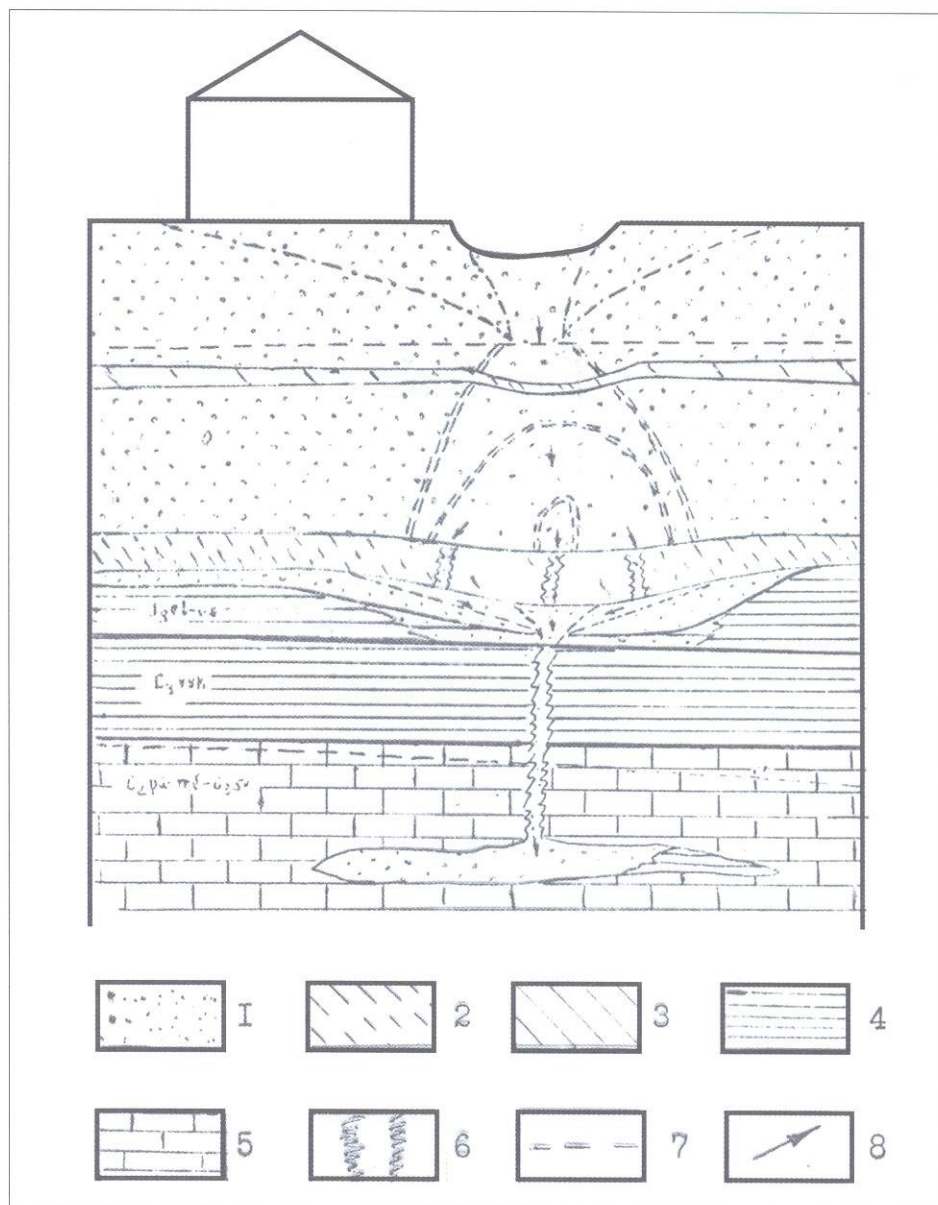
Наряду с такими довольно стандартными исследованиями часто возникает необходимость в обнаружении мест локального увлажнения, которые могут иметь место, например, при протечках на теплотрассах, что приводит к развитию процессов суффозии, образованию зон разуплотнения и, как правило, к проседанию грунтов, иногда очень быстрому. Суффозия зачастую связана с образованием карста. Схема механизма образования карстово-суффозионной воронки (по Кочеву А.Д. и др.) изображена на рис. 7.6.

Необходимо отметить, что карстово-суффозионные процессы наиболее интенсивно протекают в районах, где несвязные грунты залегают непосредственно на известняках и малопроницаемая покрывка в виде слоя глин отсутствует. В этом случае атмосферные и техногенные воды попадают непосредственно в карбонатные отложения и скорость этих процессов резко возрастает. Большую скорость и масштабность эти процессы приобретают также при значительных откачках грунтовых и напорных вод из скважин и резком понижении УГВ [15]. Следствием карстово-суффозионных процессов являются деформации земной поверхности, которые приводят к частичному или полному разрушению зданий и других сооружений. Таким образом, исследование этих процессов и оценка территории с точки зрения их развития являются крайне важными задачами инженерно-геологических изысканий. Ниже будут приведены некоторые материалы, которые позволяют, на наш взгляд, наметить пути решения этой сложной задачи с помощью георадиолокации.

Известно, что большую роль в развитии карстово-суффозионных процессов играет вода, поэтому поиск зон влагонасыщения, особенно локальных (обусловленных, например, протечками в теплотрассах), име-

РИС. 7.6. Схема механизма образования карстово-суффозионной воронки:

1 — пески; 2 — супеси; 3 — суглинки; 4 — глины; 5 — известняки; 6 — нарушенные трещиноватые зоны; 7 — уровень залегания грунтовых вод; 8 — направление движения масс песчаных пород



ет большое значение. Таким образом, задачу обнаружения таких зон можно свести к картированию мест локального увлажнения, которые должны выделяться пониженными значениями скоростей распространения электромагнитных волн и, по-видимому, какими-то особенностями волновой картины. На одном из участков, где произошло образование провала вследствие аварии на теплотрассе (разрыва трубы с горячей водой), было выполнено несколько георадиолокационных профилей с экранированной антенной 300 МГц. В данном районе разрез представлен мощной толщей песков (около 28 метров) различного гранулометрического состава, которые залегают на сильно разрушенных карбонатах. Карстово-суффозионные провалы различного масштаба происходят здесь

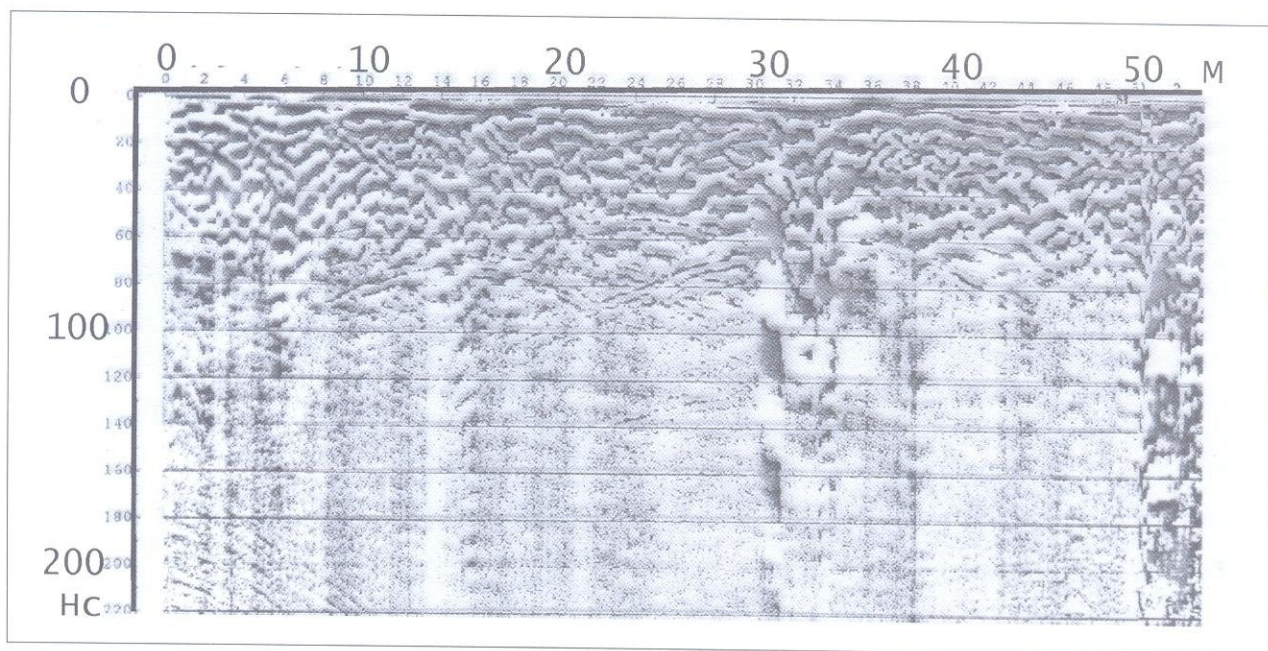


РИС. 7.7. Фрагмент исходного георадиолокационного профиля с двумя ярко выраженными зонами низкочастотной записи (пикеты 30–35 и 50–52 м). Профиль выполнен с экранированной антенной 300 МГц. Разрез представлен песками различного гранулометрического состава.

Правая часть профиля (пикеты 50–52 м) расположена вблизи провала, образовавшегося вследствие аварии на теплотрассе (разрыв трубы с горячей водой). Профиль показан без обработки

постоянно. Один из профилей был пройден рядом с провалом (рис. 7.7, пикеты 50–52 м). Анализ волновой картины на исходной полевой записи (без предварительной фильтрации) по этому профилю показал, что на участке профиля, расположенном рядом с провалом, и на некоторых других профилях, выделяются зоны характерной низкочастотной записи (20–50 МГц), которая начинается с глубины около 1,5–2,0 метров, т.е. с глубины заложения данных трубопроводов. Особенно уверенно зоны низкочастотной записи выделяются на профилях после преобразования Гильберта (рис. 7.8А). На этом же георадарном профиле по 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 (рис. 7.8Б). 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 (рис. 7.9).

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 (рис. 7.12). Таким образом, можно отметить, что картировочным признаком увлажненных пород на приведенных выше георадиолокационных профилях, является появление низкочастотной записи. Физического объяснения образования данного эффекта в настоящее время нами не найдено, однако во всех случаях, когда

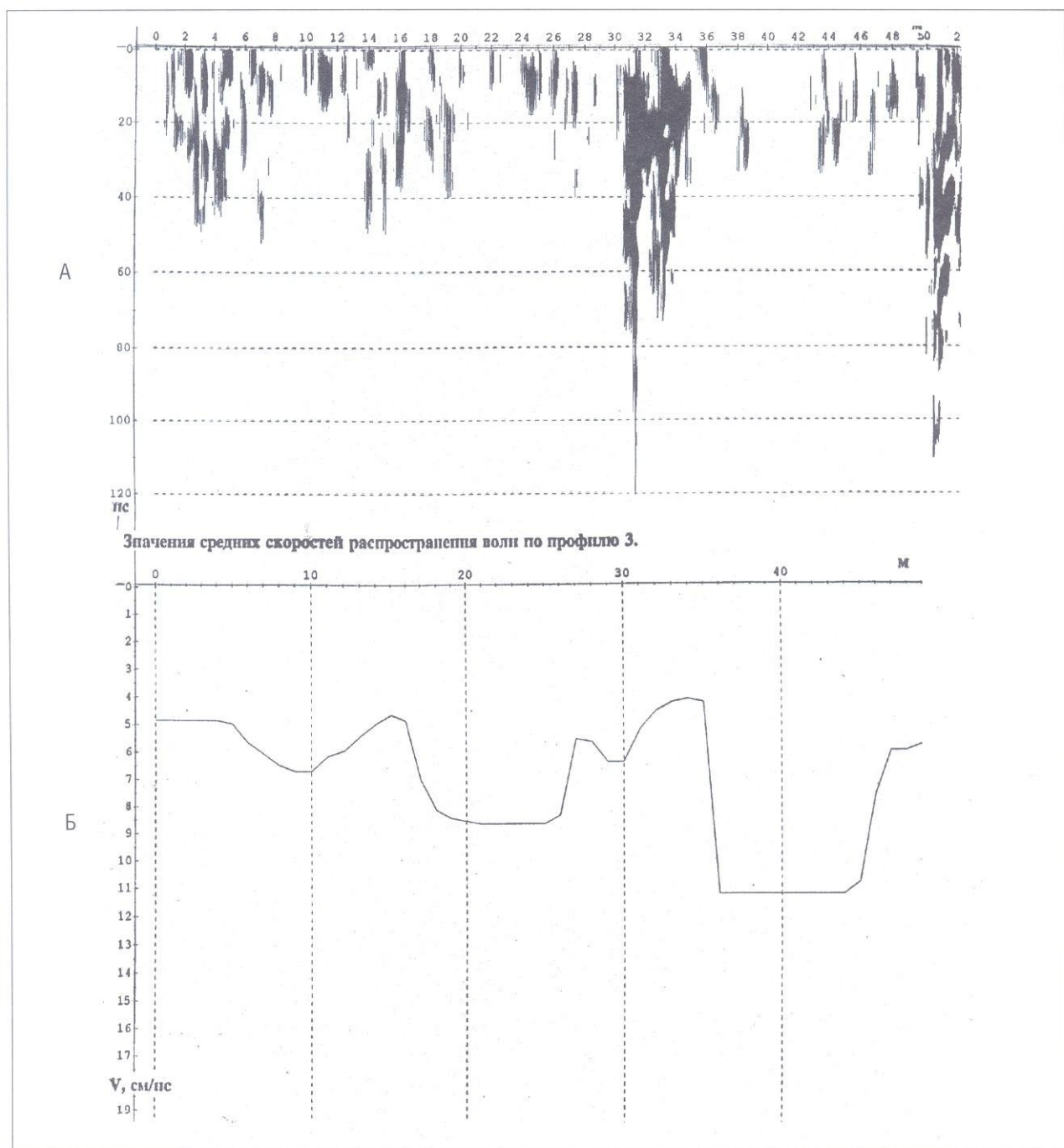


РИС. 7.8. Георадиолокационный профиль, изображенный на рис. 7.7, после преобразования Гильберта (А). График значений средних скоростей распространения электромагнитных волн по этому же профилю (Б).

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/мс, 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. 7.9. Фрагмент исходного георадиолокационного профиля вдоль теплотрассы.

Стрелкой показан участок с низкочастотной записью, по которой была выделена зона повышенного увлажнения. Вскрытие показало наличие каверн в трубе, через которые и происходила протечка воды

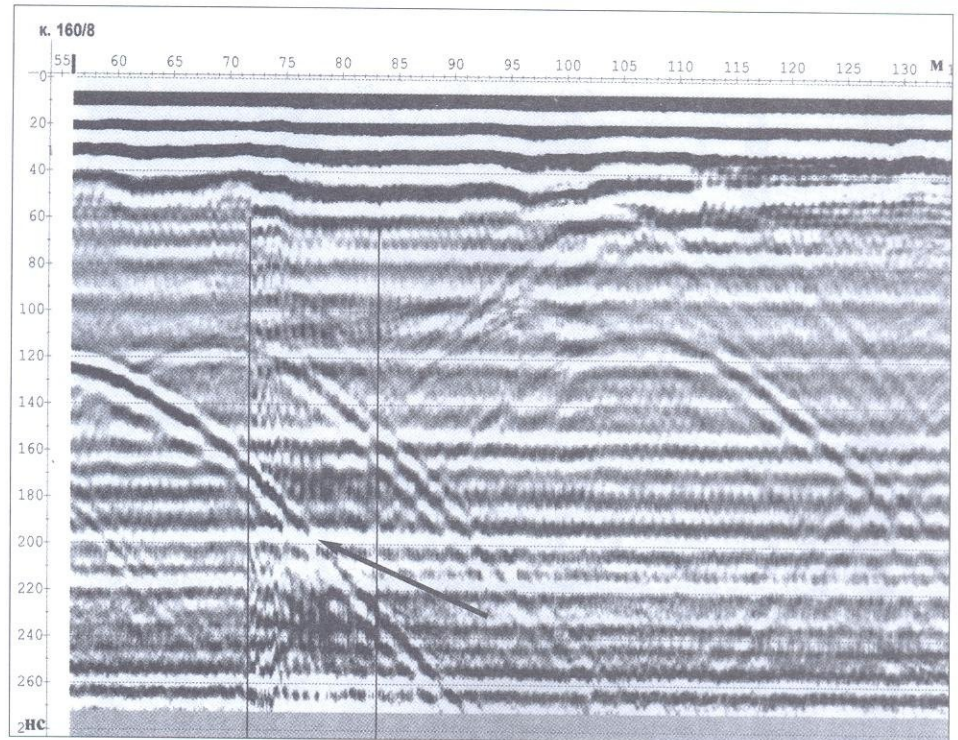
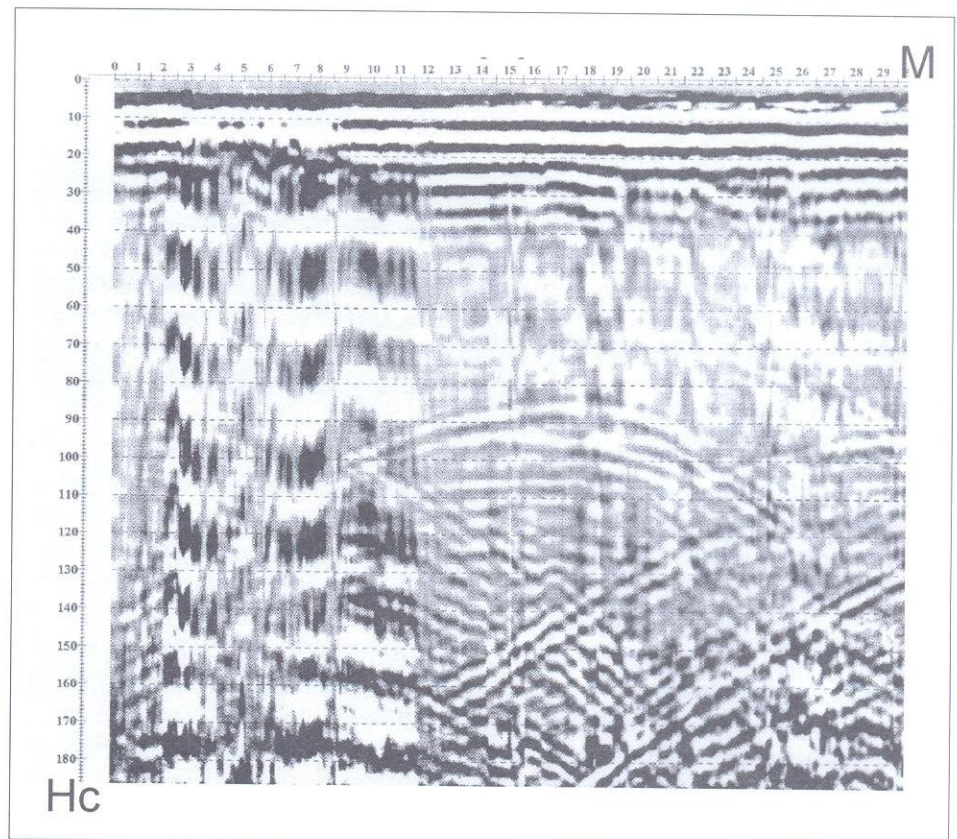


РИС. 7.10. Фрагмент исходного георадиолокационного профиля по земляной плотине. Использовалась антенна 300 МГц.

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.

Осмотр этого участка плотины подтвердил наличие протечки



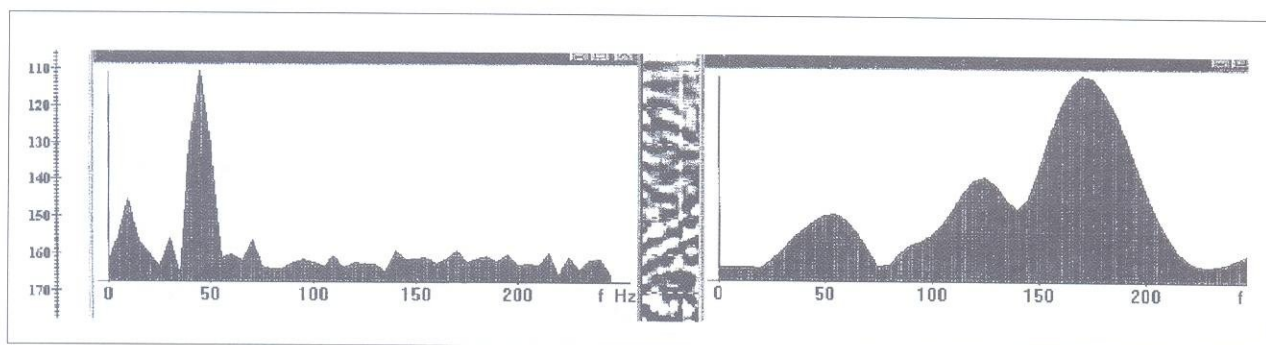


РИС. 7.11. Спектры участков записи левой части профиля, изображенного на рис. 7.10, где низкая частота выражена отчетливо (А), и правой части (Б). Использовалась экранированная антенна 300 МГц

удавалось сделать заверку на участке распространения низкочастотной записи, везде отмечалось увеличение увлажнения.

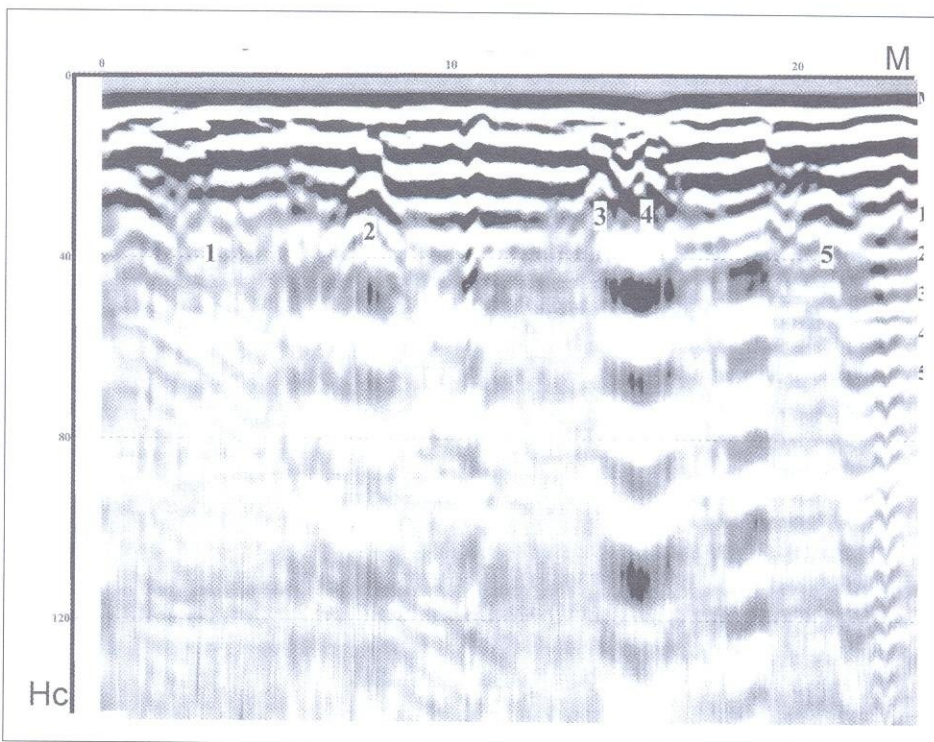
На рис. 7.11 показаны спектры сигнала участков с низкочастотной записью (А) и без нее (Б), определенные на профиле, пройденном по земляной плотине (исходную запись см. на рис. 7.10)

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. 7.1, 7.2, 7.7, 7.10). В некоторых случаях зоны локального увлажнения более отчетливо наблюдаются на георадарограммах после преобразования Гильберта (рис. 7.8А).

РИС. 7.12. 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 вдоль профиля 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)



ГЛАВА 8. Геологические исследования

Опытно-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 [9, 16, 25, 27, 37, 38, 42]. Основными задачами, решаемыми с помощью метода георадиолокации, являются следующие: детальное изучение геологического строения разреза как на суше, так и на пресноводных акваториях; поиск россыпных месторождений; изучение карстово-суффозионных процессов; выделение зон трещиноватости и разрывных нарушений; поиск участков углеводородного загрязнения; определение мощности техногенных грунтов и т.д. 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 пресноводных акваториях, 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. В Части I 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 (Глава 6, рис. 6.1б), 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.

Границы между георадарными комплексами на приведенных ниже примерах проведены с использованием методических приемов, изложенных в Главах 3 и 4. Подробный анализ волновой картины будет приводиться только для объяснения сложных, по нашему мнению, ситуаций. В основном при обсуждении материалов внимание будет акцентировано на отдельных особенностях волновой картины, важных для ее понимания. Примеры подбирались с тем расчетом, чтобы продемонстрировать не только возможности георадиолокационного метода исследований, но и одновременно показать области его применения.

На рис. 8.1 показан фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного через участок с интенсивным проявлением карстово-суффозионных процессов. Работы выполнялись с целью обнаружения карстоопасных участков. На разрезе 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 появлени-

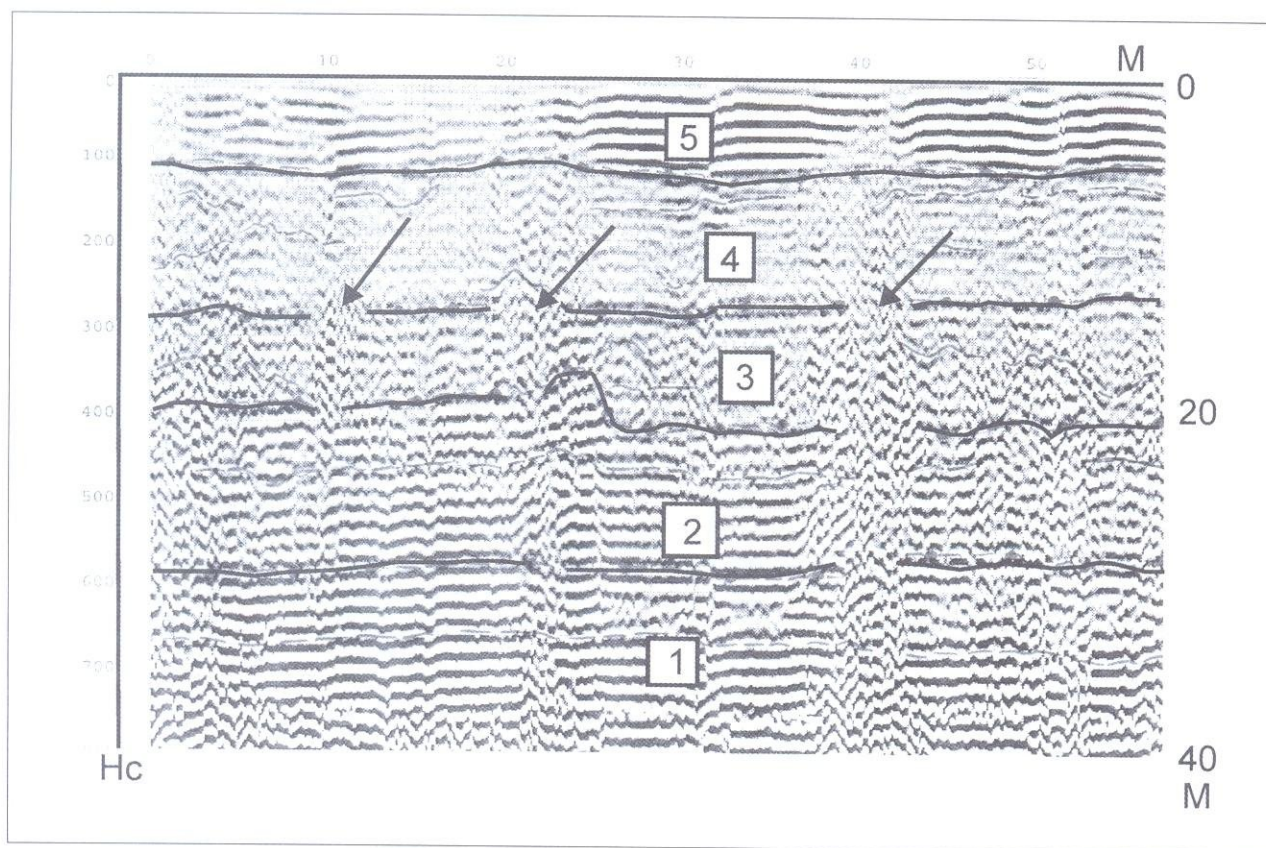


РИС. 8.1. Фрагмент радарограммы, полученной с антенной 75 МГц (георадар ГРЛ-2). Цель исследований — поиск карстоопасных участков.

Стрелками показаны вертикальные зоны, предположительно принятые за зоны проявления карсто-суффозионных процессов. Вертикальный масштаб справа дан в метрах, исходя из средней скорости распространения электромагнитных волн 10 см/нс

ем 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 — сравни, 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, наблюдается отсутствие протяженных осей синфазности отраженных волн, особенно отчетливо видимое на границе толщ 2–3 и 3–4 и иногда уменьшается их амплитуда. 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.

На рис. 8.2 представлен фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного с целью поиска толщ, сложенных конгломератами, перспективными на полезные ископаемые. Выделено 3 георадарных комплекса. Нижний георадарный комплекс 1 выделяется по отсутствию осей синфазности отраженных волн и меньшей интенсивностью запи-

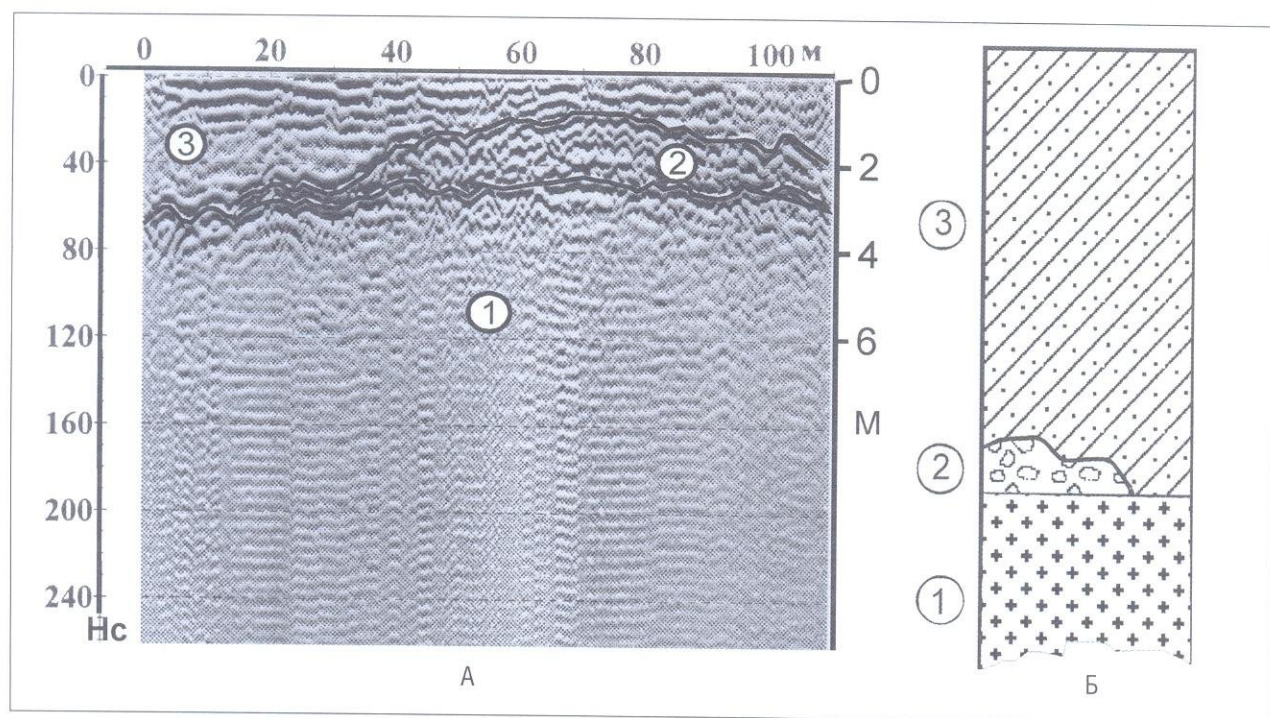


РИС. 8.2. Фрагмент георадарного профиля, выполненного с экранной антенной 300 МГц.

А — профиль, Б — геологический разрез. Цель исследований — поиск толщ, сложенных конгломератами, перспективными на месторождения полезных ископаемых. Глубинный масштаб рассчитан исходя из средней скорости $V=10$ см/нс

си по сравнению с вышележащими комплексами. В его кровле наблюдаются многочисленные «усы» дифракции, что свидетельствует о ее сложном рельефе. 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.

При строительстве различных сооружений часто необходимо определить мощность техногенных грунтов, т.е. определить глубину залегания кровли коренных отложений. На рис. 8.3 показан пример решения подобной задачи.

Весьма эффективна георадиолокация при определении мощности торфа и глубины залегания минерального дна (рис. 8.4). Вследствие высокой влажности слоя торфа его подошва часто является очень контрастной границей по электрофизическим свойствам и уверенно выделяется на радарограммах.

Георадары давно и успешно применяются при изучении толщины и внутреннего строения ледниковых покровов [2, 14]. Разработанные специалистами из разных стран георадары позволяют исследовать лед-

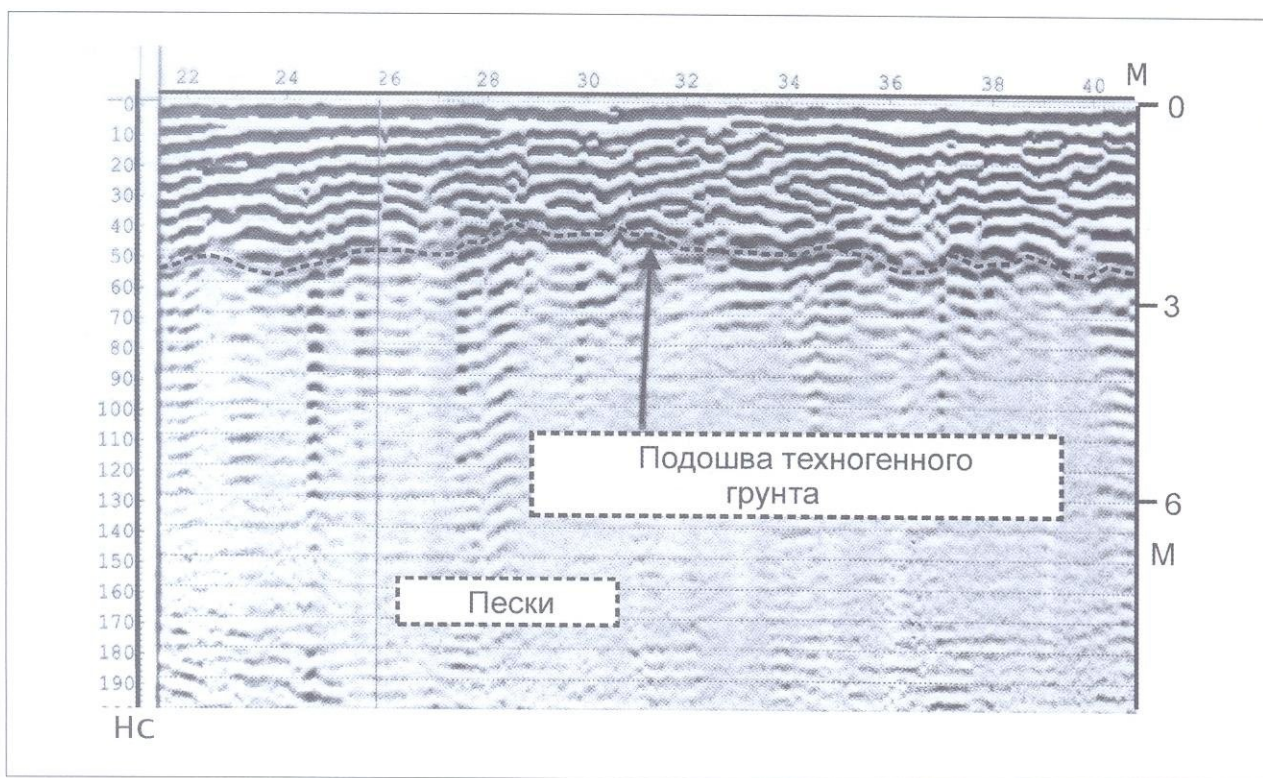


РИС. 8.3. Фрагмент георадиолокационного профиля, пройденного с антенной 300 МГц. Цель исследований — определение мощности техногенного грунта.

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

ники мощностью до 3000–4000 метров с достаточно высоким разрешением по вертикали. Выделяемые отражающие горизонты служат важными реперами при корреляции данных исследований ледяных кернов из глубоких скважин. Пример радарограммы через ледник представлен на рис. 8.5.

На рис. 8.7 и 8.8 приведены примеры георадиолокационных исследований на загрязненных углеводородами участках. В большинстве случаев оконтуривание в плане и по глубине загрязненных участков представляет очень сложную задачу и требует дальнейшего изучения.

Наиболее благоприятными разрезами для проведения георадиолокационных работ, являются разрезы, сложенные разнообразными сухими песками. Глубинность исследований на таких участках может достигать

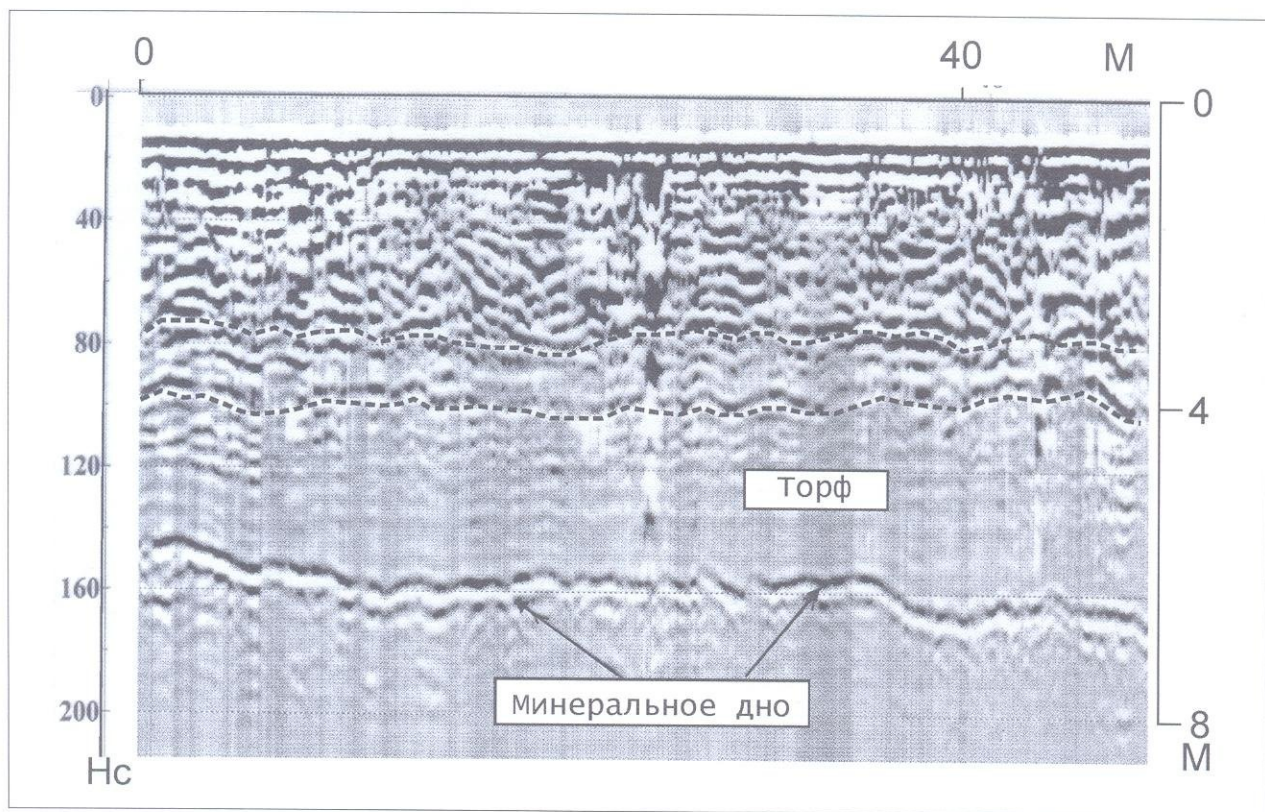


РИС. 8.4. Фрагмент георадарного профиля по болоту (Западная Сибирь), выполненного с экранированной антенной 300 МГц. Целью исследований было определение мощности слоя торфа.

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 выделяются 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

12–15 метров. На рис. 8.6, несмотря на благоприятный разрез, глубина исследований ограничена глубиной залегания соленых вод — профиль находится недалеко от берега моря. Особенно это заметно в левой части профиля, где глубинность уменьшается практически до 1 метра. На рис. 8.9 УГВ находится достаточно глубоко, глубинность здесь около 7 метров и запись ограничена только вертикальной разверткой. Значимого уменьшения амплитуды отраженных волн в нижней части профиля не наблюдается, поэтому, если бы вертикальная развертка была больше, глубина исследований, по-видимому, была бы максимальной.

При добыче строительных материалов и сооружении различных объектов часто необходимо знать положение зон трещиноватости в гор-

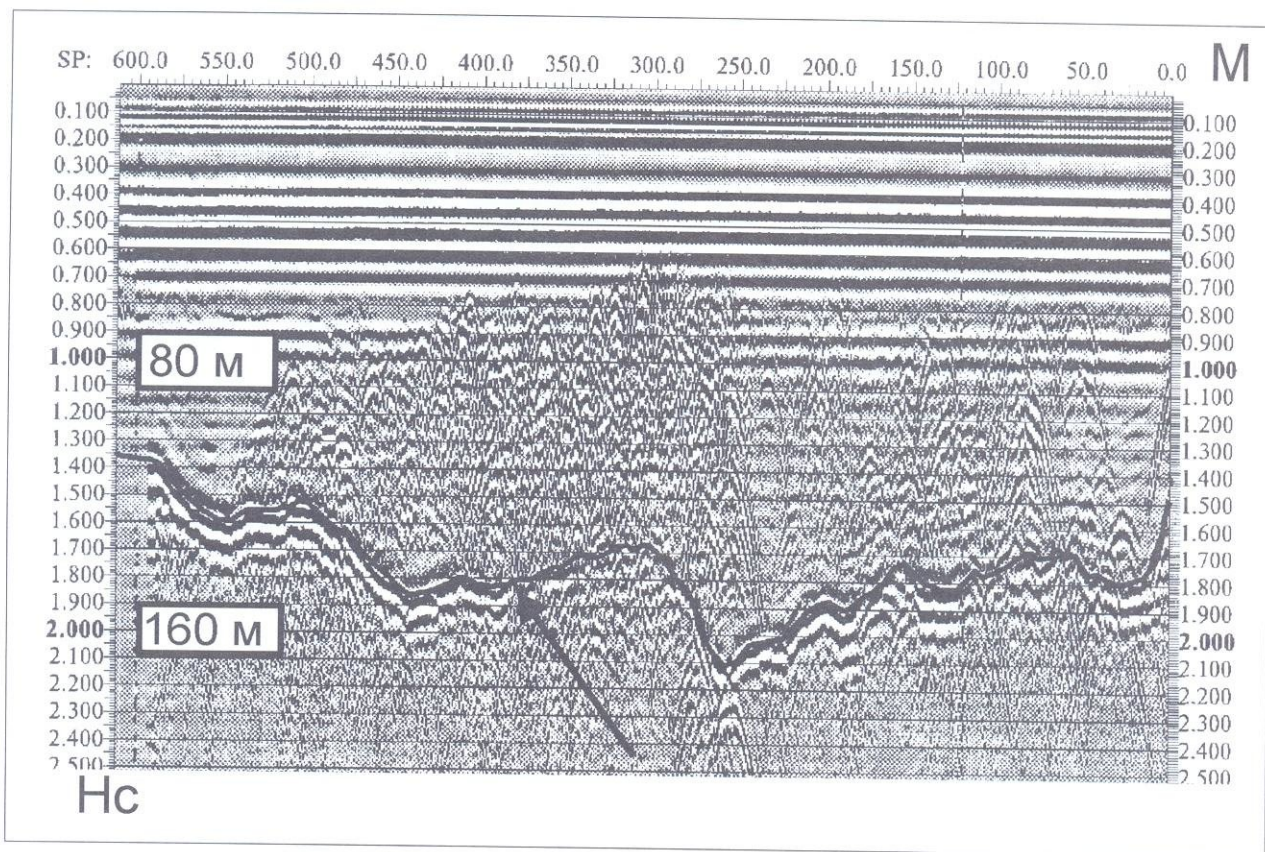


РИС. 8.5. Фрагмент георадиолокационного профиля через ледник, выполненный с антенной 40 МГц (георадар ВИРЛ-2, материалы Ю.Я.Мачерета).

Стрелкой показаны оси синфазности отраженных от ложа ледника волн. Внутри ледника наблюдаются неоднородности, обусловленные, по-видимому, различным состоянием и структурой льда. Скорость распространения волн $V=16,5$ см/нс

ных породах, ширину отдельных трещин и их простирание. Особенно большое значение это имеет при разработке пород (гранитов, мрамора и др.), использующихся для производства облицовочной плитки. Очевидно, что отображение трещин на георадиолокационных данных должно определяться их шириной, материалом заполнителя, наличием в них воды и т.д. Ниже на рис. 8.11 и 8.12 даны примеры радарограмм, полученных при изучении трещин (пояснения даны в подрисовочных подписях). Выделение разрывных нарушений производится по тем же признакам, как и при интерпретации сейсмических данных: по разрывам осей синфазности, их смещению или резкому изменению углов наклона, образованию дифрагированных волн в плоскости сместителя, уменьшению амплитуды и т.д. Пример выделения разрывов представлен на рис. 8.13.

При проведении исследований неоднократно было отмечено, что при изучении песчаных разрезов на соответствующих им на радарограммах участках записи часто выделяются оси синфазности отраженных волн, хотя, судя по описаниям, пески представлены литологически однородными толщами. Можно предположить, что, на георадиолокационных профилях выделяются такие тонкие особенности строения песков (небольшие изменения гранулометрического состава, изменение степени ожелезнения и т.д.), которые сложно определить визуально без специальных лабораторных исследований. Примером подобной ситуа-

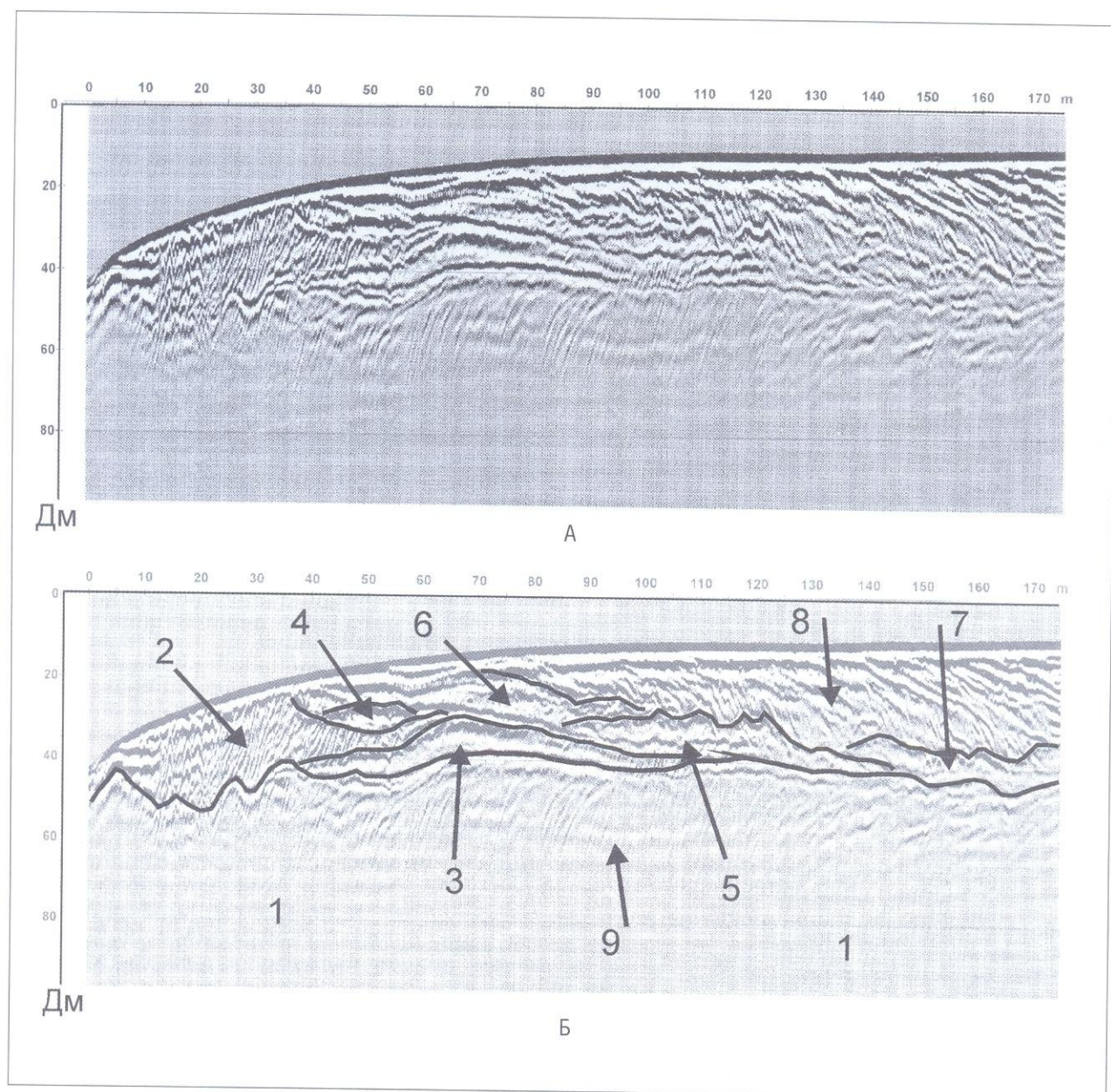


РИС. 8.6. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного с экранированной антенной 300 МГц (А – профиль, Б – интерпретация).

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 соленых вод (профиль начинается у озера Большое Турали и оканчивается у берега Каспийского моря)

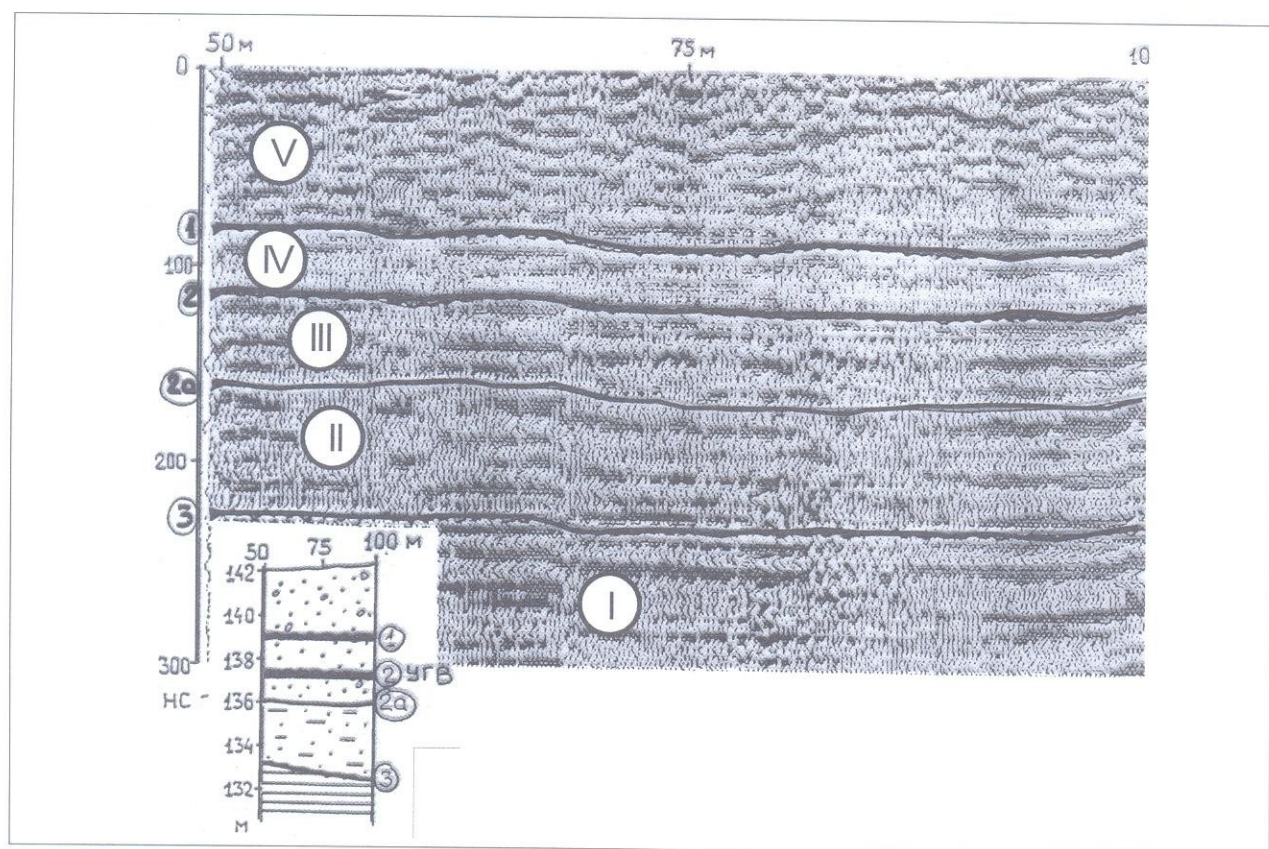


РИС. 8.7. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного с антенной 75 МГц. Профиль расположен на территории нефтеперерабатывающего завода. Цель исследований — изучение возможностей георадиолокации при выделении зон загрязнения нефтепродуктами.

Слева во врезке дан схематический геологический разрез (скважины находятся на расстоянии около 25 метров от георадарного профиля). Известно, что у чистой нефти низкие значения диэлектрической проницаемости (2,5), т.е. скорость распространения электромагнитных волн очень высокая. 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 (должны отмечаться в слое, расположенном над картиной по профилю позволил выделить 5 георадарных комплексов (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

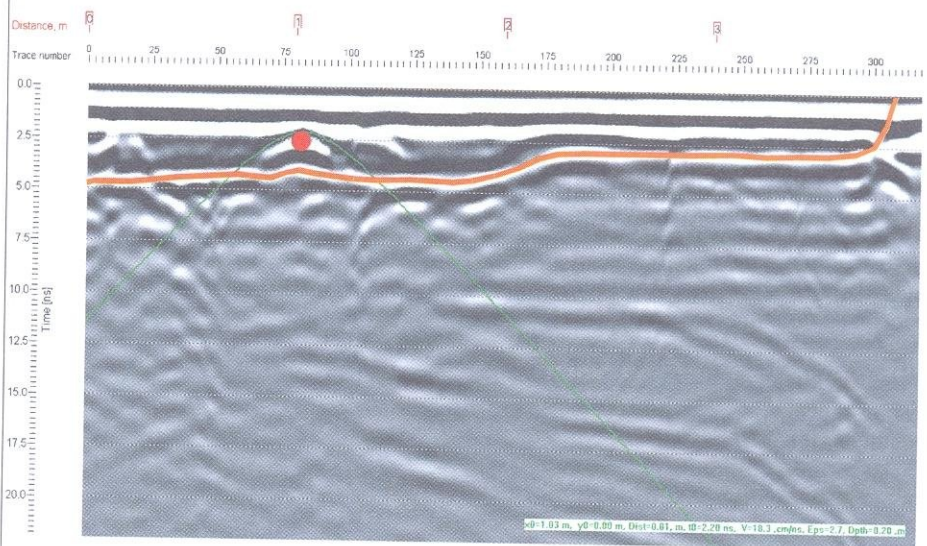
оценки этих параметров приведена в Главе 4): комплекс V — $\epsilon' = 18,4$, $V = 7,0$ см/нс; комплекс IV — $\epsilon' = 5,8$, $V = 12,5$ см/нс; комплекс III — $\epsilon' = 39,0$, $V = 4,8$ см/нс; комплекс II — $\epsilon' = 9,5$, $V = 9,7$ см/нс. Глубины залегания границ между комплексами (цифры в кружках) равны: 1 — 3,0 м; 2 — 5,0 м; 2a — 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 [37]).

РИС. 8.8. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного с экранированной антенной 2000 МГц через слой битума. Цель исследований — определение объема разлившегося вследствие аварии битума.

А — фото участка работ (стрелка показывает на разлившийся битум); Б — георадиолокационный профиль. Оранжевая линия — подошва слоя битума, в котором выделен дифрагирующий объект (красный кружок). По осям синфазности дифрагированных волн была оценена скорость электромагнитных волн в битуме — 18 см/нс



А



Б

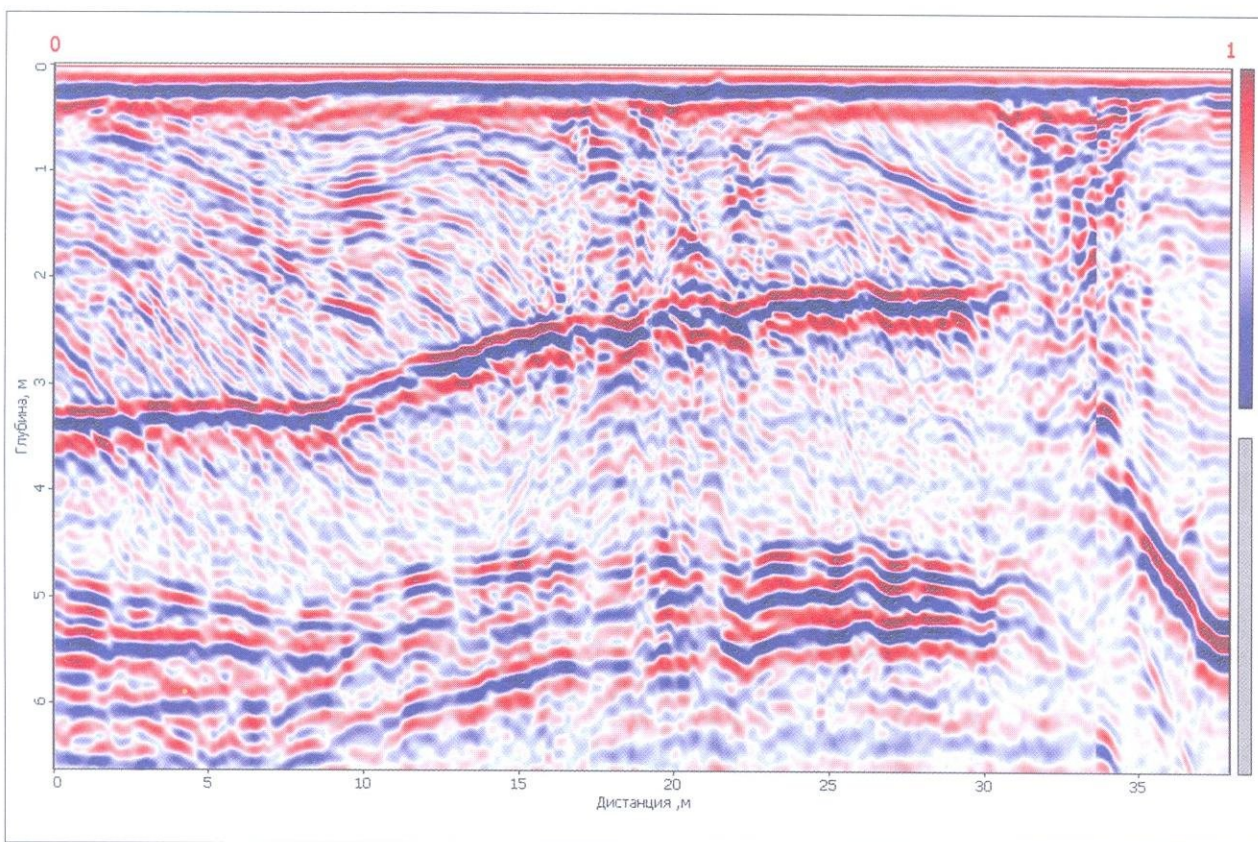
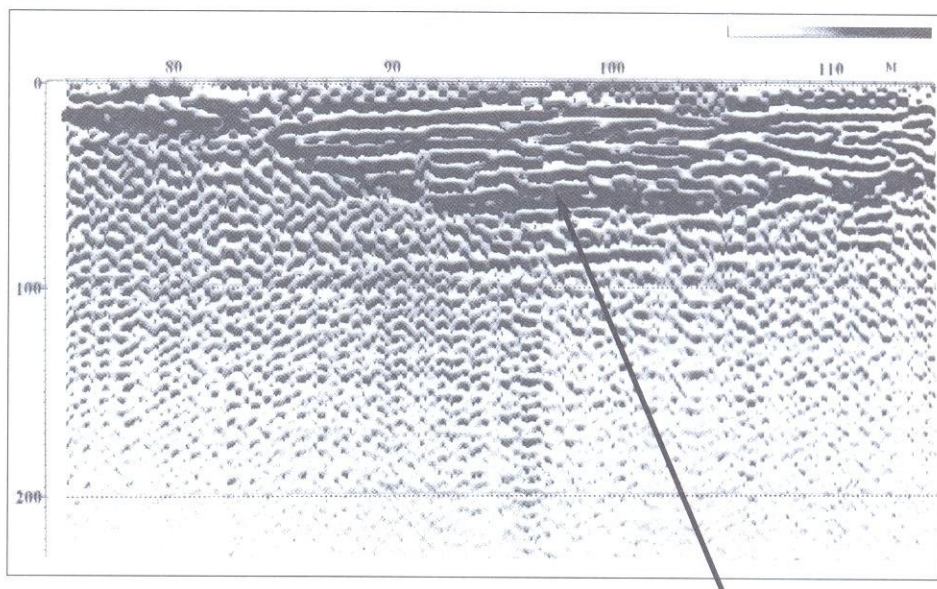


РИС. 8.9. Георадиолокационный профиль, пройденный по песчаным прибрежноморским отложениям.

По угловым несогласиям отчетливо выделяются несколько георадарных комплексов, различающихся также по особенностям внутреннего строения (субгоризонтально залегающие, косослоистые и т.д.). Материалы предоставлены Ю.П. Кропачевым (ВСЕГЕИ)

РИС. 8.10. Фрагмент георадиолокационного профиля по мелководным известнякам, подошва которых показана стрелкой.

Выделено два георадарных комплекса: нижний сложен преимущественно засоленными глинами с тонкими прослоями песчаника, верхний — мелководными карбонатами. В известняках отчетливо видна слоистость, глины характеризуются нечитаемой записью (см. Главу 6, рис. 6.1Б)



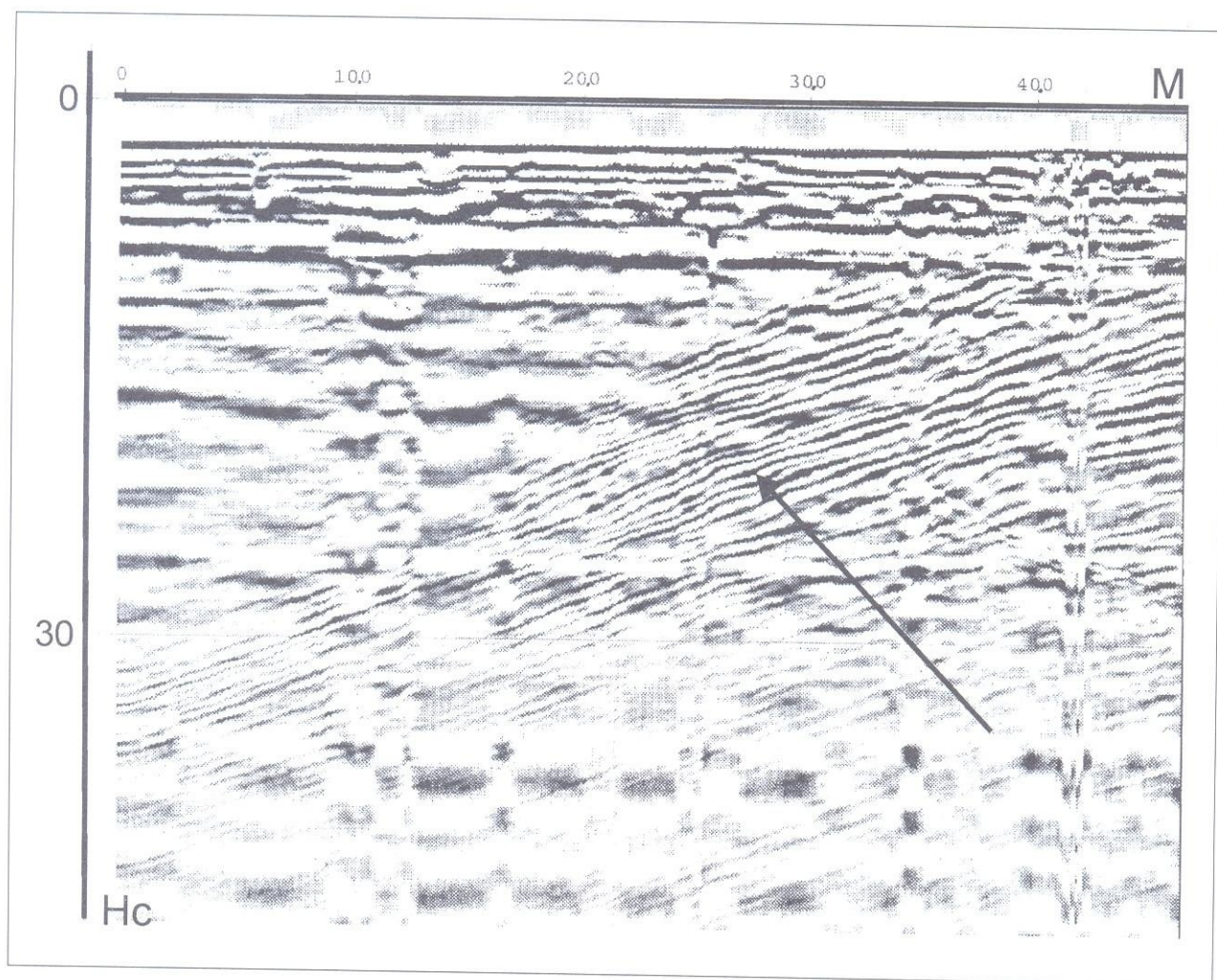


РИС. 8.11. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного с антенной 500 МГц. Цель исследований — обнаружение зон трещиноватости в подземной выработке, пройденной в мергеле.

Антенну перемещали по стене штольни. Зона трещиноватости выделяется на радарограмме в виде наклонных осей синфазности отраженных волн (показаны стрелкой)

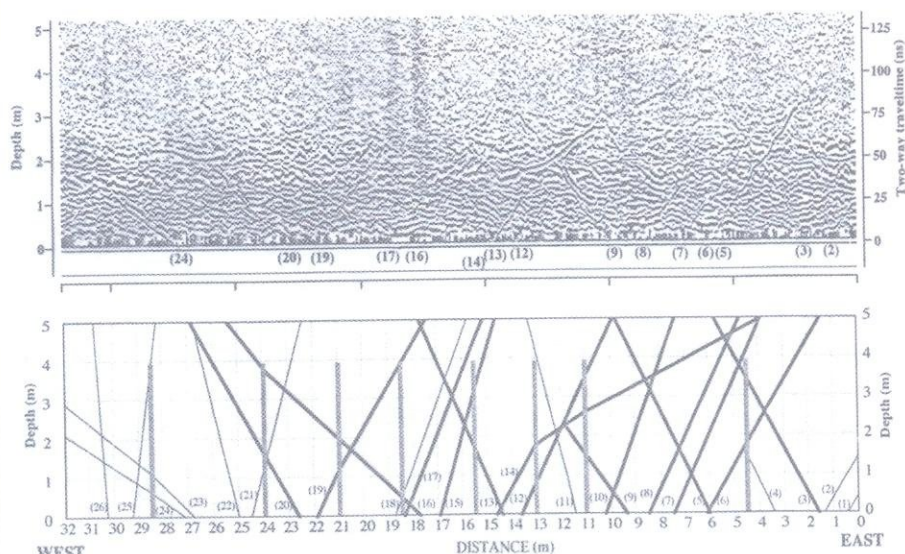
ции могут служить данные, полученные при исследованиях базальтов (рис. 8.14). По данным бурения какие либо границы в базальтах при описании керна скважин не выделены, а на радарограмме наблюдаются довольно протяженные оси синфазности, происхождение которых в настоящее время не ясно. Очевидно, что, как и в случае с песками, так и при изучении базальтов, необходимо проведение дополнительных специальных исследований отложений для определения причин возникновения отражений.

Приведенные примеры исследований различных типов разрезов показывают широкие возможности георадиолокации при изучении разнообразных геологических задач.

РИС. 8.12. Изучение трещин с различным заполнением [53].

А — георадиолокационный профиль и положение трещин по данным полевых наблюдений и замеров (профиль перевернут, нулевая линия на радарограмме находится внизу). Цифры в скобках — номера трещин.

Б — трещины, их положение на профиле, ширина, материал заполнения и наличие в них воды. Верхняя часть таблицы — трещины, наблюдаемые на радарограмме (observed on GPR record); нижняя — трещины, не выделяемые на георадиолокационном профиле (not observed on GPR record). Анализ показывает, что на радарограммах видны в основном трещины шириной в несколько миллиметров и более, заполненные глиной (clay-containing) и содержащие воду (water-flowing). Сухие, не содержащие воду трещины, на данных георадиолокации, как правило, не определяются



А

Observed on GPR record		
Crack Identification No.	Location on Wall Surface	Crack Features
(2)	1.6m	clay-containing, crack width: 1-5mm
(3)	1.8m	water-flowing, clay-containing, crack width: 1-20mm
(5)	5.9m	water-flowing, crack width: 5-10mm
(6)	6.2m	water-flowing, crack width: 5-10mm
(7)	7.4m	water-flowing, crack width: 1-8mm
(8)	8.5m	water-flowing, clay-containing, crack width: 2-10mm
(9)	9.5m	water-flowing, clay-containing, crack width: 5-12mm
(12)	13.6m	water-flowing, clay-containing, crack width: 10mm
(13)	14.4m	water-flowing, clay-containing, crack width: 2-15mm
(14)	14.7m	water-flowing, clay-containing, crack width: 10-20mm
(16)	17.7m	water-flowing, clay-containing, crack width: 1-10mm
(17)	18.4m	water-flowing, clay-containing, crack width: 1-10mm
(19)	21.8m	water-flowing, crack width: 2-10mm
(20)	22.5m	water-flowing, close
(24)	27.0m	clay-containing, crack width: 1-5mm
Not observed on GPR record		
Crack Identification No.	Location on Wall Surface	Crack Features
(1)	0.5m	close
(4)	3.5m	dry, clay-containing, crack width: 5-10mm
(10)	10.4m	water-dropping, clay-containing, crack width: 5-12mm
(11)	11.6m	crack width: 1-5mm
(15)	17.0m	water-flowing, clay-containing, crack width: 1-10mm
(18)	18.8m	clay-containing, crack width: 1-10mm
(21)	24.5m	dry, clay-containing, crack width: 1-5mm
(22)	25.0m	dry, clay-containing, crack width: 1-5mm
(23)	26.7m	close, crack width: 1-3mm
(25)	29.2m	dry, clay-containing, crack width: 1-15mm
(26)	30.1m	a little wet, clay-containing, crack width: 1-2mm

Б

РИС. 8.13. Выделение разрывных нарушений [51].

Верхний рисунок — георадиолокационный профиль, нижний — он же с интерпретацией. Белые линии (А) — оси синфазности отраженных волн; В — карбонатная постройка; С, D — разрывные нарушения (черные линии)

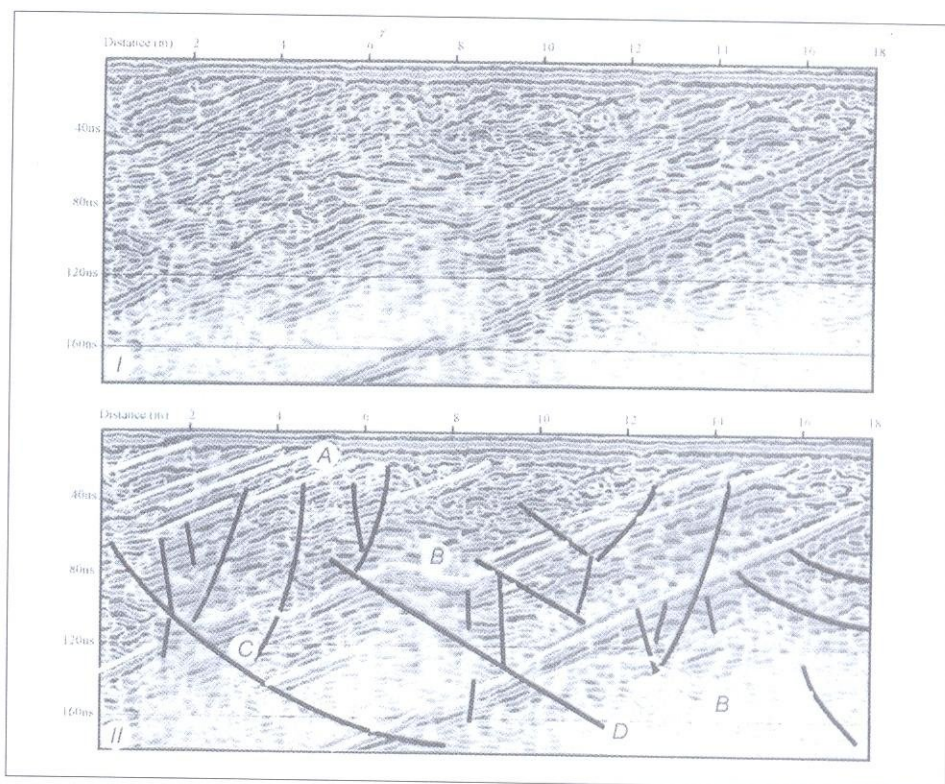
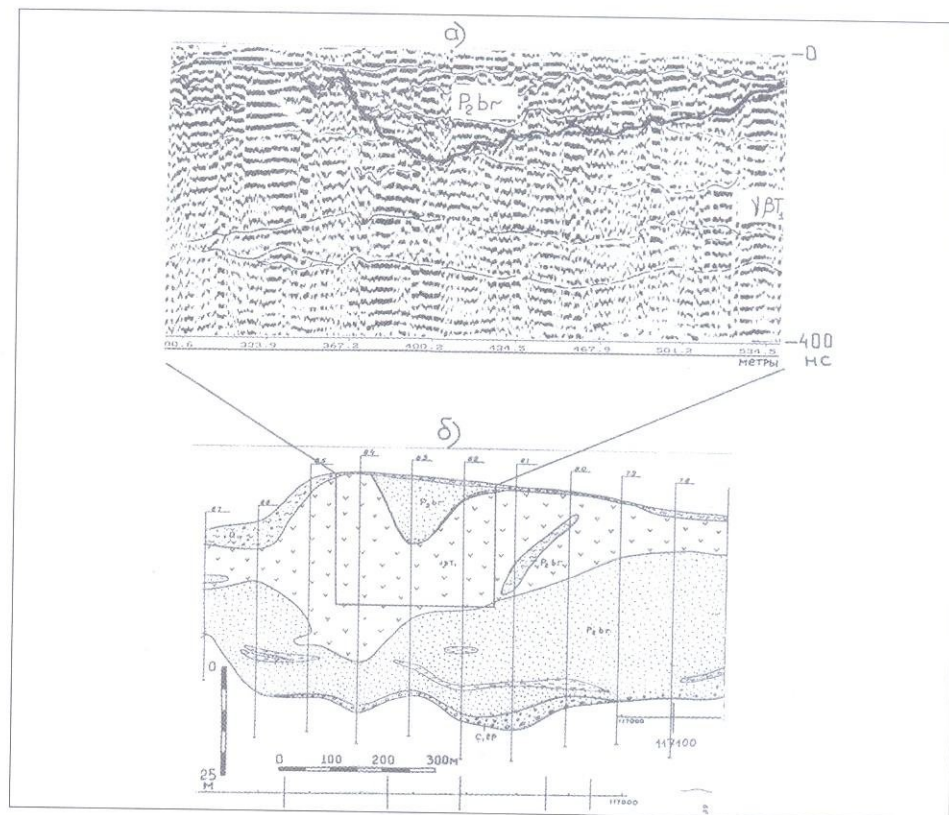


РИС. 8.14. Пример исследований на участке развития базальтов (долеритов) триасового возраста.

а — георадиолокационный профиль, б — геологический разрез по данным бурения. На некоторых участках в базальтах имеются палеопонижения, выполненные пермскими песчаниками. Их подошва показана черной линией (а). Следует подчеркнуть, что по данным бурения в долеритах отсутствуют границы, а на георадиолокационном профиле наблюдаются субгоризонтальные оси синфазности отраженных волн. Происхождение осей синфазности остается невыясненным



ГЛАВА 9.

Исследования в районах развития многолетне- мерзлых пород (ММП)

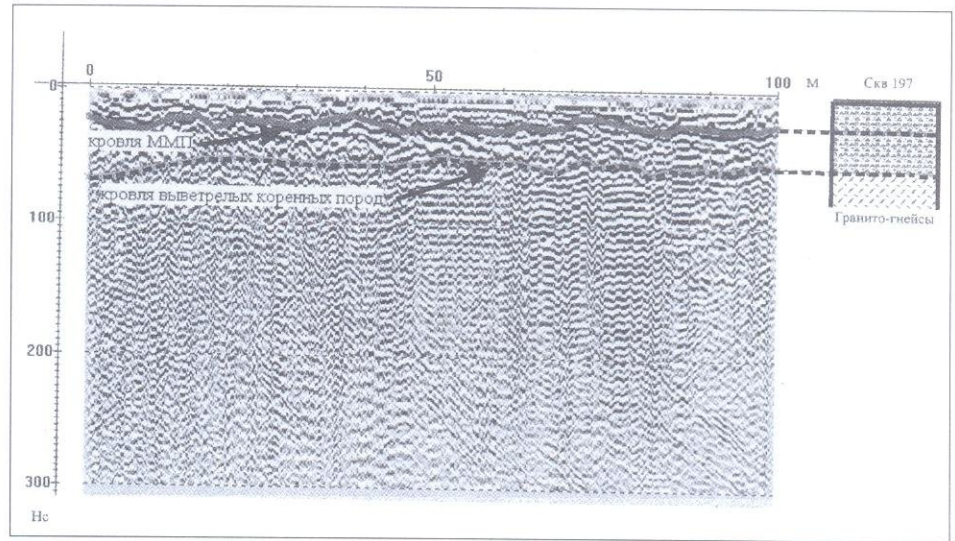
Мерзлые горные породы представляют собой наиболее важный объект при решении многих инженерно-геологических, поисковых, строительных и других задач в районах с суровым климатом. Изучение подобных разрезов геофизическими методами представляет собой довольно сложную задачу и этим вопросам посвящена обширная литература [10]. Использование георадиолокации в районах развития ММП началось с изучения ледников (пример волновой картины дан в Главе 8 на рис. 8.5, см. также [2, 14]. 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 [16, 19, 29 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, 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 14–16 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 районах сплошного развития ММП. Целью исследований было выделение УГВ, кровли ММП, кровли коренных пород, таликов и т.д. и определение глубины их залегания. Эти данные были необходимы для разработки проектной документации при строительстве железной дороги, мостовых переходов и строительстве трассы газопровода. Разрезы в целом представлены широким спектром четвертичных отложений мощностью до 10 метров, часть из которых находится в мерзлом состоянии, и коренными породами, представленными гранитогнейсами.

На одном объекте 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. 9.1).

РИС. 9.1. 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



В первом 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 у уреза воды.

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 исследованиях многолетнемерзлых пород, однако общее представление о характере разрезов в этих специфических условиях, на наш взгляд, у читателя будет сформировано.

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. 9.6, [19]).

Геологический разрез площадки представлен супесчано-суглинистым грунтом, мерзлым с глубины 0,6 метров. Криотекстура по всему разрезу преимущественно слоисто-сетчатая с размерами шлиров 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. 9.6.

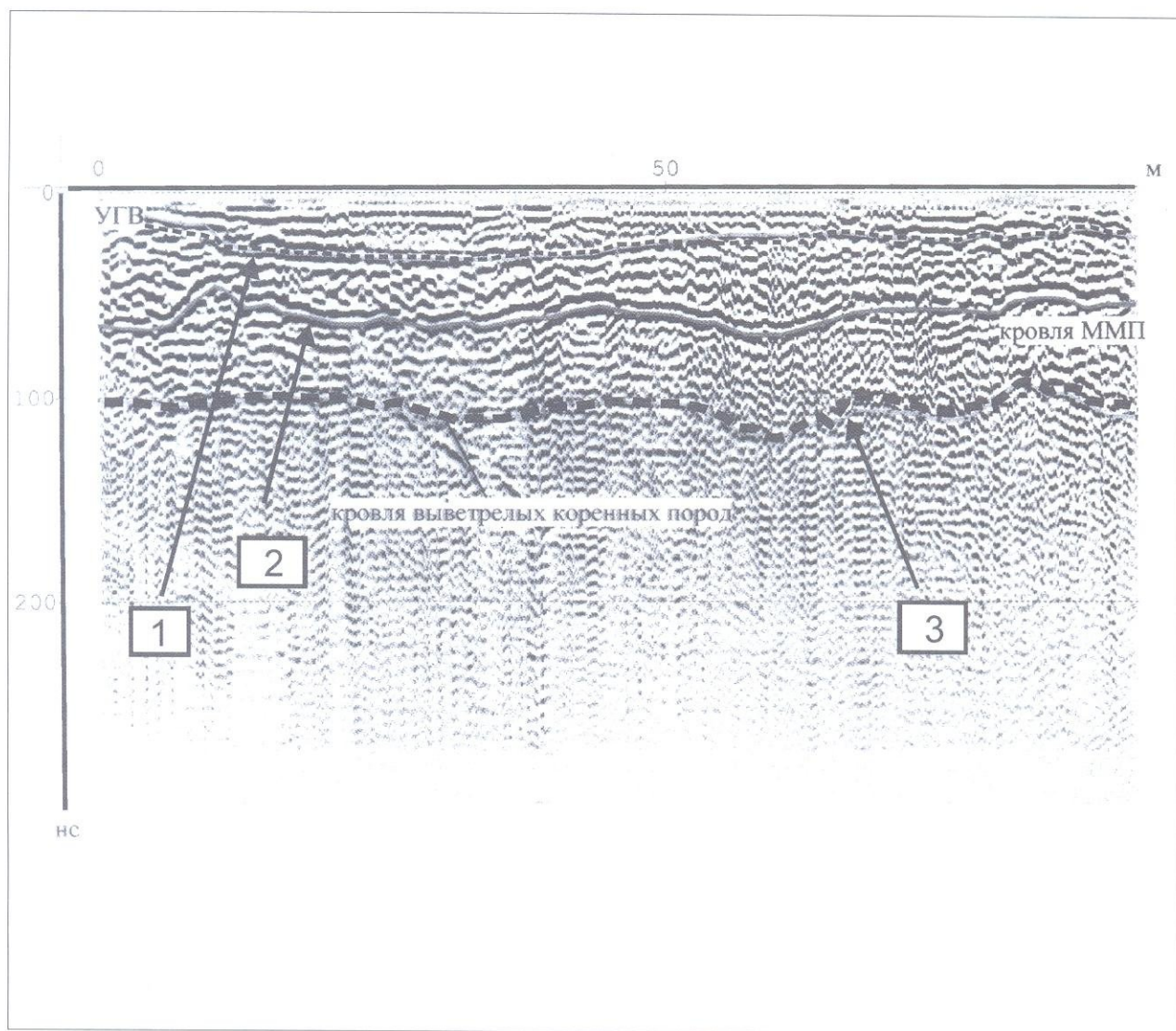


РИС. 9.2. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного с антенной 150 МГц по пойме реки.

На георадиолокационном разрезе по типу волновой картины выделено 4 георадарных комплекса, границы между которыми показаны цифрами. Нижний комплекс характеризуется, также как и на рис. 9.1, 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. 9.1) и геологическими наблюдениями позволило сопоставить нижний комплекс с коренными породами (гранитогнейсами), 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 уреза воды). Таким образом, по особенностям волновой картины на радарном профиле выделено 4 комплекса, которые соответствуют в геологическом разрезе двум толщам

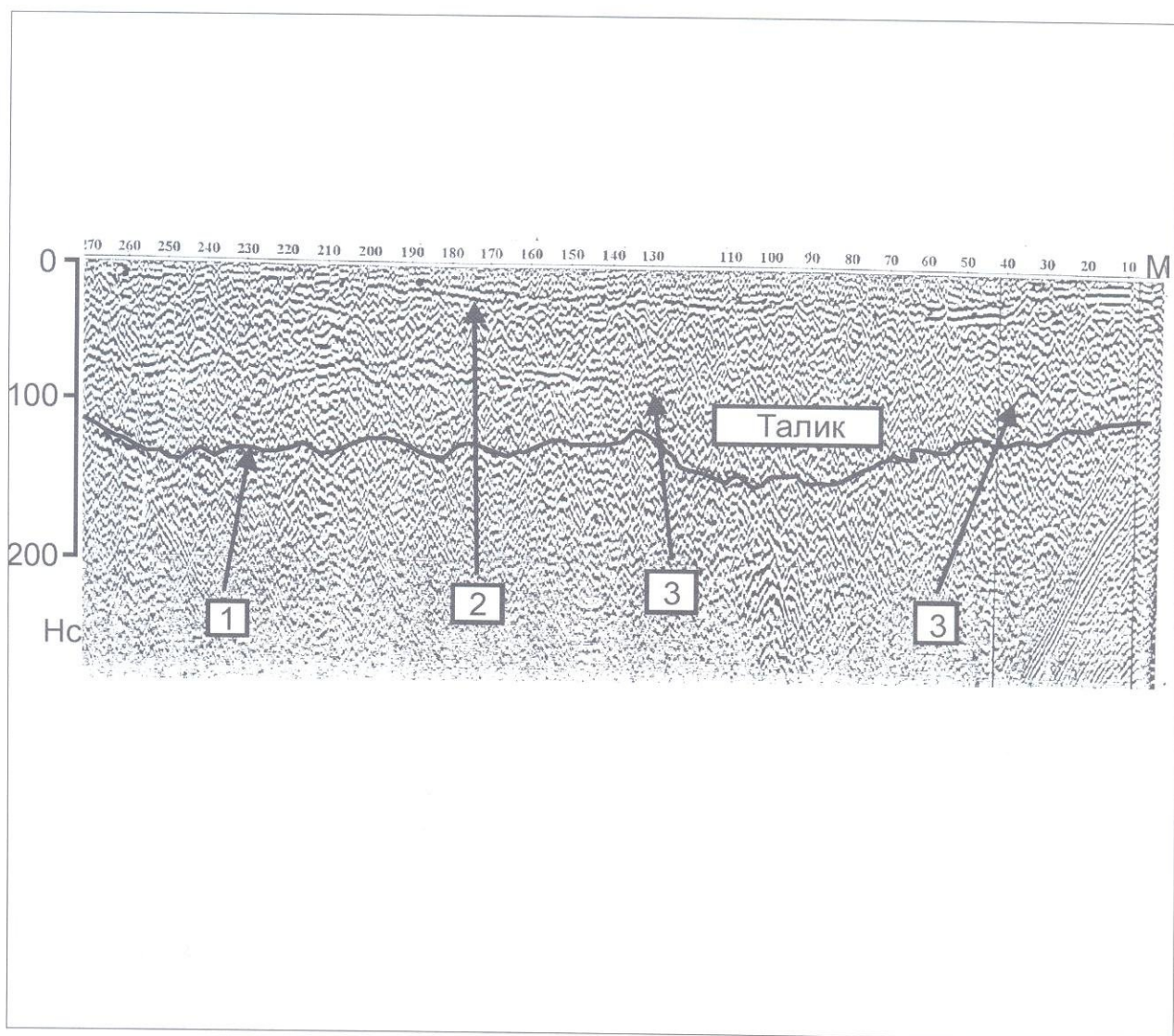


РИС. 9.3. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного с незкранированной антенной 150 МГц.

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. 9.4. Фрагменты георадиолокационных профилей, выполненных с антенной 150 МГц.

На верхнем рисунке (А) оси синфазности отраженных волн (граница 1) проведены по тем же признакам, что и на рисунке 9.2. 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. 9.1 и 9.2. Иными словами, картировочные признаки отдельных толщ при региональных работах могут значительно меняться в зависимости от направления профилей. 1 — кровля коренных пород; 2 — кровля ММП

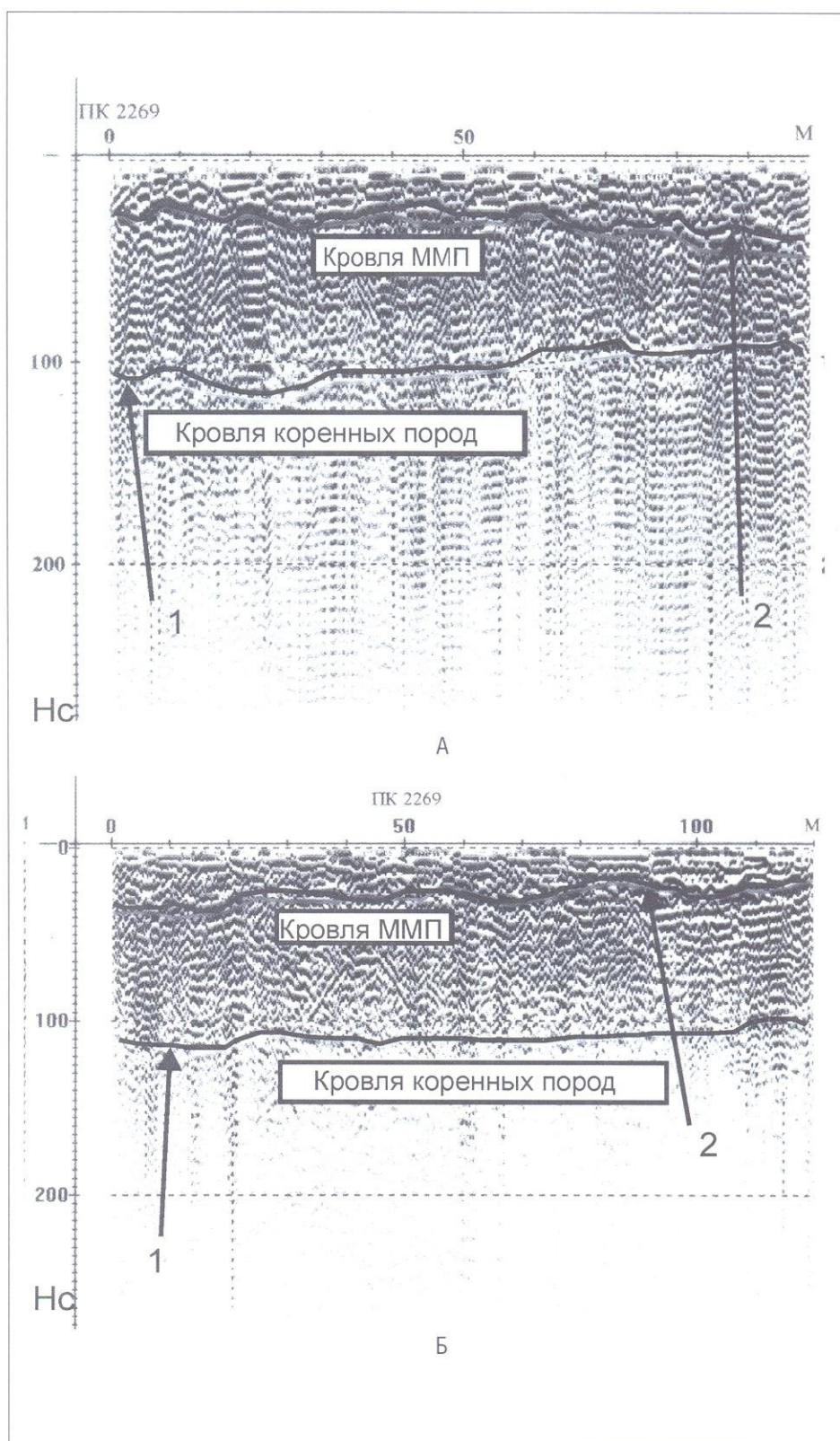
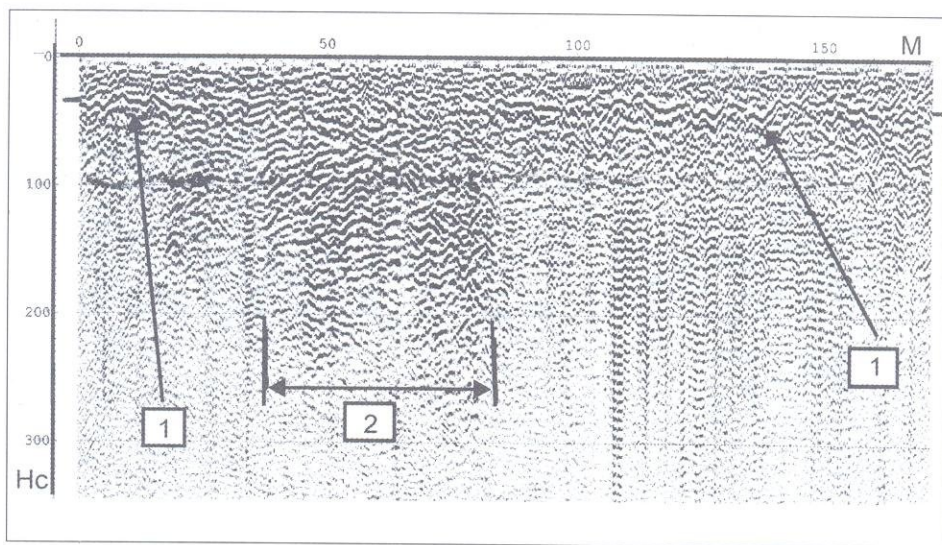


РИС. 9.5. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного с незранированной антенной 150 МГц.

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 вследствие увлажнения. 1 — кровля ММП; 2 — зона разгрузки подземных вод.

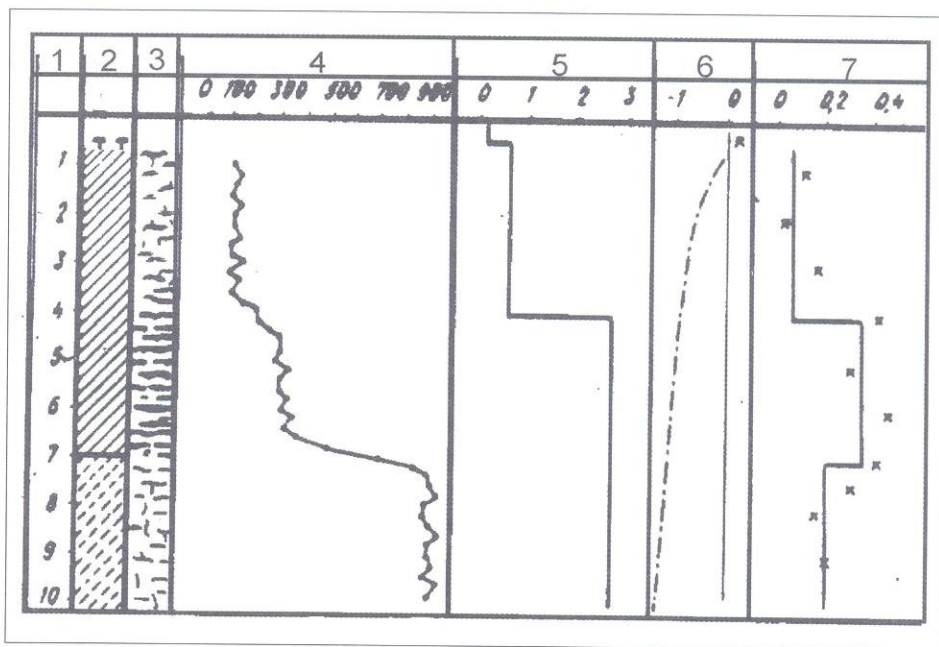


В скважине были проведены термометрия и электрический каротаж потенциал-зондом А1,ОМ, а вблизи устья скважины — ВЭЗ. По каротажу выделяется 3 слоя: $H=1-4$ м, $\rho_t=110$ Ом·м; $H=4-7$ м, $\rho_t=300$ Ом·м; $H=7-10$ м, $\rho_t=1000$ Ом·м. По данным ВЭЗ выделено 2 слоя мерзлой толщи: $H_1=0,5-4,0$ м; $\rho_m=630$ Ом·м, $H_2=4,0-10,0$ м; $\rho_m=2700$ Ом·м, мощность которых H определялась с учетом поправки за анизотропию (рис. 9.6).

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 предполо-

РИС. 9.6. Сопоставление геологического разреза скважины с данными электрометрических исследований, льдистости и термометрических наблюдений на площадке в районе г. Лабытнанги.

1 — глубина в м; 2 — геологический разрез; 3 — криогенная текстура; 4 — электрокаротаж потенциал-зондом А1,ОМ (Ом·м); 5 — ВЭЗ (кОм·м); 6 — температура; 7 — льдистость



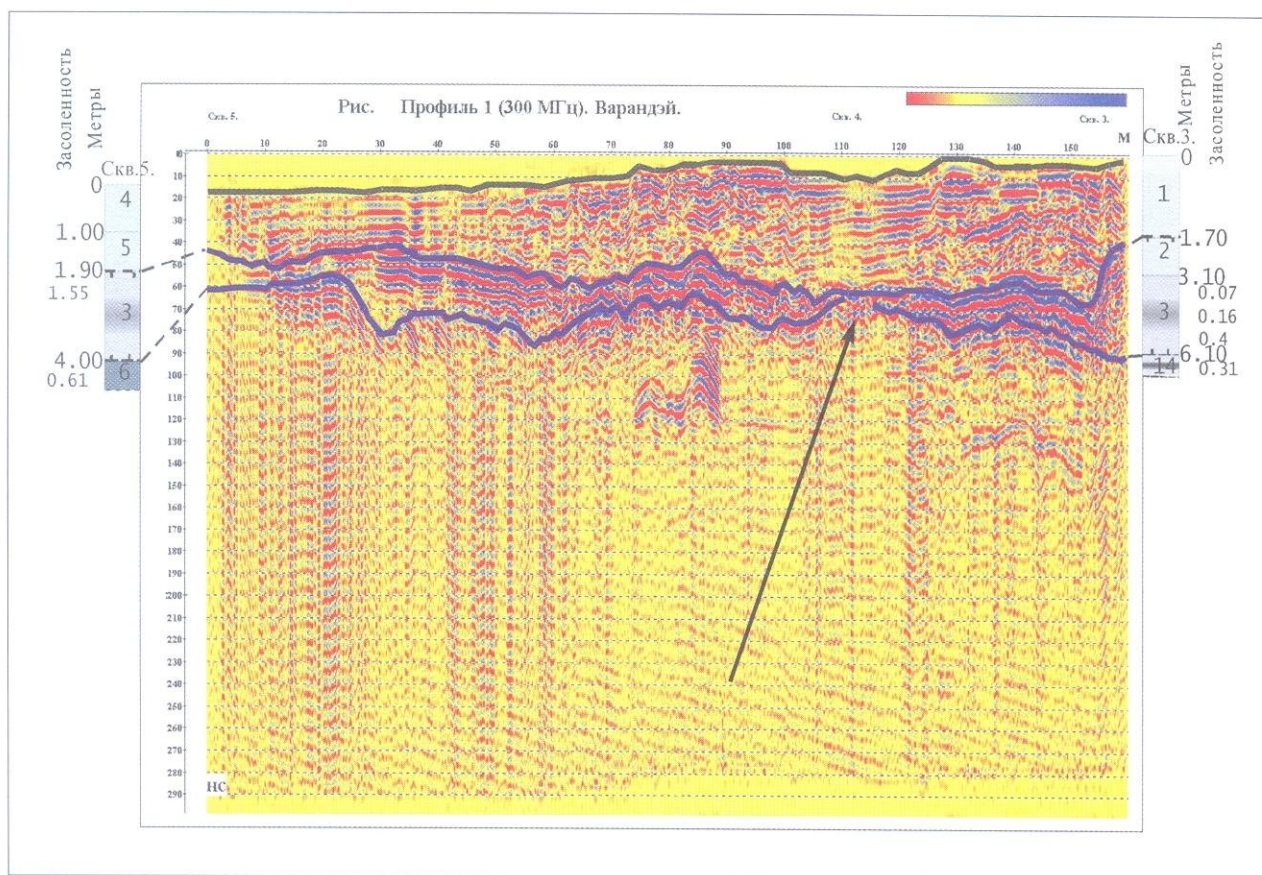


РИС. 9.7. Георадиолокационный профиль на объекте «Варандей». Исследования выполнялись с экранированной антенной 300 МГц.

Профиль проходит через три скважины, в которых определялась также засоленность отложений. Синими линиями показаны кровля и подошва многолетнемерзлых пород, черной линией — рельеф поверхности наблюдения.

1 — песок талый; 2 — песок мерзлый; 3 — переслаивание песка и ила (грунт мерзлый); 4 — песок талый; 5 — песок с гравием талый; 6 — суглинок тяжелый талый; 14 — переслаивание песка и ила

жить, что на георадиолокационном разрезе в подобном случае могут выделяться две отражающие границы: одна будет соответствовать кровле мерзлых пород, а нижняя — изменению льдистости на глубине 4,0 метра. 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 и по возможности работать с двумя различными антеннами. Так, в данном районе можно было бы использовать также более высокочастотную антенну, чтобы избежать возможной ошибки в определении кровли ММП. Однако при работах в сильно засоленной местности, как в данном случае (работы проводились в тайге и на каменистых склонах), можно было использовать только переносимую антенну.

На втором изученном участке, кроме решения задач, перечисленных выше, необходимо было определить подошву ММП (по предварительным данным многолетняя мерзлота имеет здесь небольшую мощность), провести опытно-методические работы по обследованию бугров

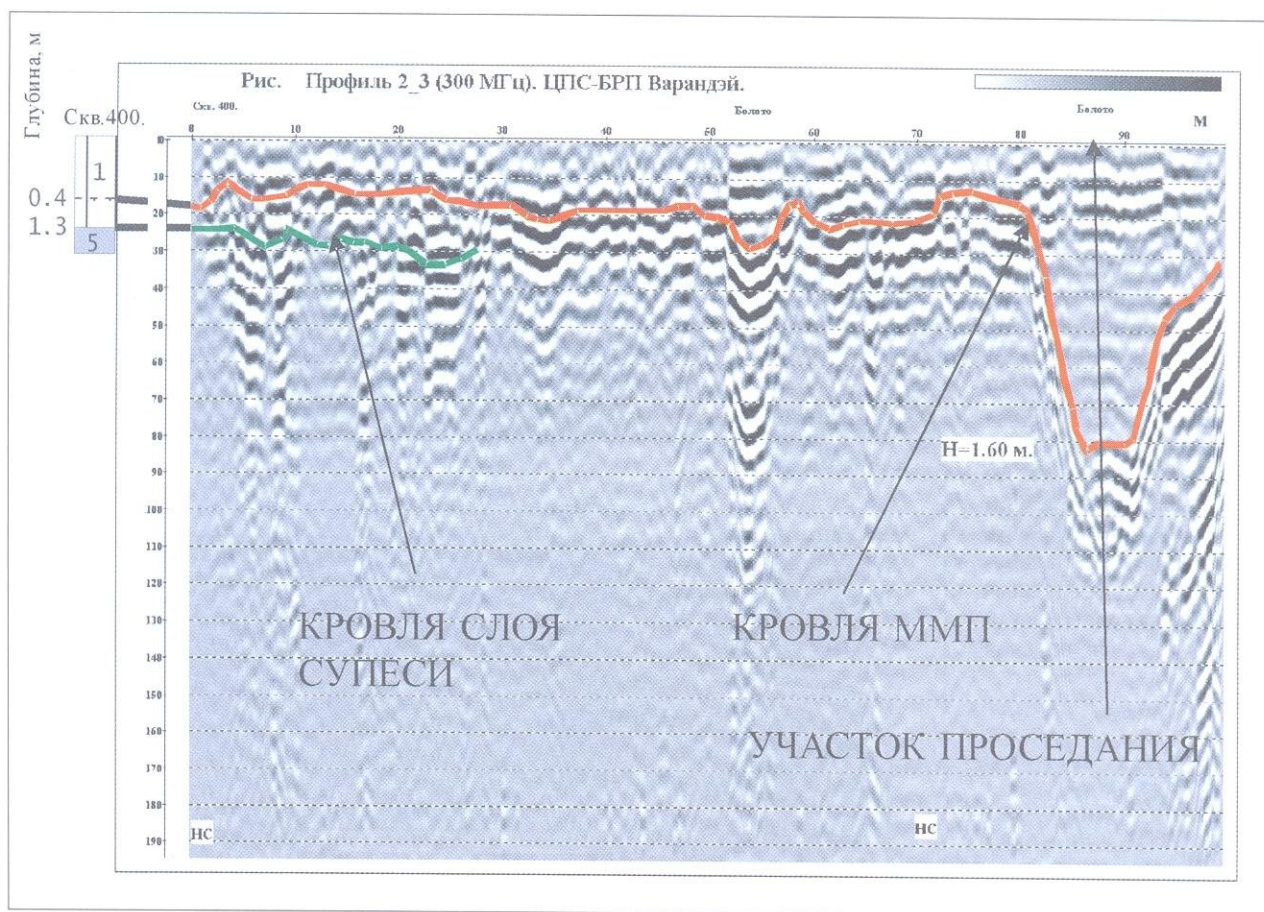


РИС. 9.8. Георадиолокационный профиль через участок с небольшим проседанием в правой части профиля (термокарст?). Профиль выполнен с экранированной антенной 300 МГц. Разрез скважины № 400: 1 — торф, 5 — супесь

пучения, термокарста, криопеггов и т.д. На рис. 9.7 показан пример определения кровли и подошвы многолетнемерзлых пород, мощность которых не превышает нескольких метров. Кровля и подошва ММП отображаются на профиле осями синфазности большой амплитуды и выделяются уверенно, за исключением участка в месте расположения скважины №4 (показан стрелкой), где подошва практически не видна. По данным изучения образцов в этом интервале разреза скважины мерзлых грунтов не обнаружено, тем не менее на георадиолокационном разрезе их кровля выделяется. Необходимо также отметить, что в левой части профиля, изображенного на этом же рисунке (в районе скв. №5), оси синфазности отраженных волн (даже кровли и подошвы ММП) отсутствуют, что обусловлено его большой засоленностью. В интервале многолетнемерзлых пород (1,9 м — 4,0 м) засоленность в среднем на порядок превышает засоленность на соседних участках (см. рис. 9.7, левая часть профиля).

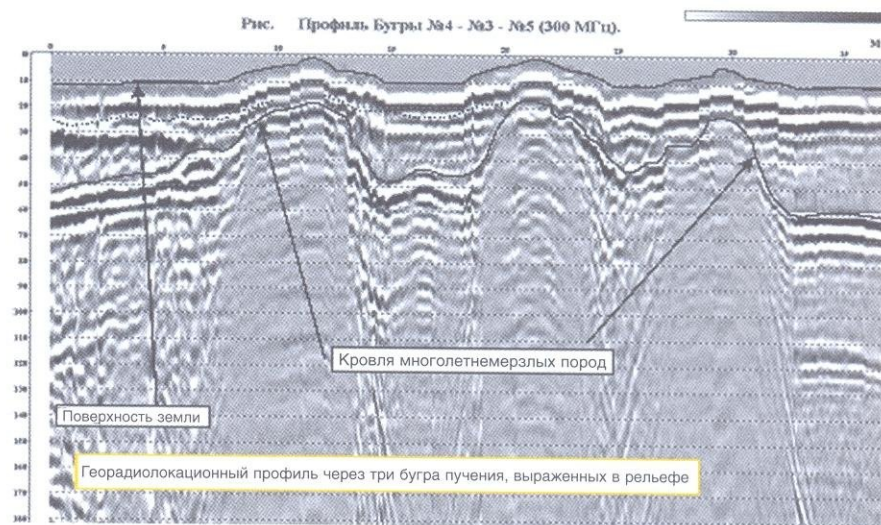
На рис. 9.8 представлен профиль через участок проседания, который, вероятно, связан с термокарстом. В правой части профиля наблюдается погружение кровли ММП до глубины около 1,6 метра. На поверхности над этим прогибом ММП отмечается небольшое прогибание и повышенное увлажнение.

РИС. 9.9. Георадиолокационное обследование бугров пучения. Использовалась экранированная антенна 300 МГц.

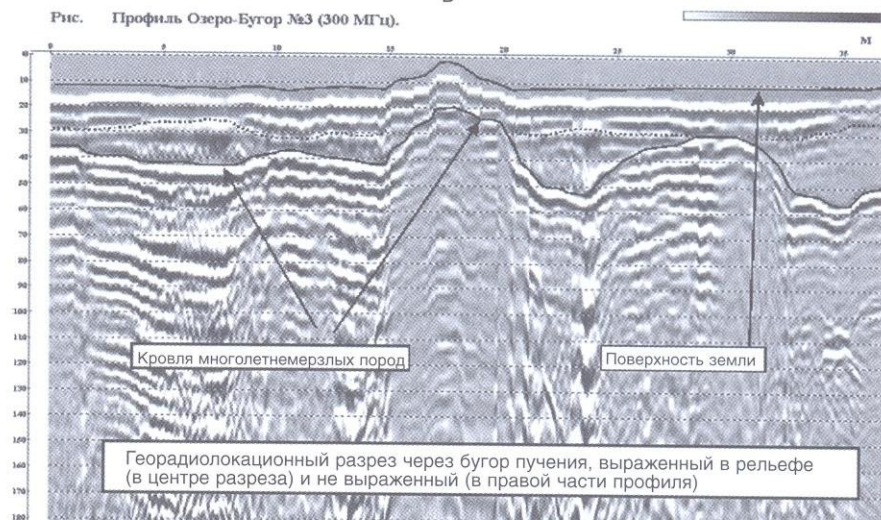
А — рабочий момент георадиолокационной съемки; Б — фрагмент георадиолокационного профиля через три бугра пучения, выраженных в рельефе; В — фрагмент георадиолокационного профиля через выраженный в рельефе бугор пучения (в центре радарограммы) и не выраженный (правая часть радарограммы). Радарограмма дана с введенным рельефом поверхности наблюдения



А



Б



В

При строительстве в районах развития ММП большое значение имеет изучение бугров пучения (рис. 9.9 А, Б), особенно если они не выражены в рельефе поверхности (рис. 9.9 В). На георадиолокационных профилях эти структуры выделяются по резкому подъему осей синфазности, которые соотносятся нами с кровлей многолетнемерзлых пород. Следует отметить, что кровля ММП является сильной отражающей границей и с ней связан, как правило, интенсивный фон кратных волн.

ГЛАВА 10.

Исследования на пресноводных акваториях

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 пять групп: 1) собственно геологические, когда необходимо выяснить литологию и структуру осадочного разреза, определить глубину залегания и рельеф кровли коренных пород, 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 и строительных материалов; 4) обнаружение в пределах акваторий (в основном рек) местоположения и глубины залегания различных трубопроводов, кабелей и других объектов. В эту же группу задач, по-видимому, следует включить и мониторинг русловых процессов, которые необходимо учитывать при прокладке трубопроводов и кабелей через водоемы и реки; 5) научно— исследовательские работы по изучению литодинамики — например, изучение донных форм рельефа и т.д.

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. В Таблице 10.1 дано сопоставление георадиолокационного и сейсмоакустического методов исследований на пресноводных акваториях.

ТАБЛИЦА 10.1.
Сопоставление георадиолокационных и сейсмоакустических методов исследований на пресноводных акваториях

ГЕОРАДИОЛОКАЦИЯ	СЕЙСМОАКУСТИКА
1. Работы можно проводить с резиновых или пластиковых лодок. Энергоустановки не нужны.	1. Необходимы достаточно крупные суда с электропитанием.
2. Возможны работы при глубинах воды в десятки сантиметров.	2. Глубинность по воде ограничена осадкой плавсредства.
3. Работы проводятся как на открытой воде, так и со льда.	3. Работы возможны только на открытой воде.
4. В настоящее время работы проводятся при глубинах до ~10 м. Глубинность по воде сильно зависит от УЭС воды.	4. Увеличение глубины не имеет значения.
5. Детальность исследований по горизонтали практически любая. Частота посылок — десятки и сотни сканирований в секунду.	5. Меньшая детальность исследований по горизонтали, чем в георадиолокации. Частота посылок при детальных работах составляет, как правило, 0,5–1,0 раз в секунду.
6. Вертикальная разрешающая способность очень высокая (до 5–10 см).	6. Вертикальная разрешающая способность хуже чем в георадиолокации.
7. Глубинность исследований по грунту не превышает 5–8 метров и сильно зависит от УЭС воды и наличия в разрезе глин и суглинков. Присутствие газонасыщенных отложений не влияет на глубинность исследований.	7. Глубинность исследований по грунту значительно больше, чем в георадиолокации, но сильно зависит от присутствия в разрезе газонасыщенных отложений.
8. Полезный интервал записи между 1-й и 2-й кратными больше, чем в сейсмоакустике.	8. Вследствие большей длительности импульса при малых глубинах часто вся верхняя часть записи «закрыта» кратными и неполнократными отражениями.

Сравнивая эти два метода необходимо подчеркнуть следующее:

1. Использование сейсмоакустики, даже в простом одноканальном варианте, на небольших мелководных водоемах (до 2,0 метров) технологически представляется довольно сложной задачей как с точки зрения проведения работ, так и с точки зрения интерпретации полученных данных, а иногда и практически невозможно. Основные проблемы связаны, как правило, с отсутствием плавсредств с электропитанием на малых водоемах (шириной в десятки и длиной в первые сотни метров), особенно в городских условиях; с наличием интенсивного фона кратных волн-помех, зачастую полностью закрывающих необходимый полезный интервал записи; с меньшей вертикальной разрешающей способностью, чем в георадиолокации и с невозможностью получения данных при наличии на дне водоемов и рек газонасыщенных осадков, которые полностью «экранируют» нижележащие отложения.

2. Некоторые из перечисленных проблем успешно решаются с помощью метода георадиолокации: исследования можно проводить с резиновых и пластиковых лодок при глубинах воды в несколько десятков сантиметров (рис. 10.1); детальность исследований по профилю может быть практически любая — число сканирований в секунду в современных георадарах достигает многих десятков и сотен, что при малых скоростях движения плавсредств позволяет получать отражения через 1 см; газонасыщенные осадки, которые могут практически сплошным покровом залегать на дне пресноводных акваторий, не являются препятствием для распространения электромагнитных волн в отличие от высокочастотной сейсмоакустики; значительно более высокая вертикальная разрешающая способность — длительность импульса в десятки тысяч раз меньше, чем у самых высокочастотных источников в сейсмоакустике; помехоустойчивость от механических шумов, что дает возможность проводить исследования на реках с быстрым течением.

С другой стороны, есть два существенных ограничения для георадиолокации на воде:

- 1. Низкое удельное электрическое сопротивление воды приводит к значительному уменьшению глубинности исследований, что будет показано ниже на реальных материалах (рис. 10.9);*
- 2. Глубинность также как и при работах на суше сильно зависит от наличия в разрезе глин и суглинков (см. Главу 6, рис. 6.16 и Главу 8).*

На рис. 10.2 приведены результаты сейсмоакустических и георадиолокационных исследований на небольших глубинах. Сопоставление данных показывает, что георадиолокационный профиль, несмотря на более сложные условия — меньшую глубину воды — содержит информацию



РИС. 10.1. Георадиолокационные исследования с пластиковой лодки.

1 — георадар «Зонд 12»;
2 — экранированная антенна 300 МГц. Для получения качественных материалов при работах на воде выбираются лодки с ровным дном и без воздушного зазора, в противном случае может возникнуть сильная реверберация, затрудняющая интерпретацию

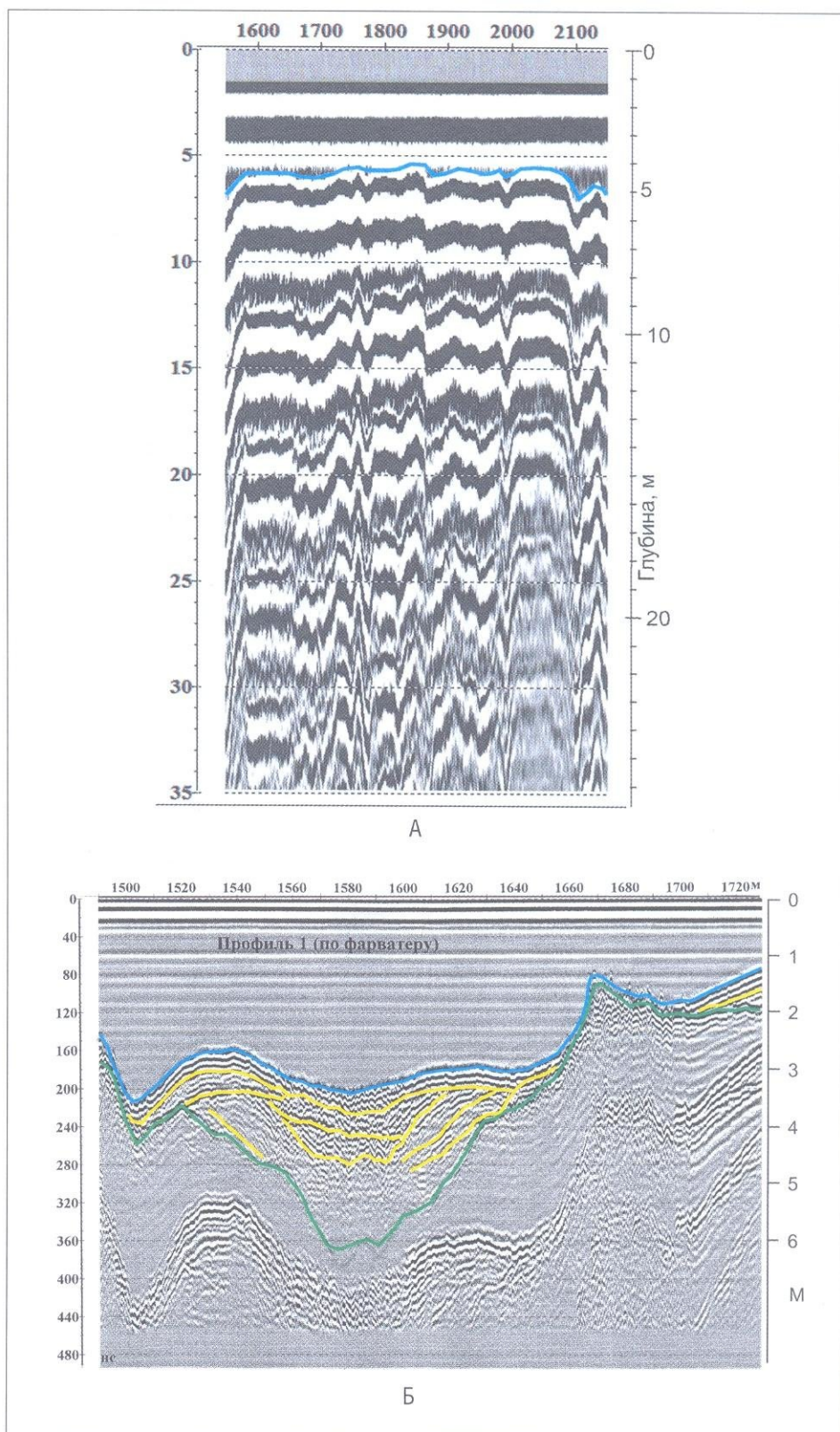
о разрезе, тогда как сейсмоакустический разрез даже при большей глубине воды практически не поддается интерпретации вследствие сильного фона многократных отражений. На рисунках 10.3 А и Б приведены примеры георадиолокационных материалов, полученных при глубинах воды 1 метр и меньше.

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 удастся выделить даже поверхность дна [9]. 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. 10.5). Эта «зона нестабильных геоэлектрических параметров экранирует распространение импульсов георадара» [9].

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. 10.7, 10.8, 10.10).

РИС. 10.2. Сопоставление сейсмоакустических (А) и георадиолокационных (Б) данных.

На сейсмоакустическом профиле глубина воды в среднем составляет около 5 метров. Центральная частота исследований 500 Гц. На приведенном фрагменте профиля видно, что весь интервал записи «забит» кратными отражениями и разрез стал практически не интерпретируемым. Подобная ситуация часто возникает если дно сложено отложениями с большим коэффициентом отражения или газонасыщенными осадками (здесь показана ситуация с газонасыщенными осадками на дне). На фрагменте георадиолокационного профиля глубина воды еще меньше — около 3 метров, однако на разрезе отчетливо выделяется погребенная долина, выполненная осадками мощностью в несколько метров



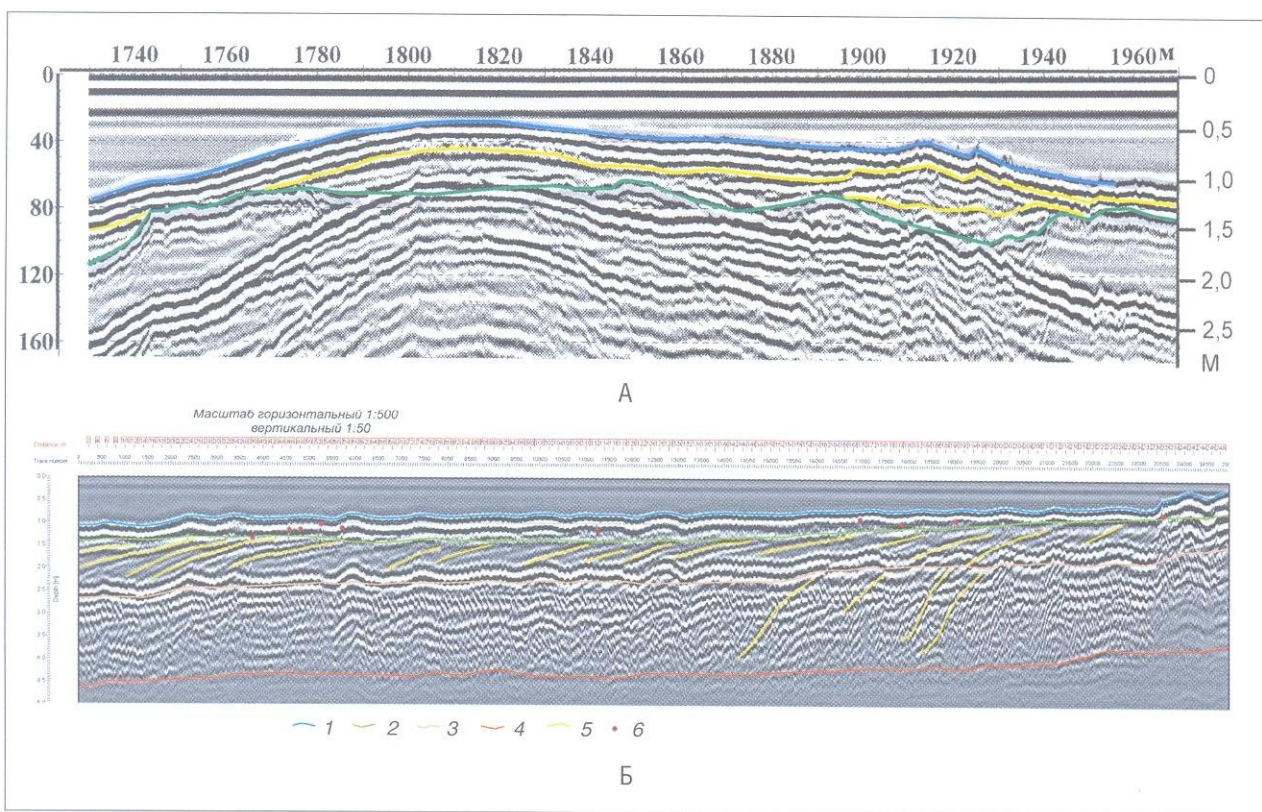


РИС. 10.3. Георадиолокационные профили, полученные на реке (А) и озере (Б).

На верхнем профиле минимальная глубина воды около 0,5 метра, на нижнем — 20–30 см в правой части. Глубина исследований на озере по грунту около 3,5 метра и ограничена толщей суглинков (коричневая линия).
1 — поверхность дна, 2 — кровля косослоистой толщи песков, 3 — граница в косослоистой толще песков, 4 — подошва косослоистой толщи песков, 5 — дополнительные границы в толще песка, 6 — объекты

Ниже представлены примеры исследований на реках и озерах с высоким удельным электрическим сопротивлением воды. Описания даны в подписях к рисункам (рис. 10.6–10.10).

В некоторых случаях возникают задачи, решить которые одним методом не представляется возможным. Например, при разработке проекта строительства гаража под Водоотводным каналом в г. Москве необходимо было определить глубины залегания кровли и подошвы толщи известняков. По предварительным данным было известно, что кровля известняков находится на глубинах до 1 метра ниже поверхности дна (глубина воды не превышает 1,8–2,0 м), а подошва — на 8–10 метрах. Вследствие этого кровля изучалась с помощью георадара (рис. 10.11), а подошва — с помощью непрерывного сейсмопрофилирования.

Выше приводились примеры георадиолокационных наблюдений со льда и отмечалось значительное ухудшение записи при работах через «слоистый» лед (рис. 10.4Б и 10.5). На рис. 10.12 показаны результаты эксперимента, когда профиль начинался на чистой воде и затем лодка с радаром была вытащена на «слоистый» лед (правая часть профиля). На радарограмме отчетливо видно резкое ухудшение записи в правой части радарограммы.

С помощью георадара можно эффективно изучать современные илы, часто газонасыщенные, с большим количеством органики и тяжелых металлов, а также определять местоположение и глубину залегания трубопроводов под дном пресноводных акваторий (рис. 10.13 и 10.14).

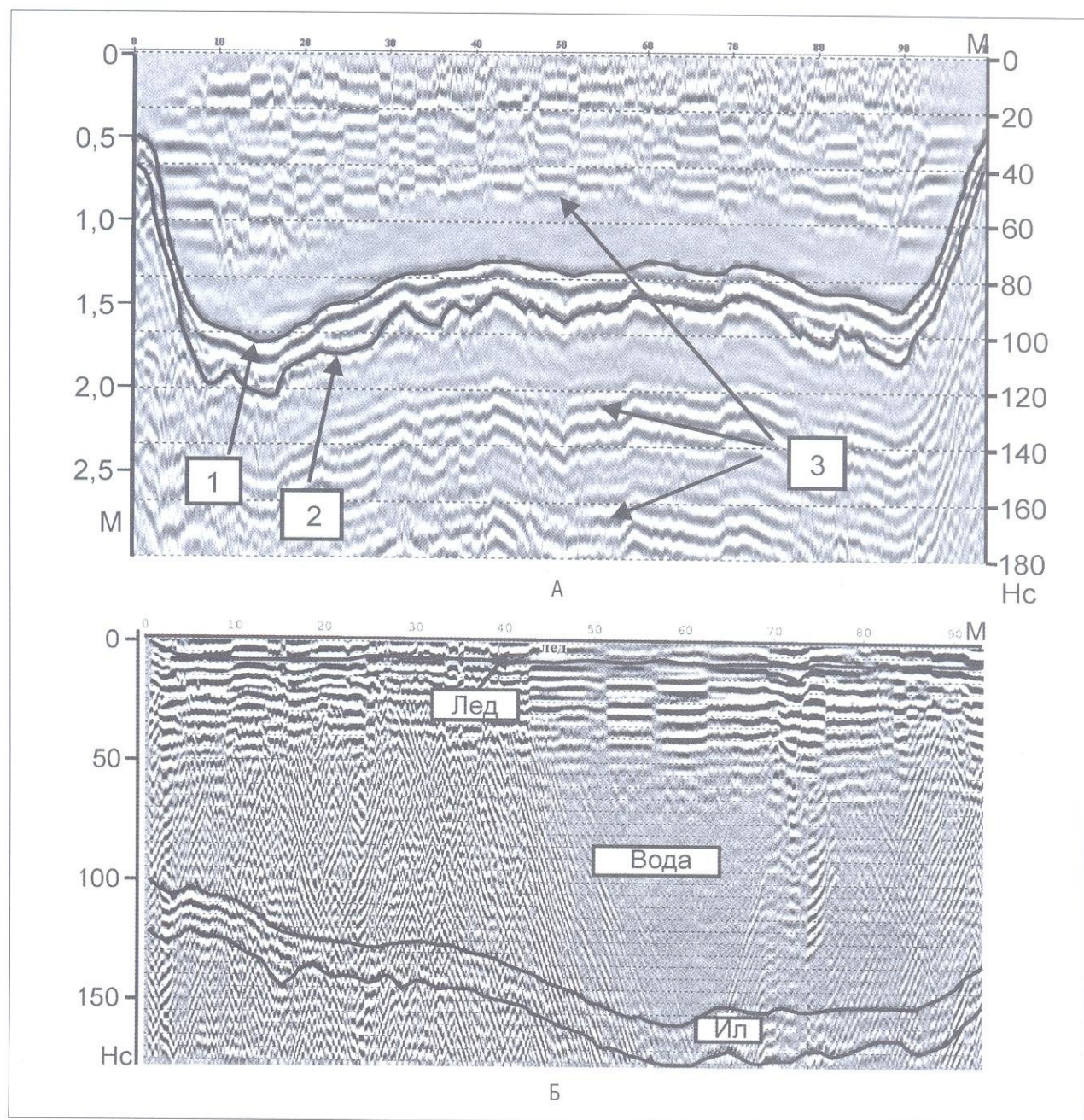


РИС. 10.4. Фрагменты георадиолокационных профилей, выполненных с экранированной антенной 300 МГц на прудах с целью определения мощности современных илов.

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 радиодиаграмме 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)

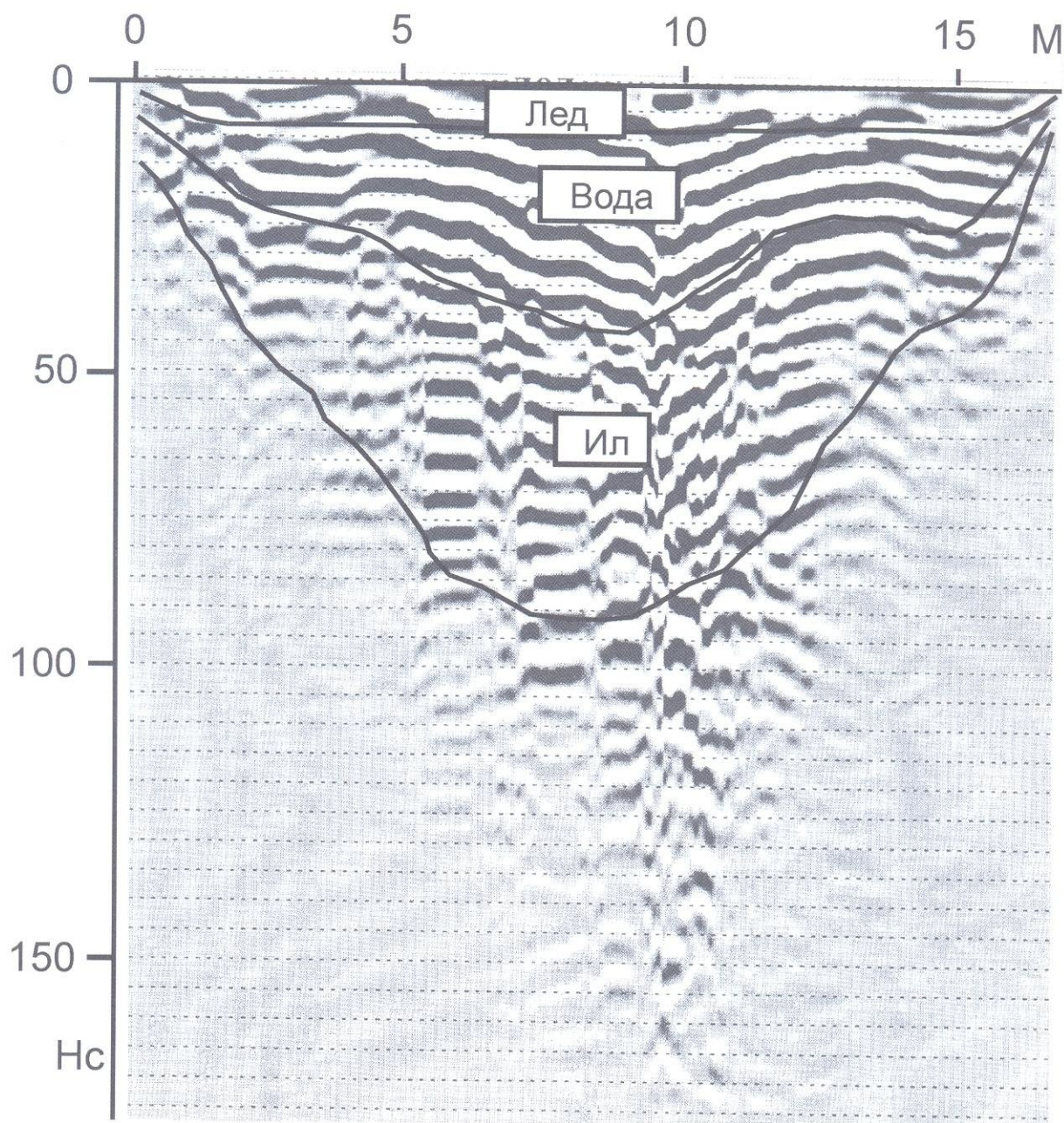


РИС. 10.5. Обработанный георадиолокационный профиль, выполненный на пруду с экранированной антенной 300 МГц.

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. [9]). 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

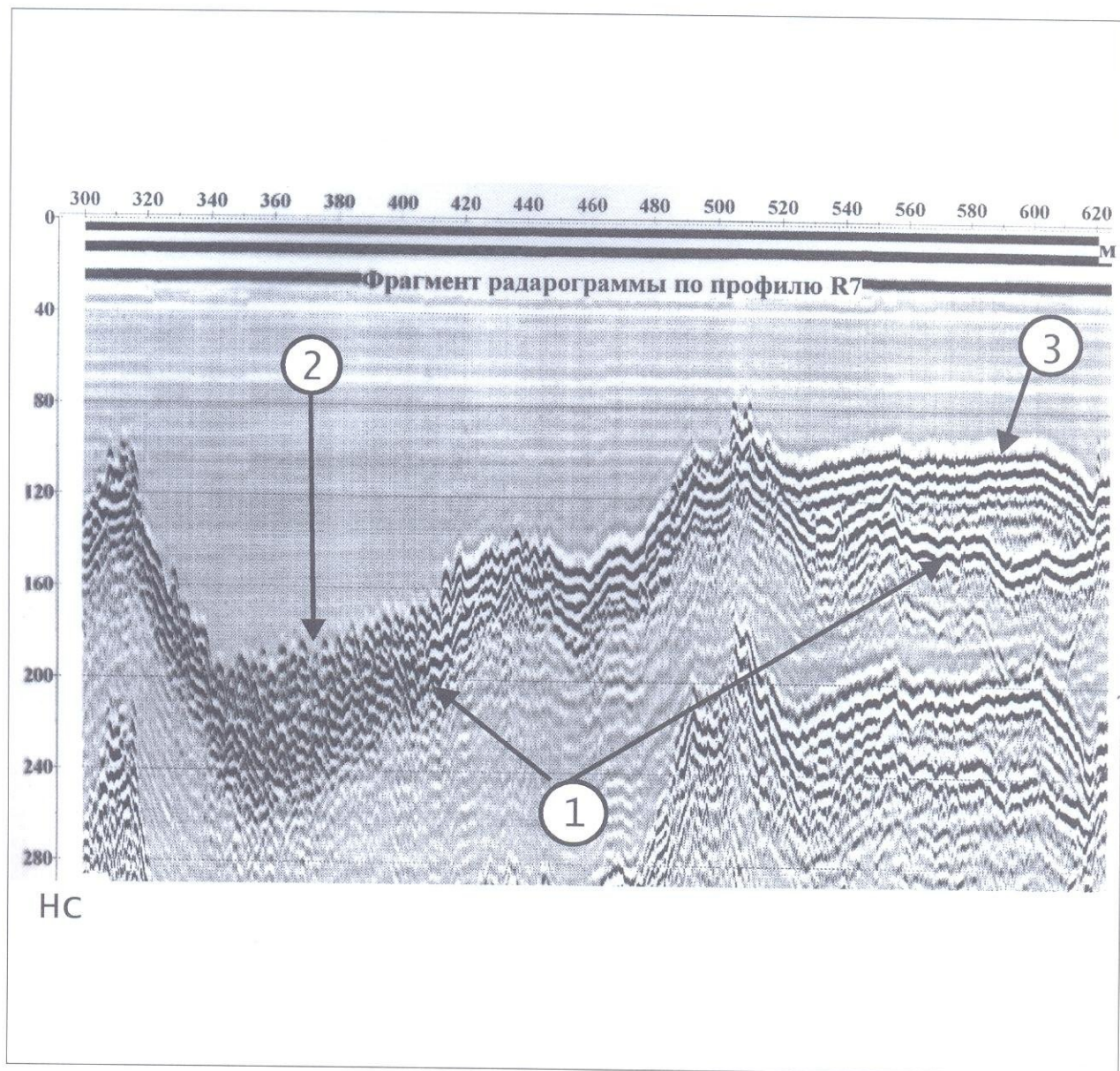


РИС. 10.6. Фрагмент обработанного георадиолокационного профиля, полученного на реке с экранированной антенной 300 МГц.

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 — разнотерными песками. 1 — кровля коренных пород; 2 — галечники с отдельными валунами; 3 — пески

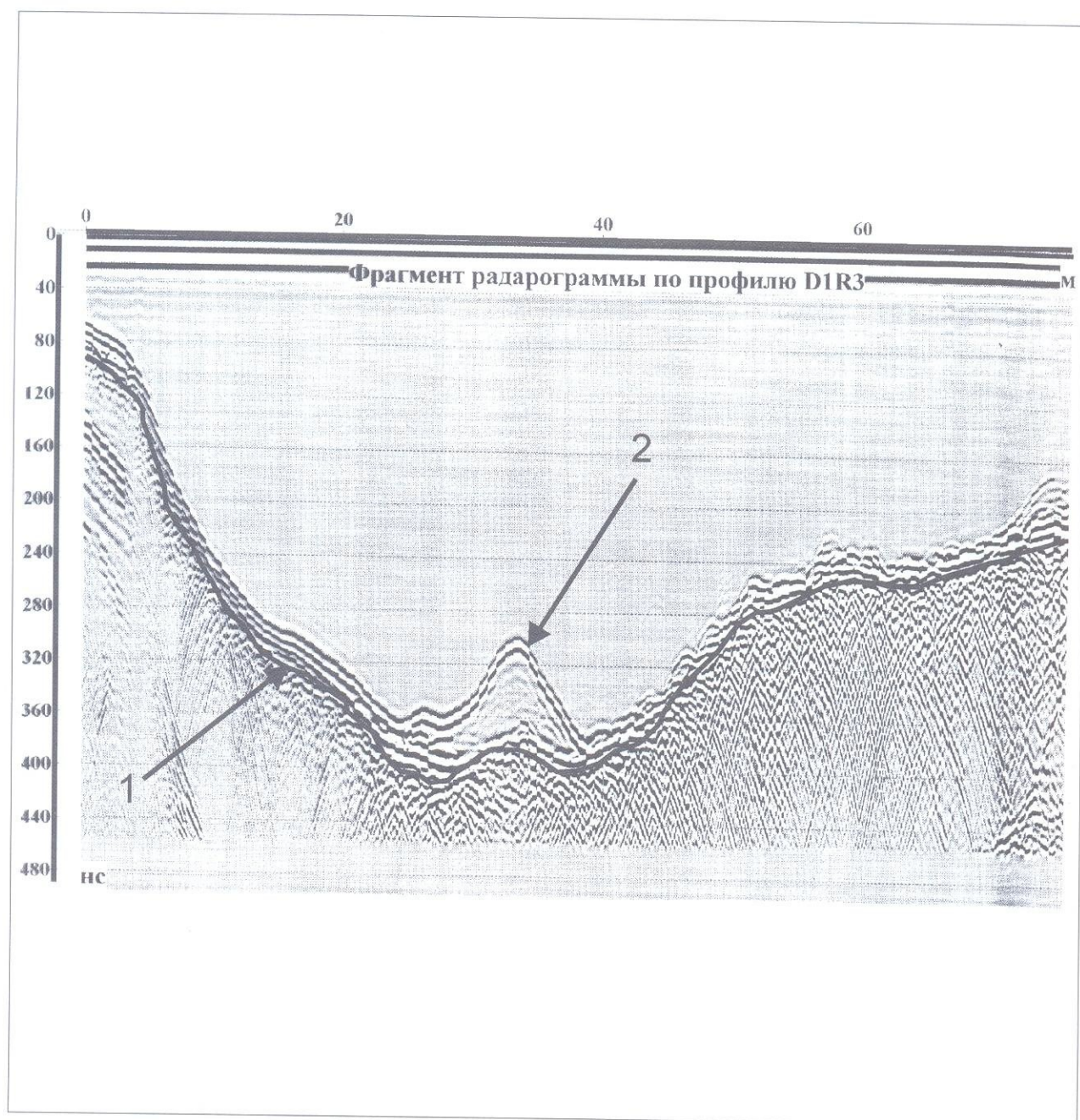


РИС. 10.7. Фрагмент обработанного георадиолокационного профиля, полученного на реке с экранированной антенной 300 МГц.

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 мощностью около 2,5 м (при $V=6$ см/нс). Максимальная глубина воды на профиле более 6 метров (370 нс двойного времени)

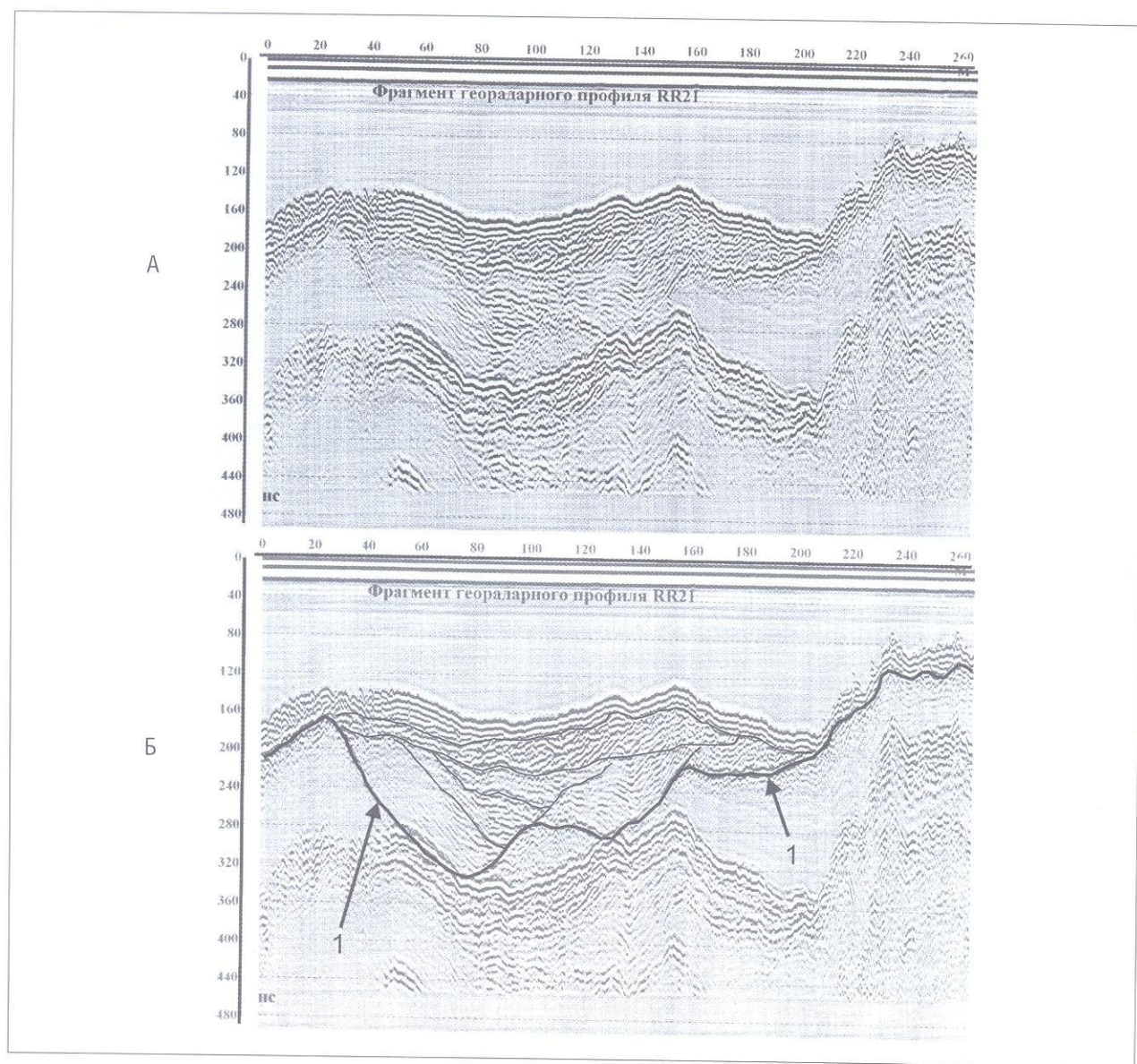


РИС. 10.8. Фрагмент обработанного георадиолокационного профиля, выполненного на реке с экранированной антенной 300 МГц. Работы производились с резиновой лодки.

Цель исследований — поиск локальных углублений и палеорусел в кровле коренных пород. А — георадиолокационный профиль; Б — его интерпретация. По типу волновой картины выделено два основных георадарных комплекса, граница между которыми показана на профиле цифрой 1. Нижний комплекс характеризуется «прозрачным» типом волновой картины (сложен гранитами), верхний имеет очень сложное строение. Часто 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 общей мощностью 4,8 м (при $V=6$ см/нс), выполняющих палеорусло. 1 — кровля коренных пород (гранитов)

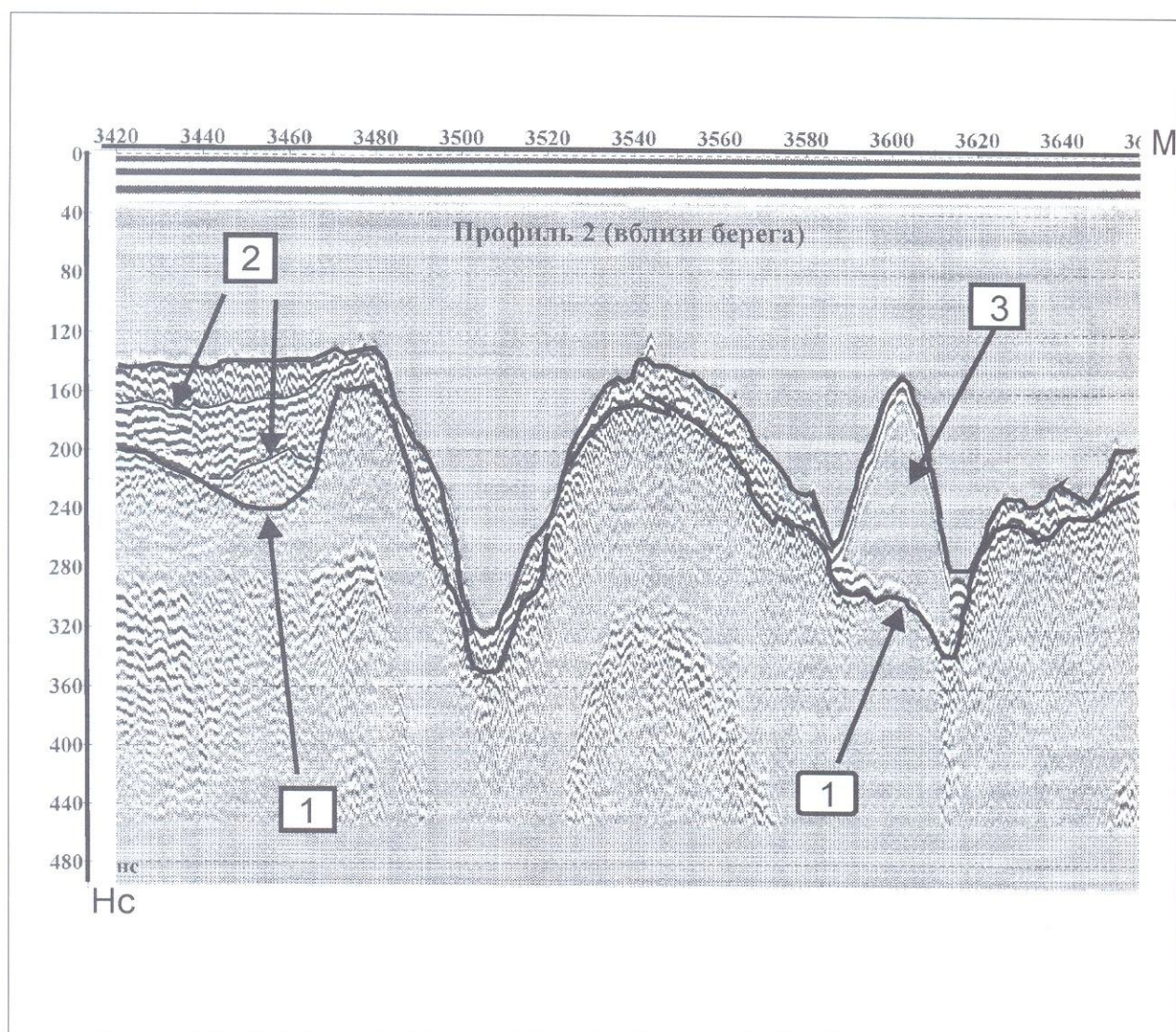


РИС. 10.9. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного на реке с антенной 300 МГц.

Работы производились с резиновой лодки. Целью исследований был поиск участков, перспективных на россыпные месторождения полезных ископаемых. К ним, в первую очередь, относятся палеорусла 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. 10.8. 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 (палеорусло?), заполненное тремя комплексами.

По аналогии с профилем, изображенным на рис. 10.6, 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

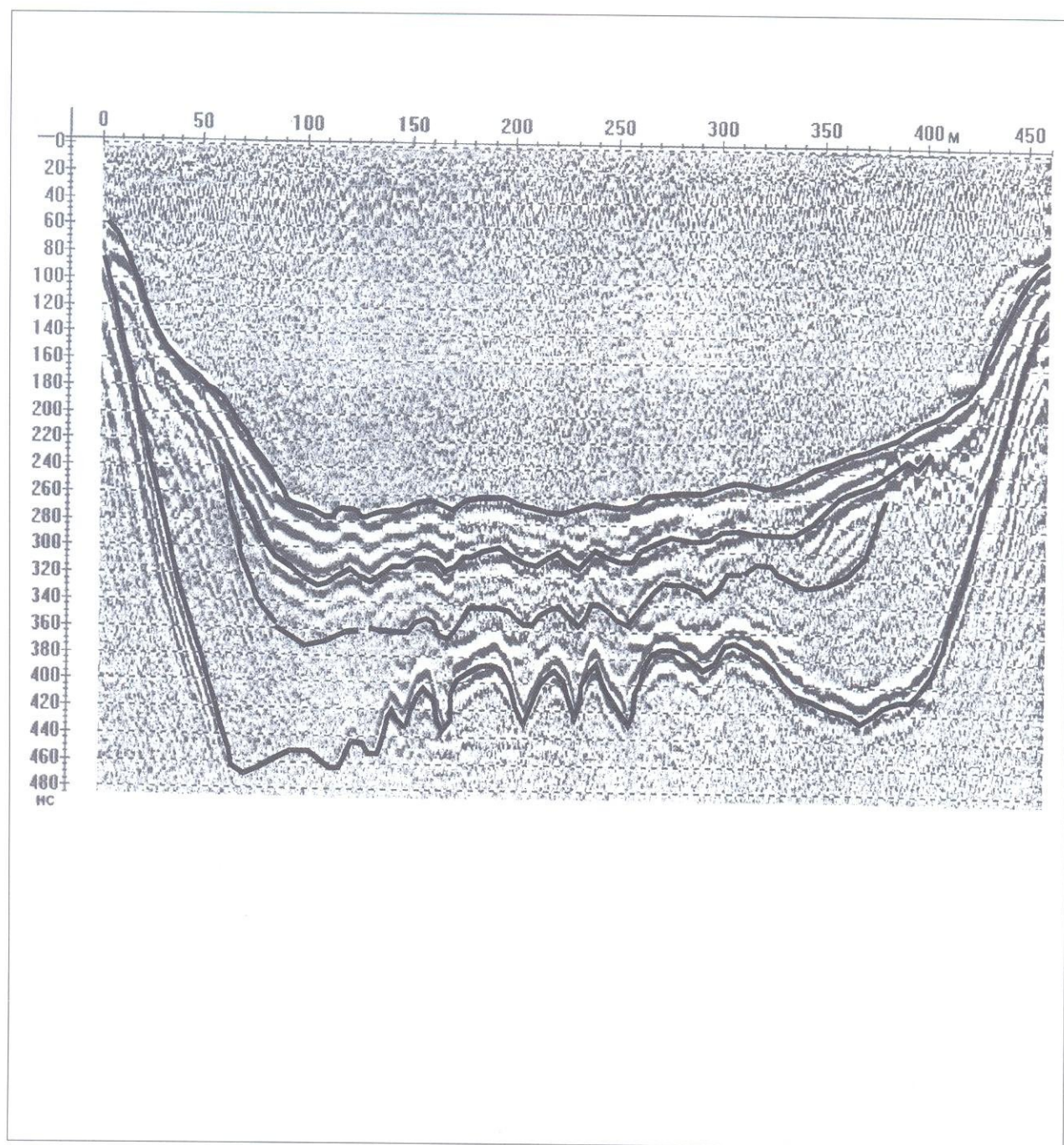


РИС. 10.10. Георадиолокационный профиль, выполненный с незранированной антенной 75 МГц (использовался георадар Зонд-10).

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 — более 6 метров (при скорости распространения электромагнитных волн в водонасыщенных осадках 6 см/нс). По данным интерпретации выделено 4 георадарных комплекса, границы между которыми показаны черными линиями. Материал предоставлен И.Н. Модиным

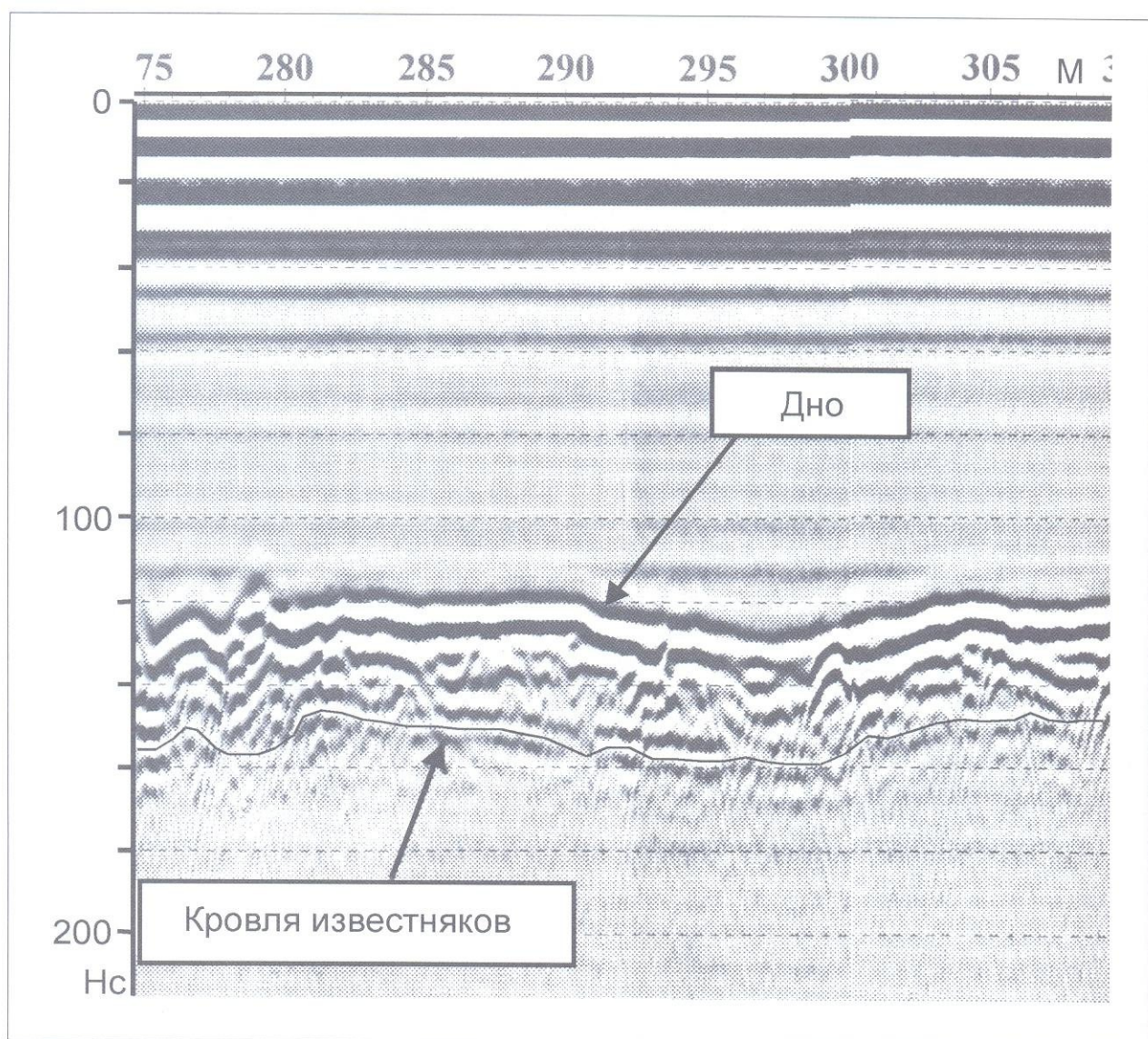


РИС. 10.11. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного на Водоотводном канале в г. Москве с экранированной антенной 300 МГц.

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 пробоботбора, 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

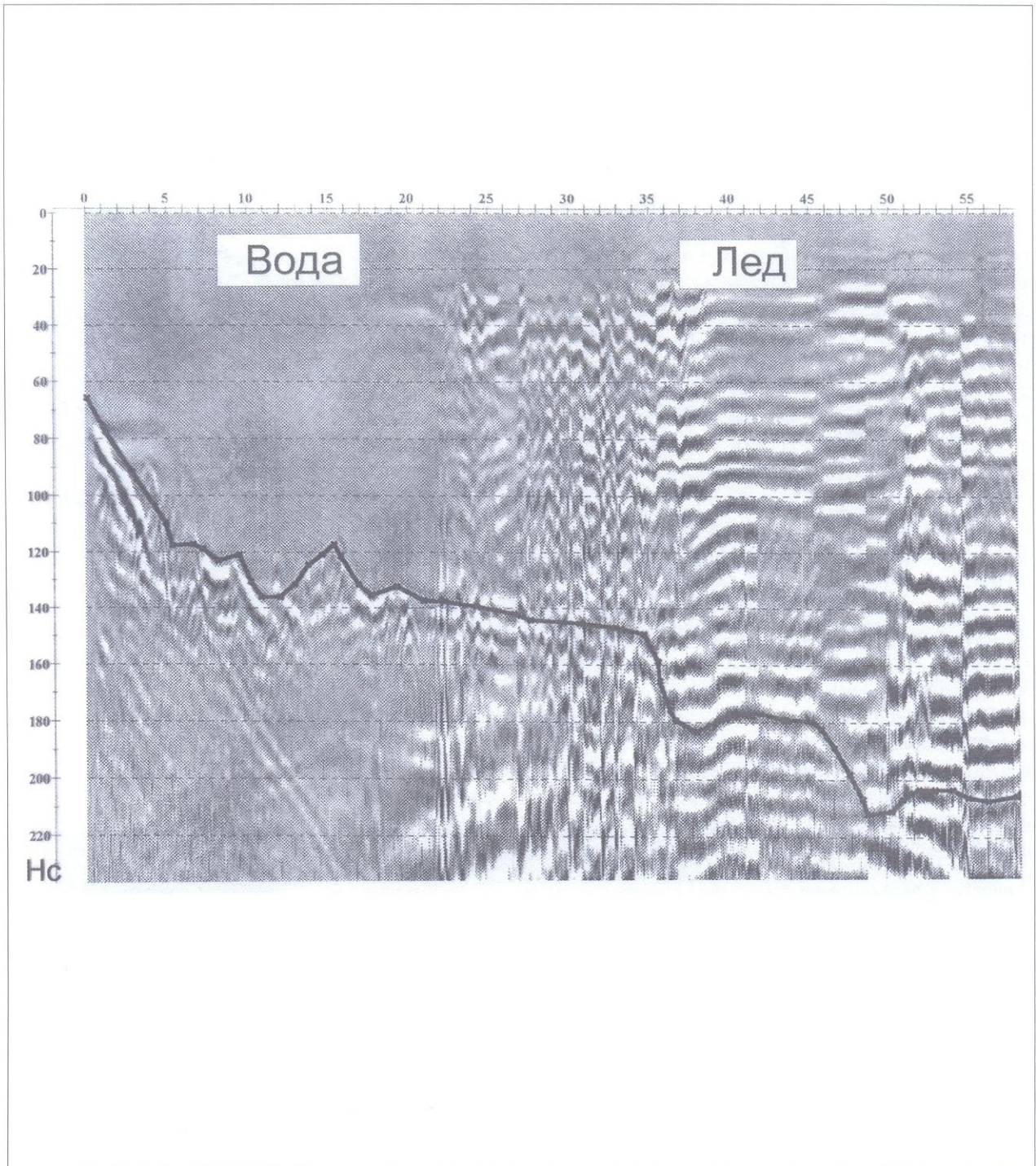


РИС. 10.12. Георадиолокационный профиль, выполненный при протаскивании радара с чистой воды на «слоистый» лед. Использовалась экранированная антенна 300 МГц.

В правой части профиля рельеф дна нарисован по данным бурения, так как в волновом поле на фоне интенсивных помех он не выделяется вследствие реверберации между мерзлыми и талыми слоями

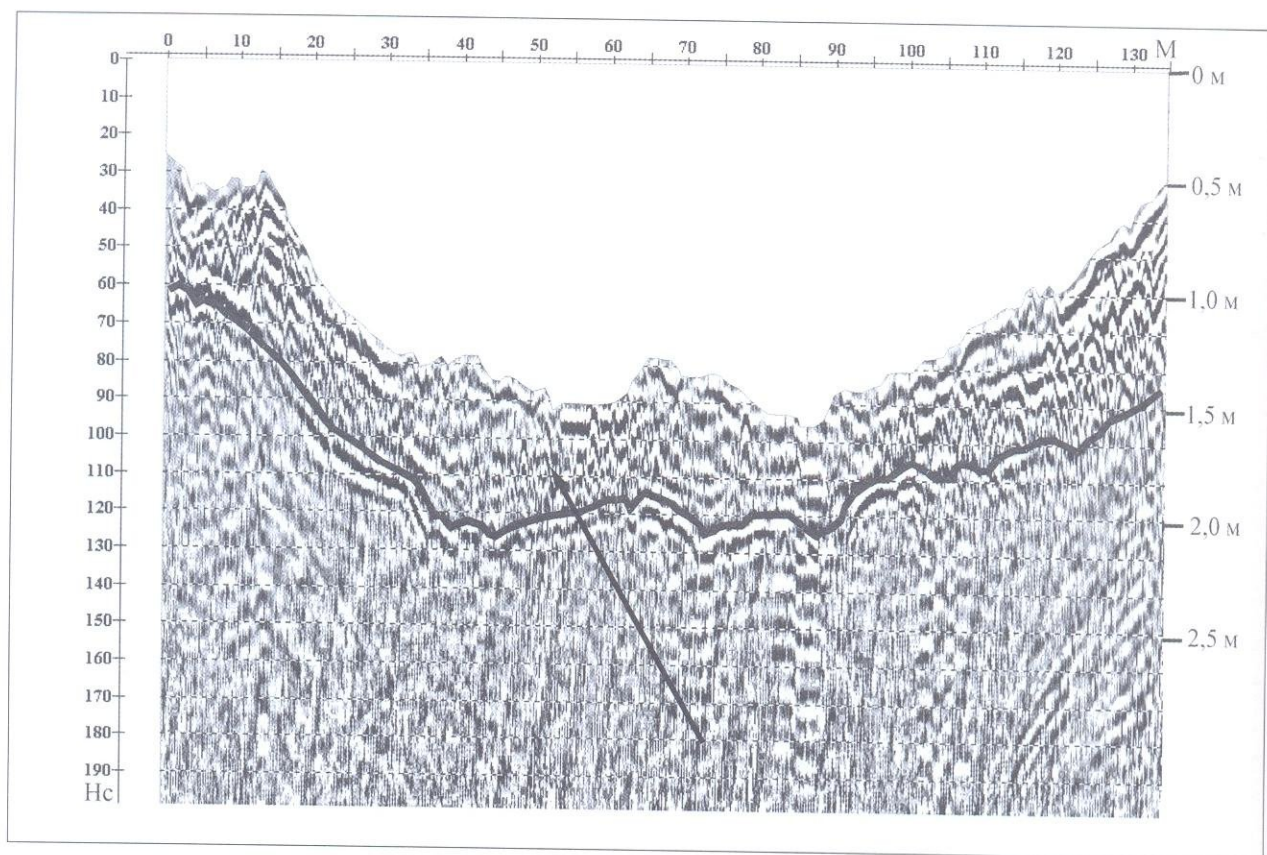


РИС. 10.13. Георадиолокационный профиль через озеро.

Цель исследований — изучение мощности современных илов для разработки мероприятий по очистке и реабилитации этого водоема. Черная линия — подошва современных илов. Справа дан масштаб в метрах для воды

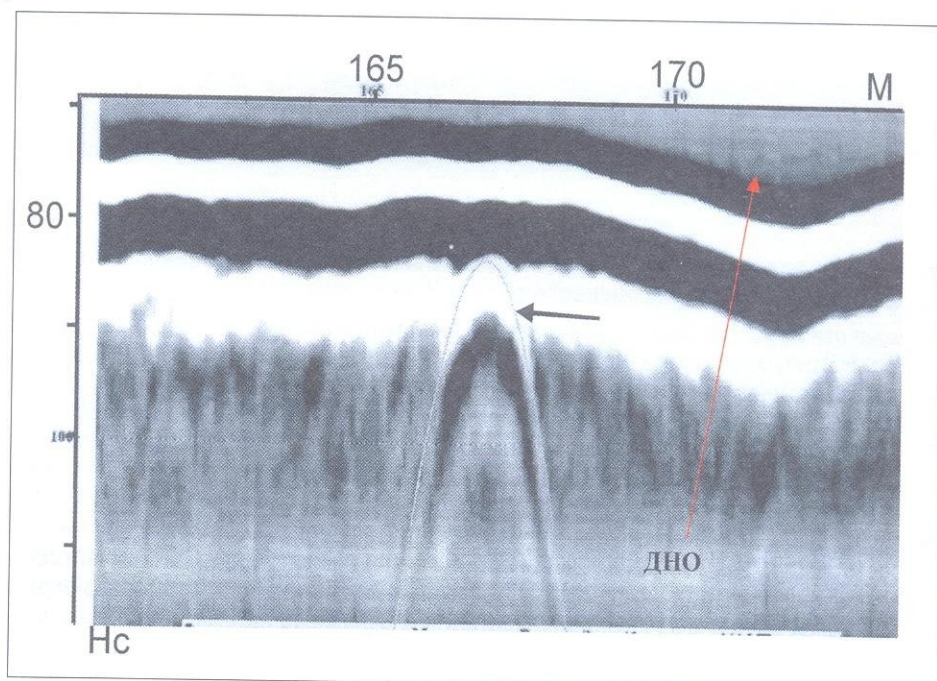


РИС. 10.14. Определение положения трубопровода под дном реки.

Стрелкой показана теоретическая гипербола

Георадиолокационные исследования на водоемах, как и любые результаты геофизических наблюдений необходимо заверять. В некоторых случаях это представляет собой сложную задачу, поэтому для предварительной оценки литологии осадков можно использовать динамические особенности волновой картины. На рисунке 10.15 даны фрагменты профиля, выполненные на реке с экранированной антенной 300 МГц. Целью работ было определение местоположения современных загрязненных илов. По результатам предварительных работ было известно, что дно практически везде сложено чистыми песками. Анализ данных съемки показал, что оси синфазности донного импульса характеризуются большими амплитудами отражения, как, например, видно на рис. 10.15А. Современные, сильно загрязненные и богатые органикой современные илы черного цвета, представляют собой гелеобразную массу и должны, очевидно, иметь меньший коэффициент отражения, т.е. оси синфазности на таких участках должны быть выражены не так отчетливо. На нижнем рисунке (Б) дан фрагмент профиля, на котором центральный участок выделяется значительно меньшими амплитудами отражения, поэтому эти осадки предположительно можно выделить как современные органогенные илы.

С помощью георадиолокации можно также изучать донные формы рельефа (рис. 10.16). По ним можно судить о литологии донных осадков и скоростях движения воды. На рисунке 10.16 даны примеры записи песчаных волн и рифелей (пояснения см. в подписи к рисунку).

Выше уже упоминалось, что глубинность исследований по воде сильно зависит от удельного электрического сопротивления (УЭС) воды. На рис. 10.17 изображен поперечный георадиолокационный профиль через р. Москву, вода в которой имеет низкие значения УЭС — около 25 Ом·м. Целью работ было изучение разреза по всему профилю в связи со строительством моста, однако решить эту задачу методом георадиолокации не удалось. На данном примере видно, что информативная запись оканчивается на времени около 200 нс, т.е. на глубине 3,0–3,3 метра, тогда как максимальная глубина дна на этом профиле составляет 5,5 метра (приблизительно 330 нс двойного времени). Профили, изображенные на рис. 10.7, 10.9 и 10.10, были получены при УЭС воды более 60 Ом·м и, как видно, глубинность исследований в 5 метров не является пределом.

На этом примере (рис. 10.17) видно, что при работах на акваториях глубинность зависит не только от центральной частоты зондирующего импульса, но и от удельного сопротивления воды. При выборе методики работ следует ознакомиться с параметрами изучаемой среды.

В переменных электромагнитных полях все величины, которые привычно рассматриваются как действительные при нулевых или близких к ним частотах, становятся комплексными.

Анализ соответствующих математических выражений [18] и расчеты для реальных значений проводимостей воды, глубин исследуемых водоемов и центральных частот зондирующих импульсов (антенн) позволили построить следующие графики, которые можно использовать при проектировании георадиолокационных исследований на водоемах (рис. 10.18–10.20).



На верхнем рисунке (А) дно сложено чистыми песками, на нижнем (Б) — в центральной части выделяется участок, где амплитуда отражения в 4–5 раз меньше (показан стрелками). По этому признаку эти осадки были выделены как современные органогенные илы

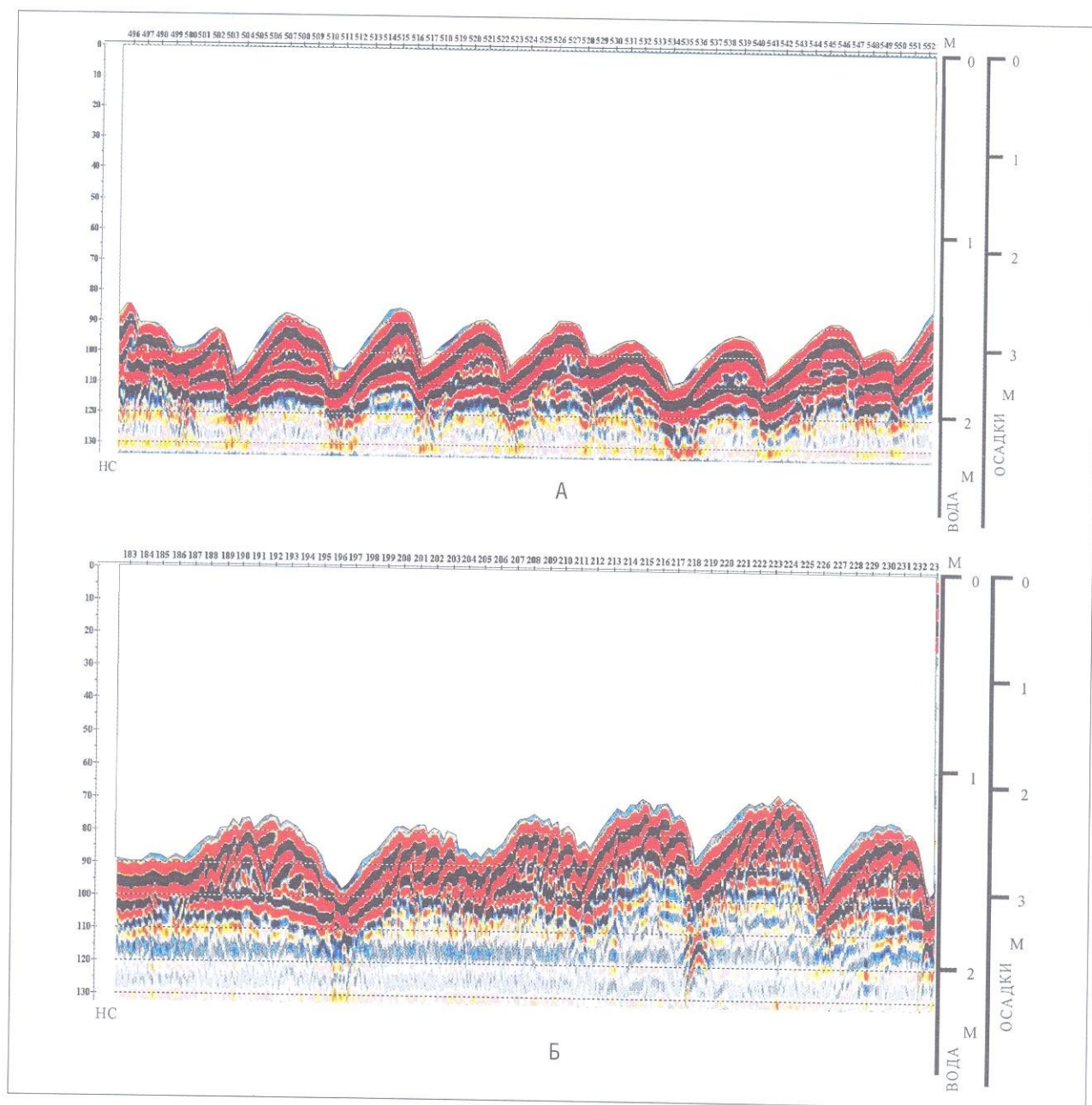


РИС. 10.16. Фрагменты георадиолокационных профилей, выполненных на реке с экранированной антенной 300 МГц.

По данным предварительных наблюдений известно, что дно сложено песками, которые при значительных скоростях течения воды часто образуют специфические донные формы рельефа — песчаные волны. Для них характерна асимметричная форма. Максимальная высота песчаных волн в среднем составляет 40–50 см, длина — 8–10 метров (рис. 10.16А). На некоторых волнах наблюдаются более мелкие формы рельефа в виде ряби — так называемые рифели (рис. 10.16Б). Высота рифелей достигает 5–6 см, расстояние между гребнями — десятки сантиметров. Известно, что формирование рифелей начинается при скоростях движения воды около 0,25 см/сек. Наиболее полная в геоморфологическом отношении картина возникает при скоростях 0,4–0,5 см/сек. При увеличении скорости потока до 0,75–0,8 см/сек рифели начинают разрушаться

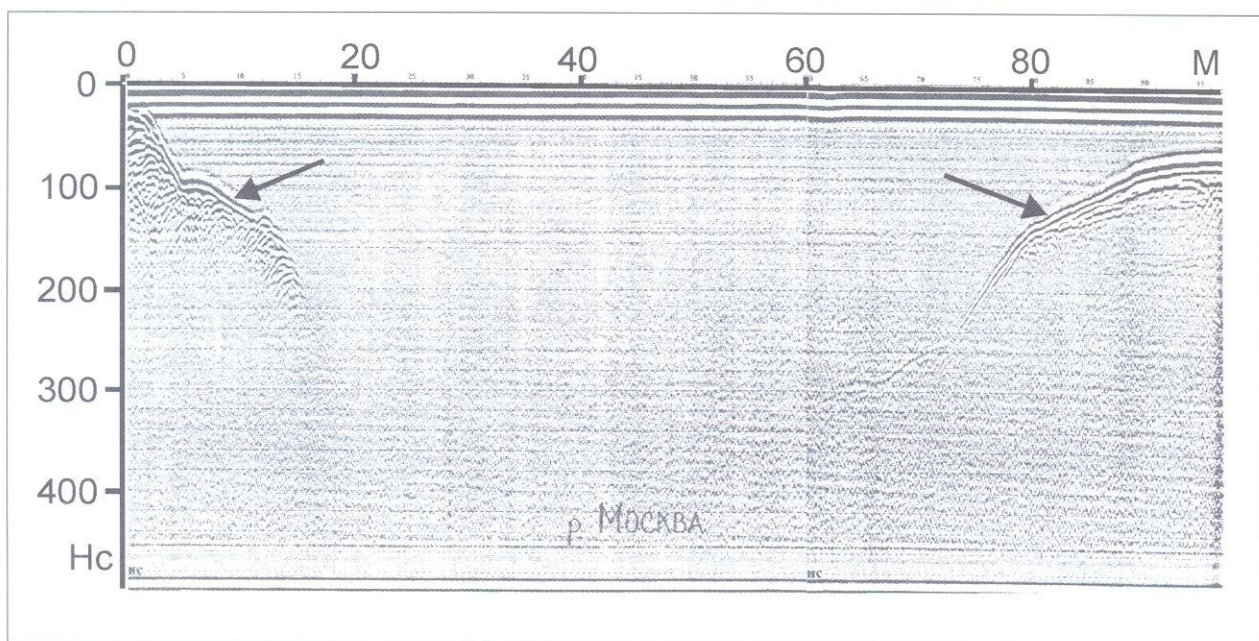


РИС. 10.17. Поперечный георадиолокационный профиль через р. Москву, выполненный с экранированной антенной 300 МГц. Удельное электрическое сопротивление воды около 25 Ом·м.

Максимальная глубина дна на этом профиле 5,5 метра — 330 нс двойного времени. Информативной записи на глубинах более 200 нс (3,3 метра) нет, т.е. центральная часть русла реки оказалась не изученной

На рисунке 10.18 представлен график зависимости сопротивления ρ от частоты зондирующего импульса, где параметром является $\sigma'_f = 1/\rho'$.

При детальном изучении верхней части осадочного чехла сейсмоакустические исследования с высокочастотными источниками оказываются мало эффективными, если дно сложено газонасыщенными осадками. Это обусловлено большим коэффициентом отражения и поглощением упругих волн. Опыт работ на пресноводных акваториях показал, что газонасыщенные осадки развиты на многих участках дна, т.е. применение сейсмоакустического метода часто в принципе невозможно. Георадиолокация позволяет решать в большинстве случаев задачи подобного рода. На рис. 10.21 представлены сейсмоакустический (верхний) и георадиолокационный (нижний) профили по одному и тому же участку. В правой части сейсмоакустического профиля выделяется участок записи, на котором отсутствуют оси синфазности отраженных волн, что связано с газонасыщенностью придонных осадков (этот участок показан стрелкой). На нижнем георадиолокационном профиле на этом же участке наблюдаются оси синфазности отраженных электромагнитных волн, т.е. присутствие газа в донных отложениях не является препятствием для георадиолокационных наблюдений.

В заключение необходимо отметить следующее:

1. Метод георадиолокации на пресноводных акваториях может применяться как самостоятельно, так и в комплексе с непрерывным сейсмораспределением (НСР). В отличие от НСР георадиолокационное профилирование технологически более простой метод и может проводиться с пластиковых или резиновых лодок.
2. В зависимости от удельного электрического сопротивления воды глубинность метода георадиолокации по воде в настоящее

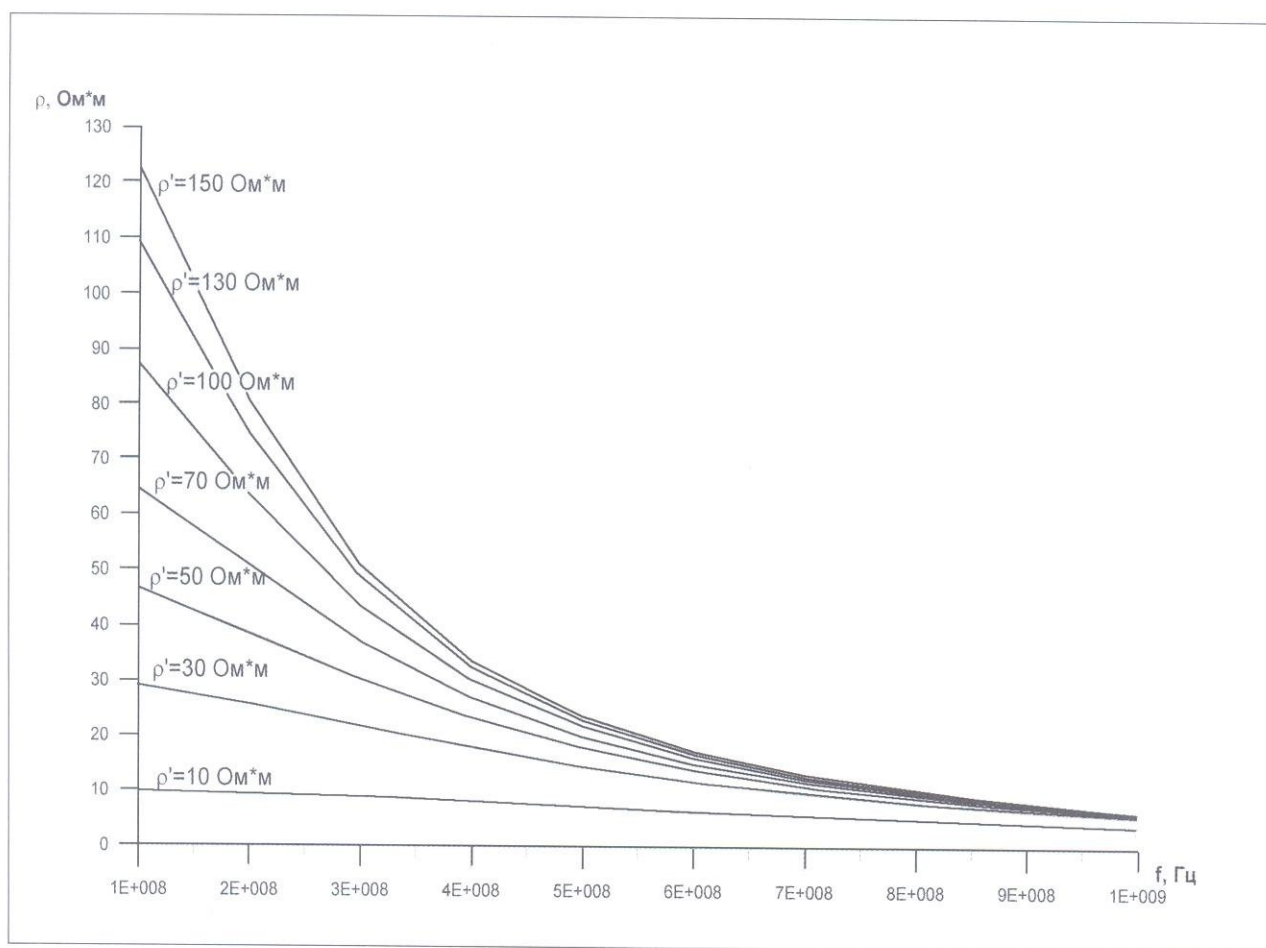


РИС. 10.18. График зависимости удельного сопротивления воды от частоты зондирующего импульса

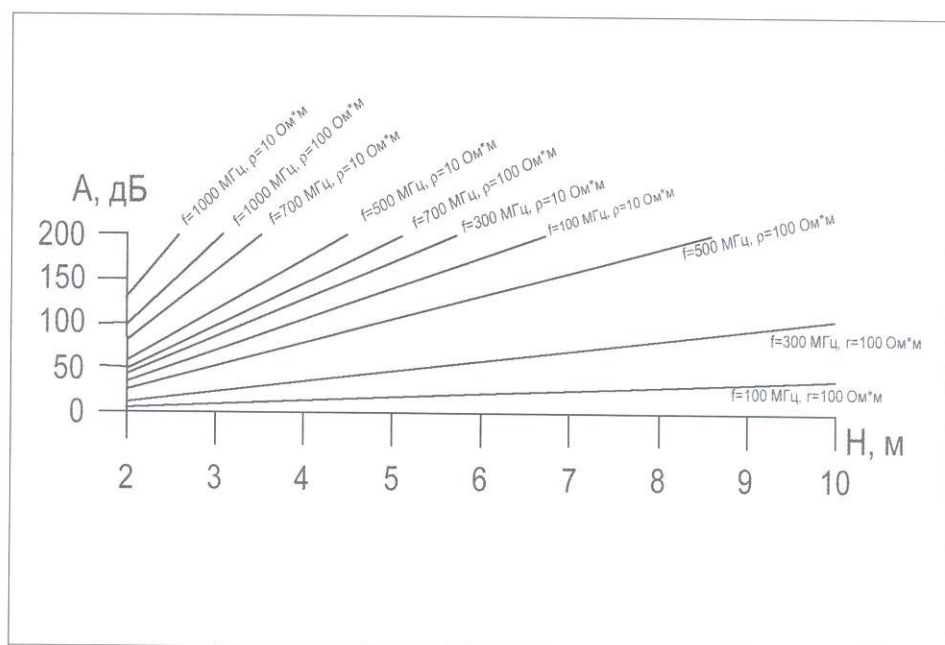


РИС. 10.19. График изменения коэффициента затухания на единицу глубины для различных частот зондирующего импульса и сопротивлений

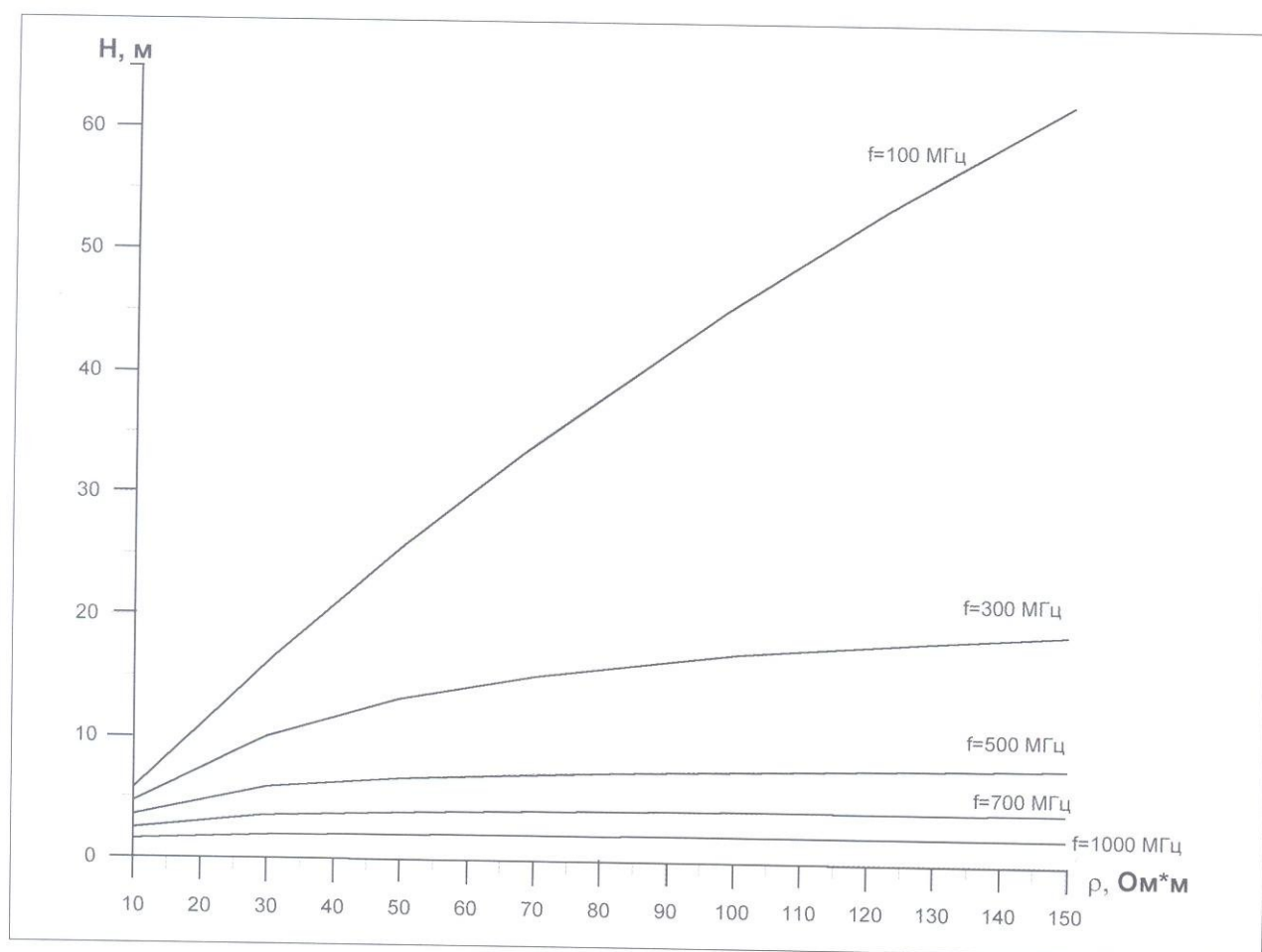


РИС. 10.20. График зависимости глубинности — возможности увидеть отражение от дна — при различных значениях удельного сопротивления воды и для различных центральных частот зондирующего импульса при отсутствии шума и динамическом диапазоне аппаратуры 120 дБ

время достигает 8–10 метров. Глубина исследований по грунту при отсутствии в разрезе глин и суглинков не превышает 5–7 метров.

3. Георадарное профилирование может применяться на участках с глубиной воды в несколько десятков сантиметров.

4. При необходимости изучить разрез с высокой вертикальной разрешающей способностью до глубин в 10 и более метров метод георадиолокации можно использовать в комплексе с НСП для детального изучения верхней части разреза.

5. Метод георадиолокации весьма эффективен при работах на акваториях с широким развитием газонасыщенных илов, которые являются «экраном» для метода НСП.

6. Интерпретация данных георадиолокации проводится в основном с использованием тех же методических приемов, что и при интерпретации сейсмических данных.

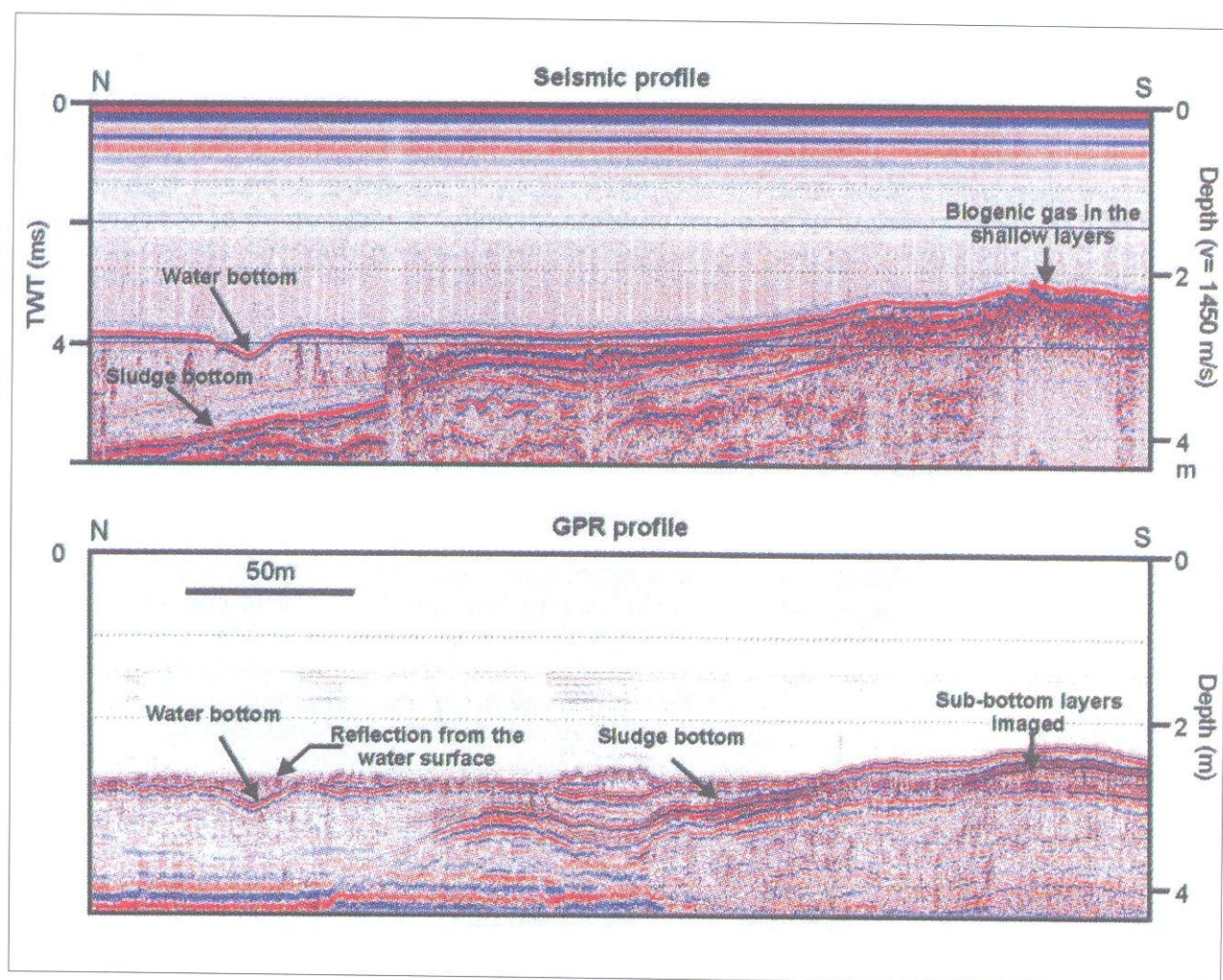


РИС. 10.21. Сопоставление сейсмоакустического и георадиолокационного профилей, выполненных по одному и тому же участку.

В правой части сейсмоакустического профиля (верхний рисунок) в придонном слое развиты газонасыщенные осадки (показаны стрелкой), которые «экранируют» нижележащие отложения. На этом же участке на георадиолокационном профиле отчетливо выделяются оси синфазности отраженных электромагнитных волн, т.е. газонасыщенные осадки не являются помехой при проведении георадиолокационных работ [55]

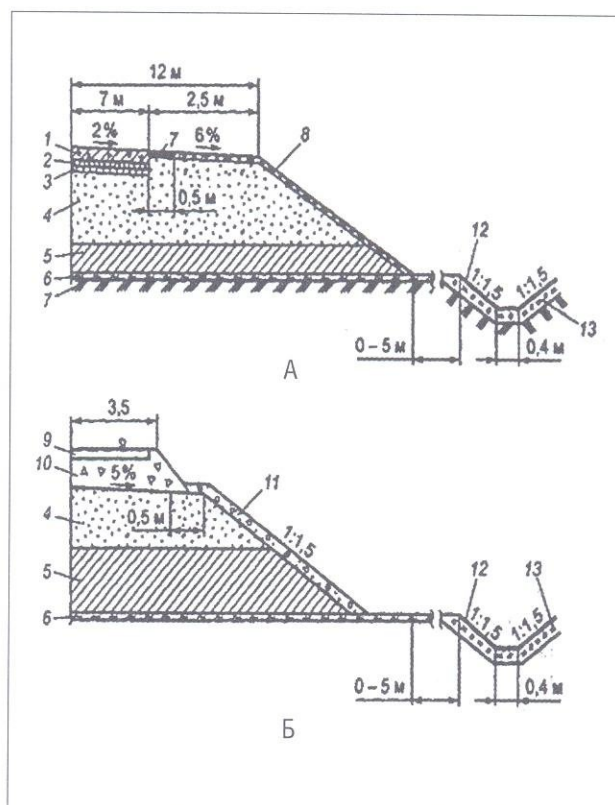
ГЛАВА 11.

Обследование железнодорожных насыпей

Преобладающая часть железнодорожных насыпей была построена в прошлом или даже в позапрошлом веках, т.е. иногда более ста лет назад. За прошедшее время в связи с существенными изменениями в режиме движения поездов, основными из которых являются повышение скорости движения, вес поездов, длина составов и частота движения, нагрузка на железнодорожные насыпи резко увеличилась, что привело на многих участках к их значительным деформациям. Вследствие этого одной из основных задач по изучению насыпей становится, кроме выяснения причин возникновения деформаций на конкретных участках, прогнозирование зон возможных нарушений с целью выработки оптимальных решений по их предупреждению. Опыт исследования строения насыпей различными методами, накопленный за последние годы как российскими, так и зарубежными специалистами показывает, что одним из основных методов их изучения является метод подповерхностной георадиолокации. Его главными преимуществами являются высокая мобильность, большая детальность в плане, достаточная в большинстве случаев глубинность исследований и высокая вертикальная разрешающая способность. Эффективное использование георадиолокации обусловлено главным образом тем, что верхняя часть насыпей сложена, как правило, сухими песчано-гравийными материалами, которые по своим электрофизическим характеристикам крайне благоприятны для применения данного метода (рис. 11.1). В основании насыпи залегают обычно глины или суглинки, которые являются «экраном» для нижележащих отложений вследствие большого поглоще-

РИС. 11.1. Пример конструкции автомобильной (А) и железной дорог (Б). В скобках указаны примерные толщины слоев.

- 1 — жесткое покрытие из железобетонных плит (18 см); 2 — верхняя часть основания из тощего бетона (10 см); 3 — нижняя (дренажная) часть основания покрытия из крупнозернистого песка (5 см); 4 — рабочий (защитный) слой земляного полотна из дренирующих материалов; 5 — насыпь; 6 — растительный покров; 7 — основание насыпи; 8 — дерн; 9 — рельсо-шпальная клетка; 10 — балластная призма (50 см); 11 — гравийно-галечная отсыпка (20 см); 12 — железобетонная плита ювета (5 см); 13 — торф (20 см). [31]



ния в них электромагнитных волн. Из опыта работ известно, что максимальная мощность слоев, залегающих на суглинках (песка и гравия) нигде не превышала 4,0 метров, т.е. вполне доступна изучению георадаром.

С помощью метода георадиолокации решаются следующие задачи:

1. *Определяются толщины основных слоев верха насыпи (балластной призмы, т.е. слоя гравия, и защитного или дренирующего слоя, т.е. слоя песка);*
2. *Изучается характер границ между слоями, что может указывать на процессы перемешивания гравийного и песчаного материала и суффозии;*
3. *Определяется рельеф кровли основной площадки насыпи (т.е. кровли суглинков или глин), форма которой может указывать на наличие таких структур как балластные корыта, мешки и т.д.;*
4. *Выявляются места скопления грязевых гнезд или линз в толще балластной призмы, приводящие к развитию выплесков;*
5. *Определяются места локального переувлажнения, которые при динамических нагрузках способствуют нарушению внутренней структуры несвязных грунтов, из которых сложена верхняя часть насыпей;*
6. *Определяются мощности балластных шлейфов на откосах и т.д.*

По результатам исследований все деформации можно разделить на два основных типа (рис. 11.2). К первому типу относятся нарушения, затрагивающие балластную призму и защитный слой. В кровле суглинков (или глин) никаких деформаций в этом случае практически не наблюдается. Ко второму типу относятся нарушения, затрагивающие все слои насыпи, включая суглинки или глины.

РИС. 11.2. Схема основных типов деформаций и причин, их вызывающих, в железнодорожных насыпях по данным георадиолокационных исследований



Первый тип деформаций обусловлен развитием таких процессов как суффозия, глинизация, оползневые процессы и т.д. На рис. 11.3 показан фрагмент георадиолокационного профиля, на котором видно, что границы между слоями насыпи на некоторых участках выделяются плохо. Так, в интервале 40–70 метров оси синфазности отраженных от кровли слоя песка волн (на времени около 8 нс) практически исчезают. Это связано, по-видимому, с тем, что гравий как бы «тонет» в песчаном слое. Аналогичная картина наблюдается на времени около 25 нс на пикетах 0–40 метров. Здесь также местами исчезает четкая граница между слоем песка и основанием насыпи. В обоих случаях это связано, вероятно, с процессами суффозии.

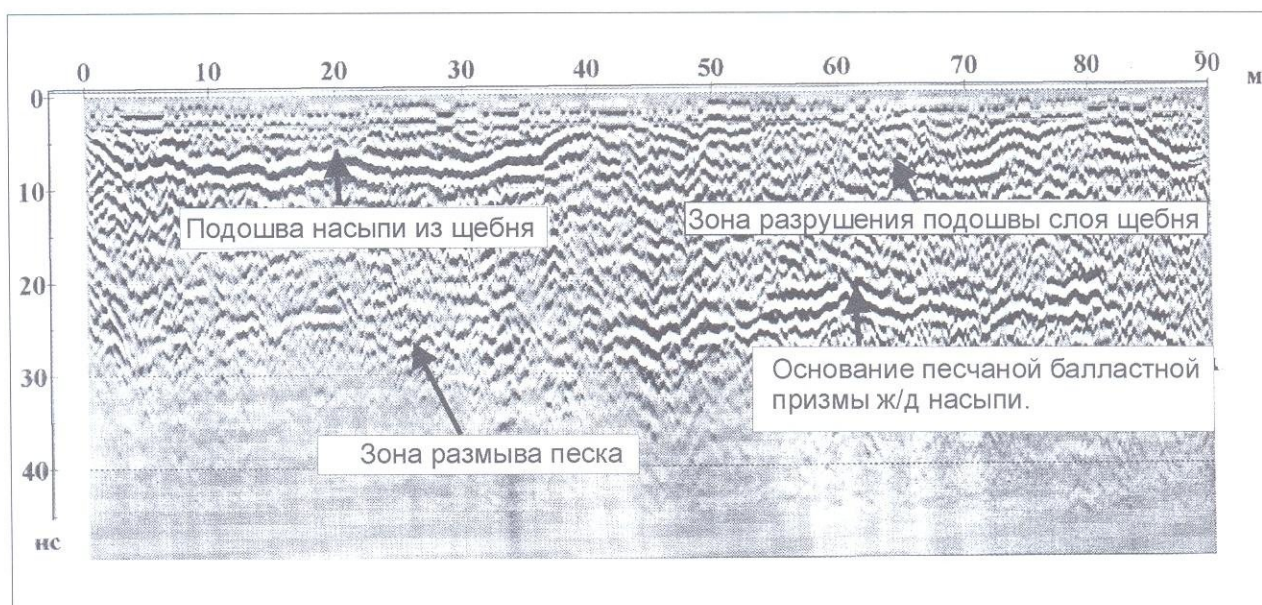


РИС. 11.3. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного с антенной 750 МГц вдоль ж/д насыпи.

Исчезновение четких осей синфазности отраженных волн от подшвы слоя щебня на пикетах 40–70 метров и от подшвы слоя песка на пикетах 0–40 метров свидетельствует, по-видимому, о развитии процессов суффозии.

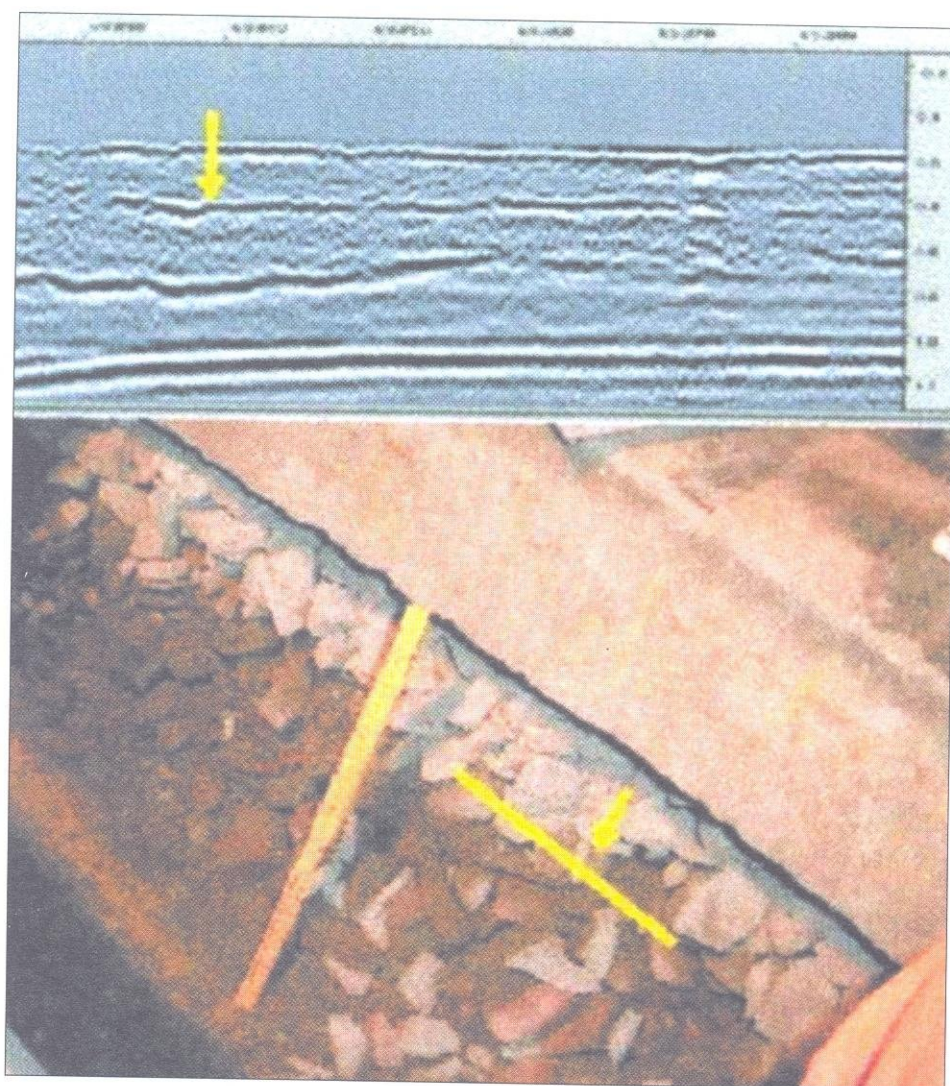
Одним из распространенных дефектов балластной призмы является возникновение так называемых грязевых гнезд или линз, обусловленных глинизацией слоя гравия (рис. 11.4). На таких участках происходит локальное переувлажнение, что под действием динамических нагрузок иногда приводит к формированию выплесков. На профиле видно, что эти отражающие границы имеют локальное распространение.

Нарушение структуры верхних слоев насыпи также может быть обусловлено оползанием части насыпи (рис. 11.5). Вследствие глинизации отдельных участков слоев песка или гравия может происходить их локальное переувлажнение, что под действием динамических нагрузок иногда приводит к развитию процессов оползания.

К второму типу деформаций отнесены нарушения верха насыпи, которые прослеживаются в структуре всех слоев. По вертикали они достигают нескольких десятков сантиметров, редко больше, и, как правило, отчетливо выделяются по структурным признакам (рис. 11.6, показаны стрелками). Ширина этих зон меняется от нескольких метров до нескольких десятков метров.

РИС. 11.4. Фрагмент радарограммы и фото разреза балластного слоя железнодорожной насыпи.

Желтая стрелка на радарограмме соответствует кровле загрязненного слоя, указанной на фото желтой линией. При проведении георадиолокационных исследований использовалась антенна 1000 МГц. [47]



Одной из основных причин деформаций являются так называемые балластные корыта, которые представляют собой углубления различной формы в кровле суглинков, из которых затруднен отток воды. Балластные корыта имеют разнообразную форму и могут образовываться как в верхней части насыпи, так и на ее склонах (рис. 11.7). В переувлажненных отложениях, выполняющих эти углубления (песках и верхней части суглинков), под воздействием динамических нагрузок происходит резкое изменение физико-механических свойств, что может привести к оползанию, уменьшению несущей способности грунтов и деформациям рельсошпальной решетки. На рис. 11.8 представлен поперечный георадиолокационный профиль с интерпретацией, на котором выделяется два участка прогиба кровли суглинков. Один имеет в сечении симметричную форму и находится непосредственно под рельсошпальной решеткой, второй участок расположен на левом склоне железнодорожной насыпи.

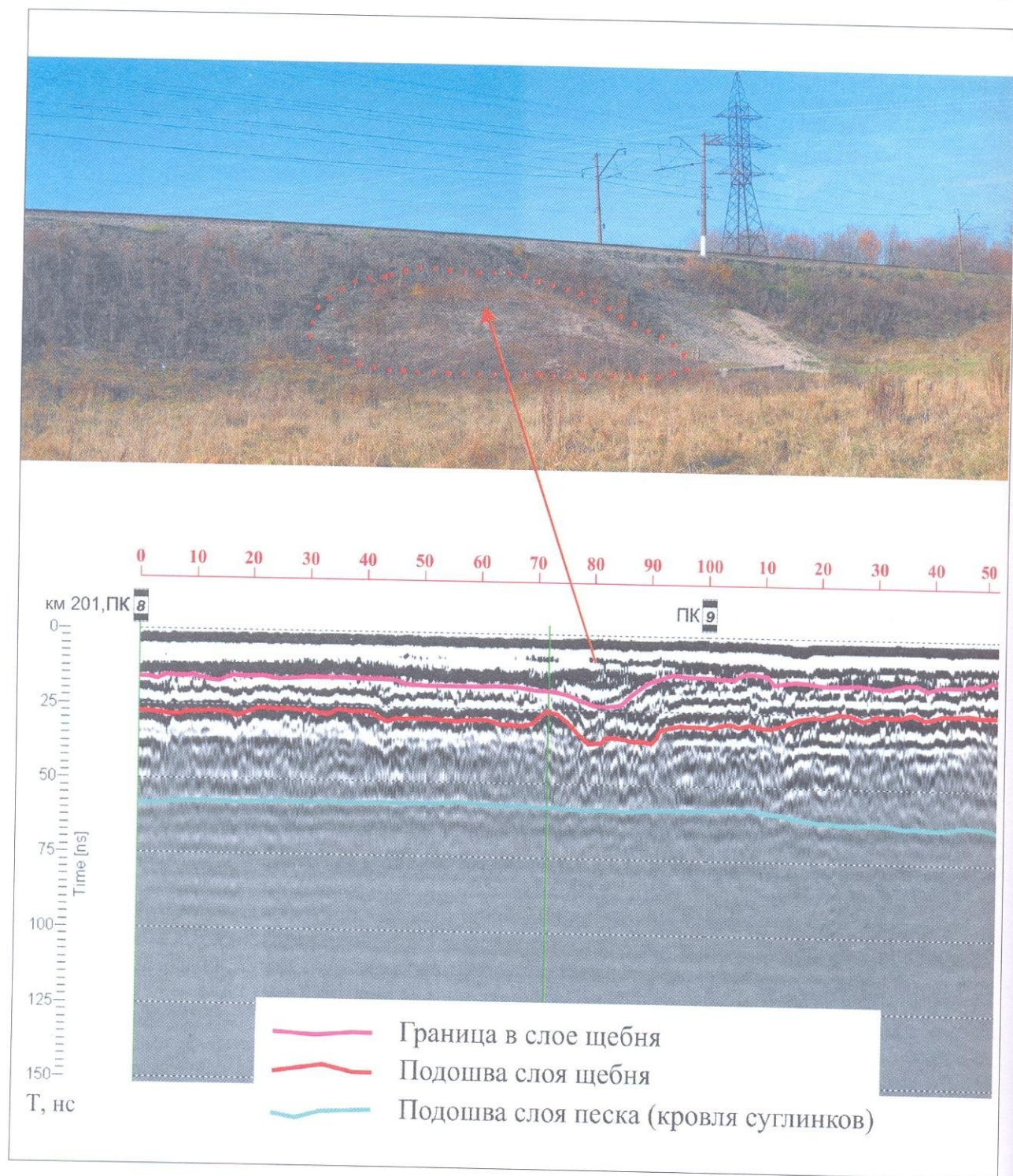


РИС. 11.5. Фрагмент георадиолокационного профиля через участок насыпи с деформацией (пикеты 70–90 метров), не затрагивающей кровлю суглинков. Нарушение связано с оползанием верху насыпи (см. фото, стрелкой показано оползневое тело)

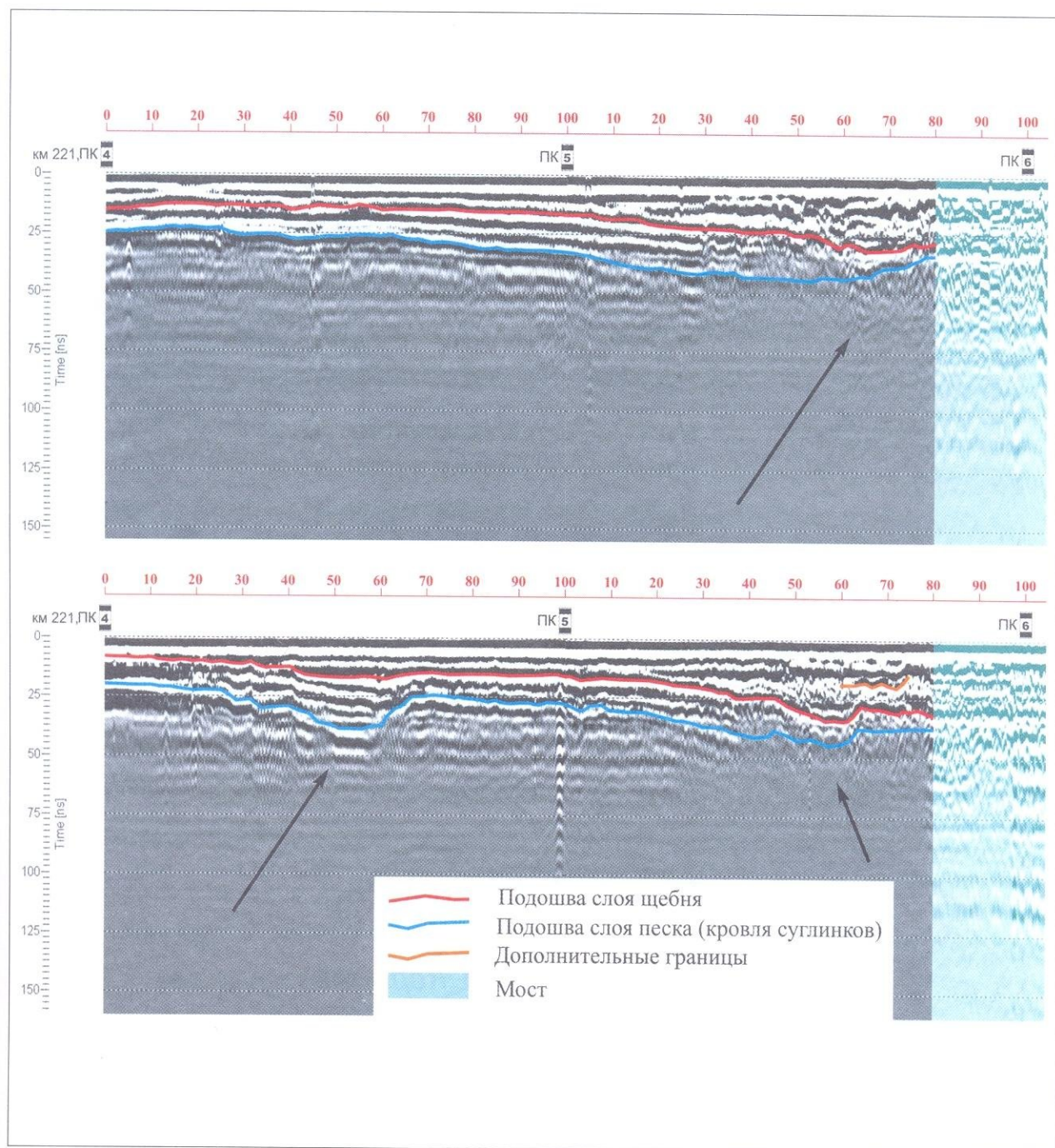


РИС. 11.6. Георадиолокационные профили по обочинам пути.

Участки проседания показаны стрелками. В правой части разрезов перед мостовыми конструкциями участки проседания верха насыпи выделяются по обеим обочинам, а просадка между 4 и 5 пикетами (км 221, ПК4+30 — км 221, ПК4+70) наблюдается только по одной стороне насыпи. Поперечные к насыпи деформации часто возникают при ее «расползании» под действием больших нагрузок. В этом случае для выяснения причин нарушения привлекаются геодезические наблюдения за специальными реперами

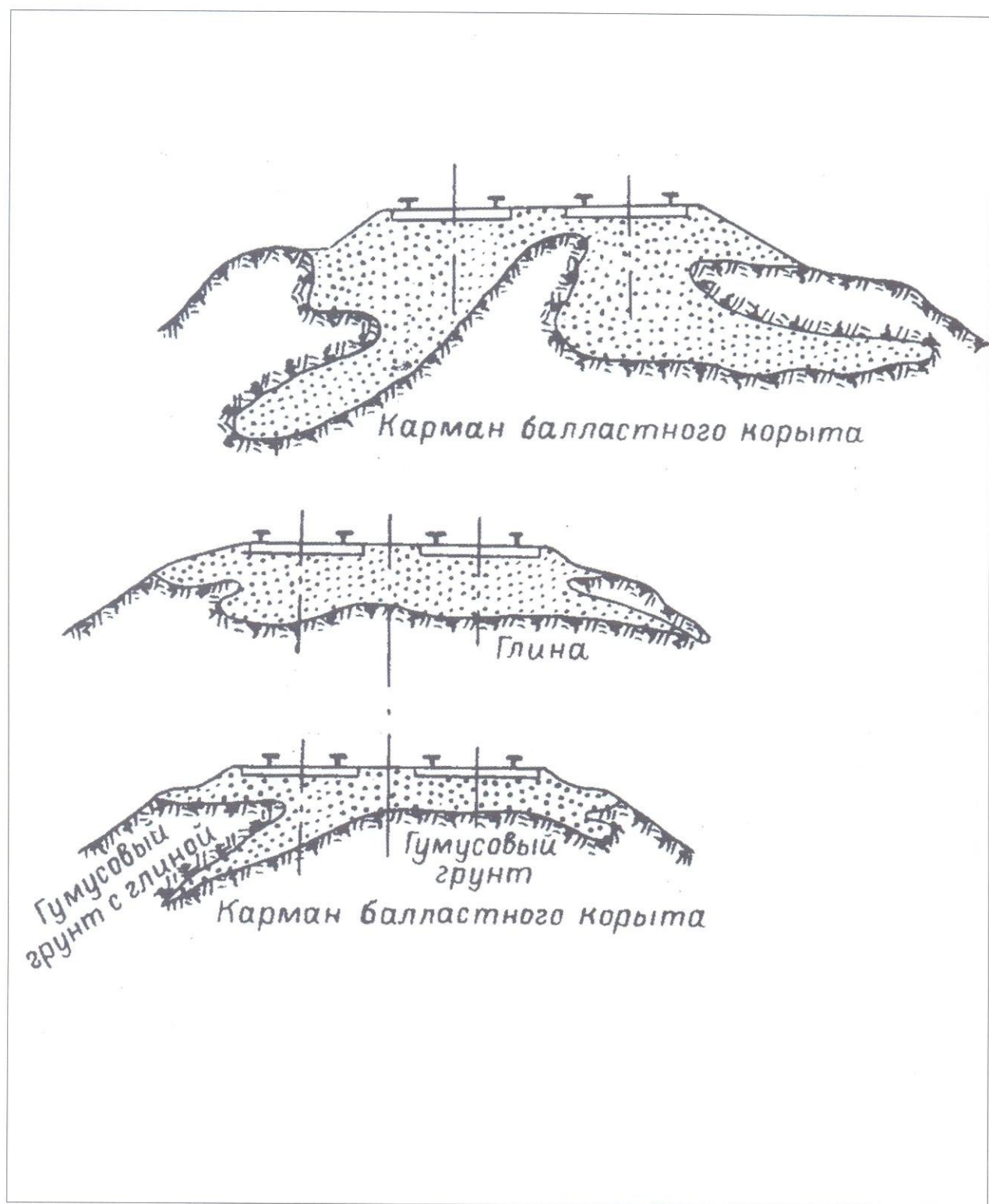


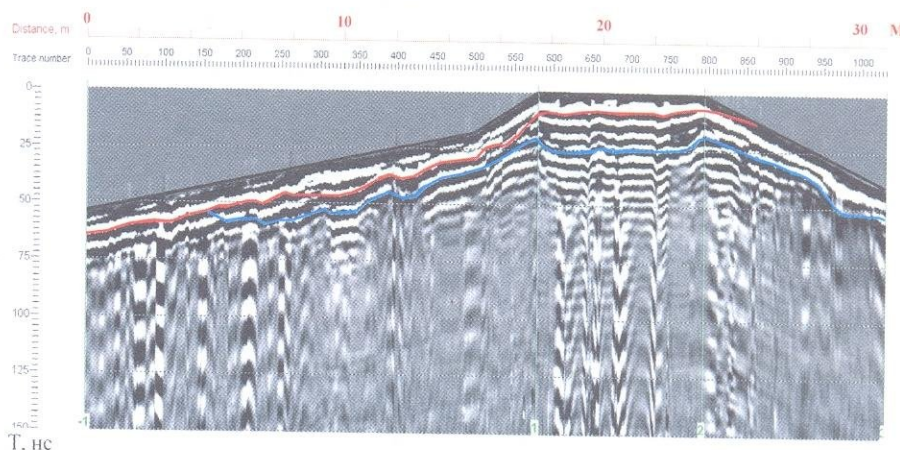
РИС. 11.7. Примеры балластных корыт на железнодорожных насыпях. [8]

РИС. 11.8. Поперечный георадиолокационный профиль через железнодорожную насыпь с интерпретацией.

Профиль выполнен с экранированной антенной 300 МГц. Под верхней частью насыпи наблюдается прогибание кровли суглинков с амплитудой около 0,3–0,4 м, т.е. сформировалось балластное корыто. Аналогичная форма образовалась и на левом склоне насыпи (см. рис.)

Временной георадиолокационный разрез верхней части насыпи по профилю 4.

Масштаб: горизонтальный 1:200

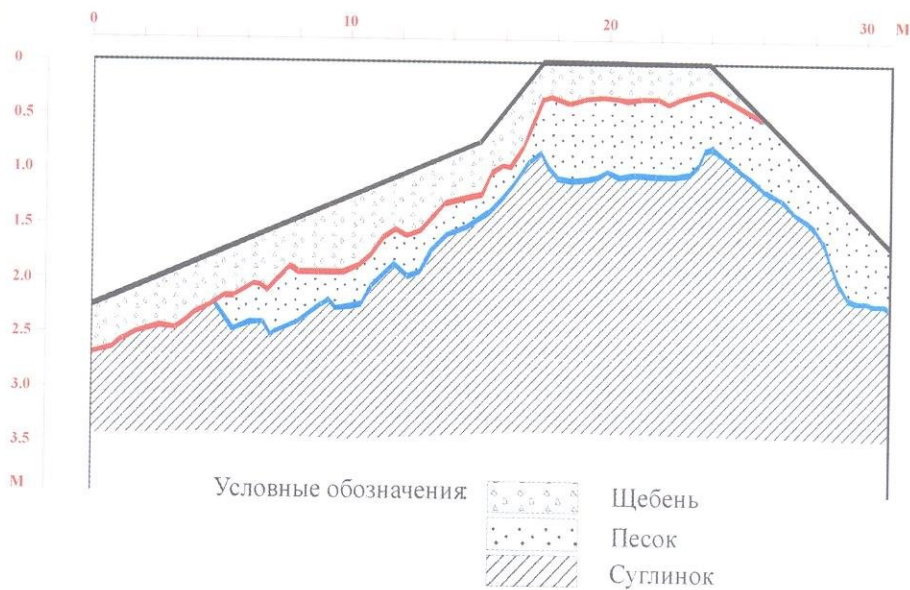


Условные обозначения

- Подошва слоя щебня
- Подошва слоя песка (кровля суглинков)

Глубинный разрез верхней части насыпи по профилю 4.

*Масштаб: горизонтальный 1:200
вертикальный 1:50*



Условные обозначения

- Щебень
- Песок
- Суглинок

РИС. 11.9. Фото участка высокой ж/д насыпи, где на протяжении длительного времени происходило проседание и вспучивание насыпи.

Стрелками показаны:
1 — участок вспучивания;
2 — участок проседания



С балластными корытами иногда связаны участки с значительными просадками и вспучиванием верха насыпи, приводящими к интенсивным деформациям рельсошпальной решетки. Один из таких участков, где на протяжении длительного времени происходили подобные процессы, показан на рис. 11.9. Максимальная высота насыпи составляет здесь 18 метров, причем основная часть сложена глинами и суглинками. Осмотр склонов насыпи показал, что никаких видимых следов нарушений не наблюдается — отсутствуют трещины отрыва, нет признаков оползания или оплывания. Для выяснения причин деформаций было выполнено четыре продольных георадиолокационных профиля — два по обочинам насыпи и два по междутью (рис. 11.10).

РИС. 11.10. Схема расположения продольных георадиолокационных профилей на участке высокой насыпи

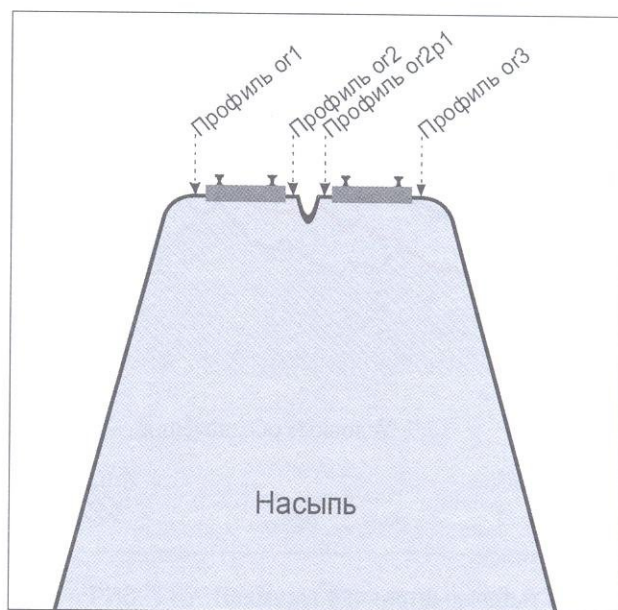
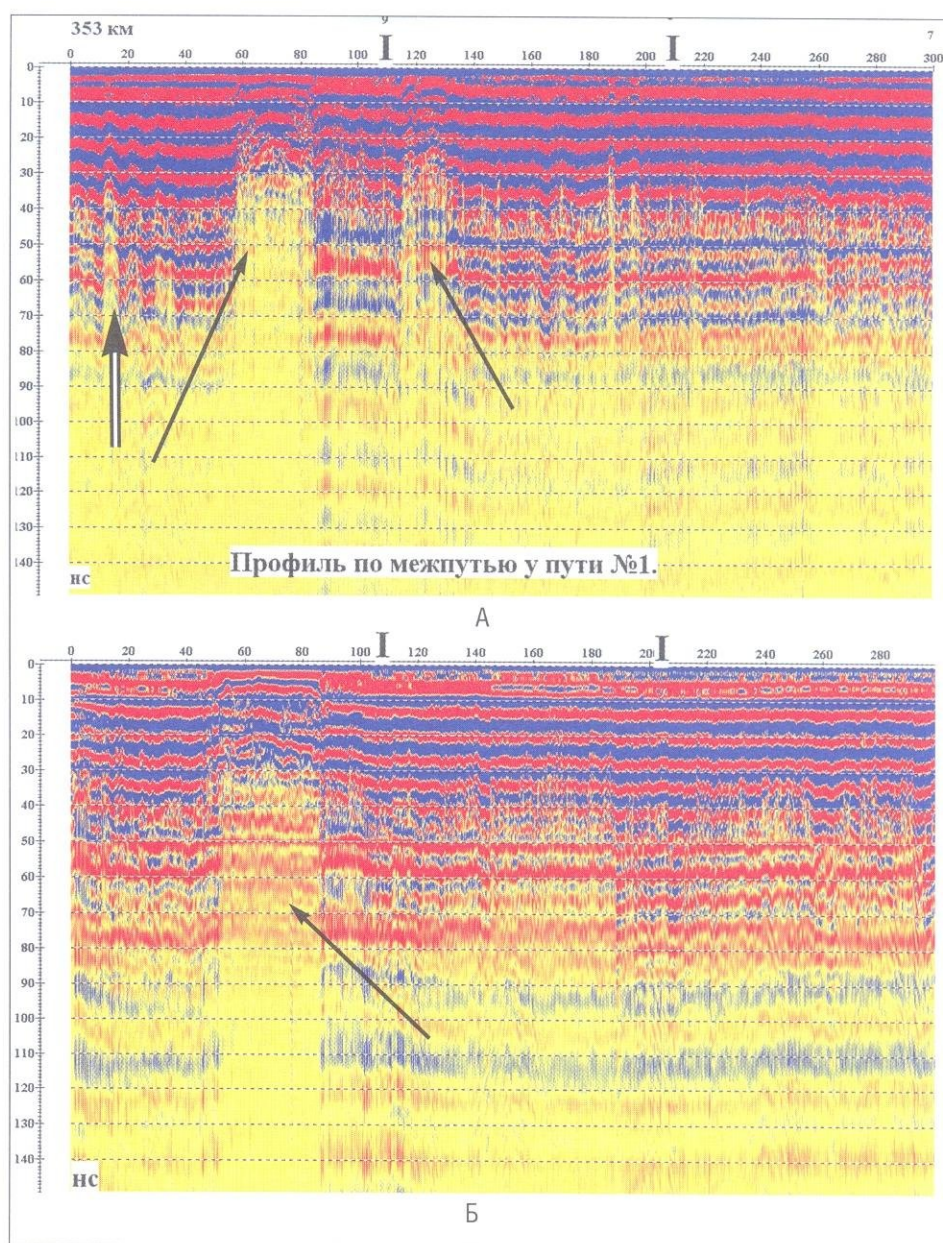


РИС. 11.11. Фрагменты георадиолокационных профилей, выполненных по междутью. Использовалась экранированная антенна 300 МГц.

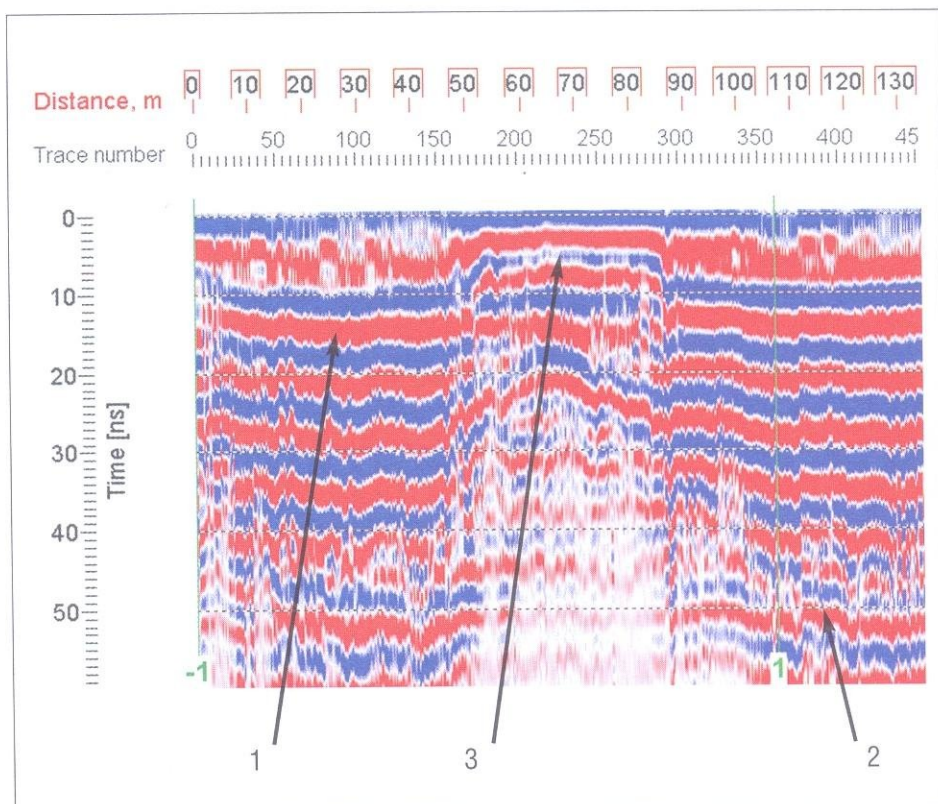
Расстояние между профилями около 2 метров. На одном профиле (А) выделяются две широкие аномальные зоны, на другом (Б) — одна (аномальные зоны показаны черными стрелками). Белой стрелкой показана аномальная зона шириной в несколько метров. Объяснения см. в тексте



На профилях, расположенных по обочинам насыпи никаких признаков аномальных зон выявлено не было, что подтвердило результаты визуального осмотра ее склонов. На разрезах по междутью было выделено три аномальных зоны, которые в плане совпали с зонами деформаций рельсошпальной решетки (рис. 11.11, 11.12). Следует подчеркнуть, что в целом аномальный участок занимает центральную часть верха насыпи и никак не выражен на ее склонах и обочинах. Аномальные зоны характеризуются деформацией осей синфазности отраженных волн в их верхней части и отсутствием отражений, начиная с глубин около 30 нс (1,5 м). Так как склоны этой насыпи довольно крутые, то сделать поперечные

РИС. 11.12. Фрагмент георадиолокационного профиля через аномальную зону (положение см. на рис. 11.10А).

1 — подошва слоя гравия; 2 — кровля суглинков; 3 — зона вспучивания



разрезы через эти зоны не удалось, однако можно утверждать, что причиной деформаций являются балластные корыта, содержащие большое количество воды (в районе расположения насыпи на протяжении нескольких месяцев шли сильные дожди). Вследствие переувлажнения происходит разупрочнение верхней части слоя суглинков и песчаных отложений защитного слоя под действием динамических нагрузок, причем увеличение влажности ускоряет разрушение структурных связей грунта [6]. С этим, по-видимому, связано нарушение стратификации в выделенных аномальных зонах и, как следствие, отсутствие осей синфазности отраженных волн на радарограммах. Кроме выделенных зон протяженностью в 30–40 метров (вдоль насыпи), в левой части профиля, изображенного на рис. 11.11А, выделяются узкие зоны шириной в несколько метров, которые по типу волновой картины практически не отличаются от рассмотренных выше. Следует лишь отметить, что эти узкие зоны в настоящее время никак не проявляются в структуре верха насыпи. По-видимому, их следует рассматривать как потенциально опасные.

Причинами деформаций грунтов в теле насыпи могут быть процессы, происходящие как в самой насыпи, так и вне ее. Основные типы нарушений, возникающие в первом случае, были рассмотрены выше. Вместе с тем в ряде районов деформации насыпи обусловлены процессами, протекающими за ее пределами в коренных отложениях. К ним можно отнести прежде всего карстово-суффозионные процессы и оползневые процессы, если насыпь проходит по склонам. Ниже будут рассмотрены

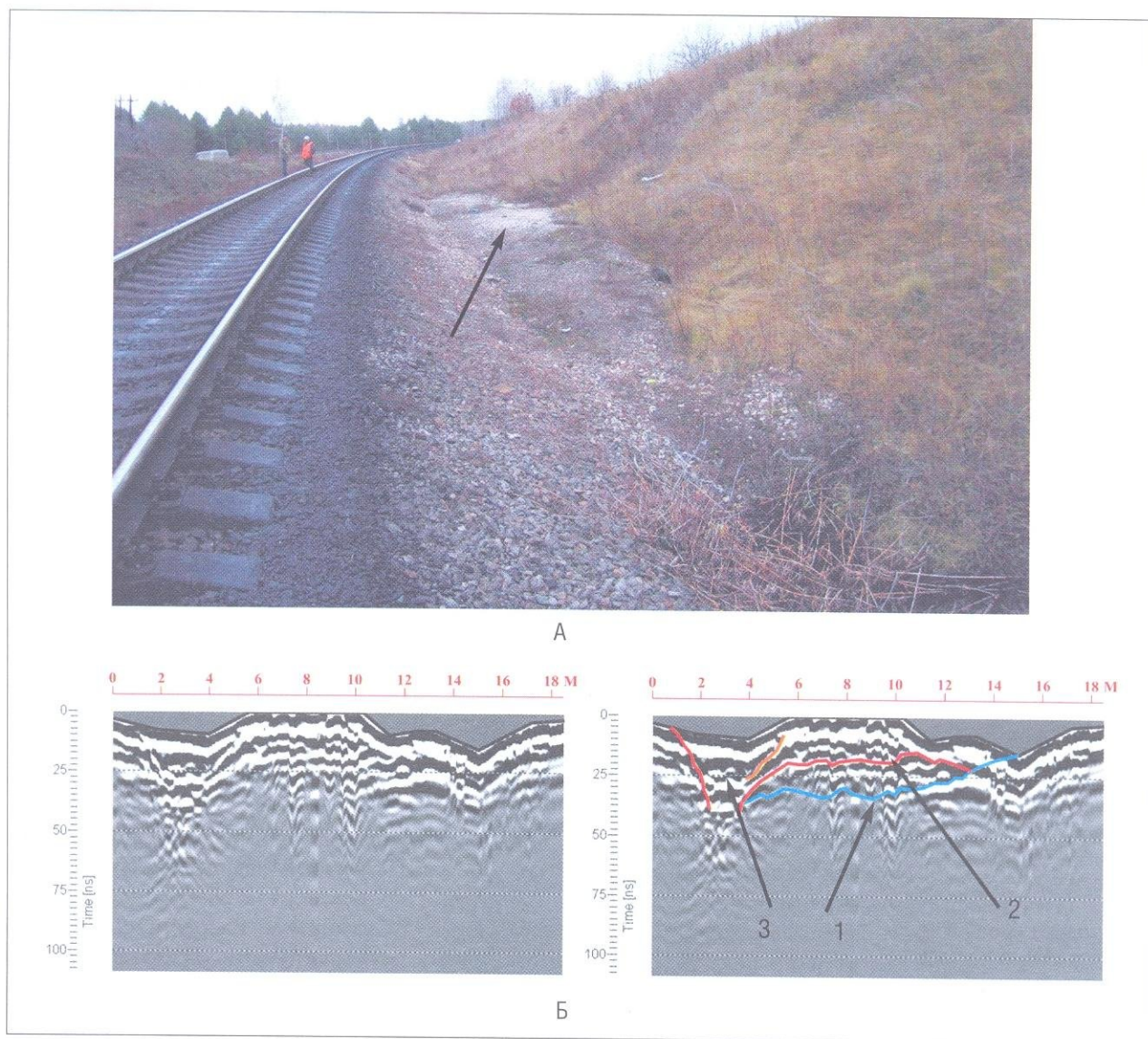


РИС. 11.13. Засыпанный карстовый провал рядом с ж/д насыпью (А, показан стрелкой) и проходящий через него и поперек насыпи георадиолокационный профиль (Б, слева — профиль, справа — он же с интерпретацией).

- 1 — кровля суглинков;
- 2 — подошва балластной призмы (слоя щебня);
- 3 — карстовый провал

несколько примеров деформаций, связанных с карстообразованием и суффозией.

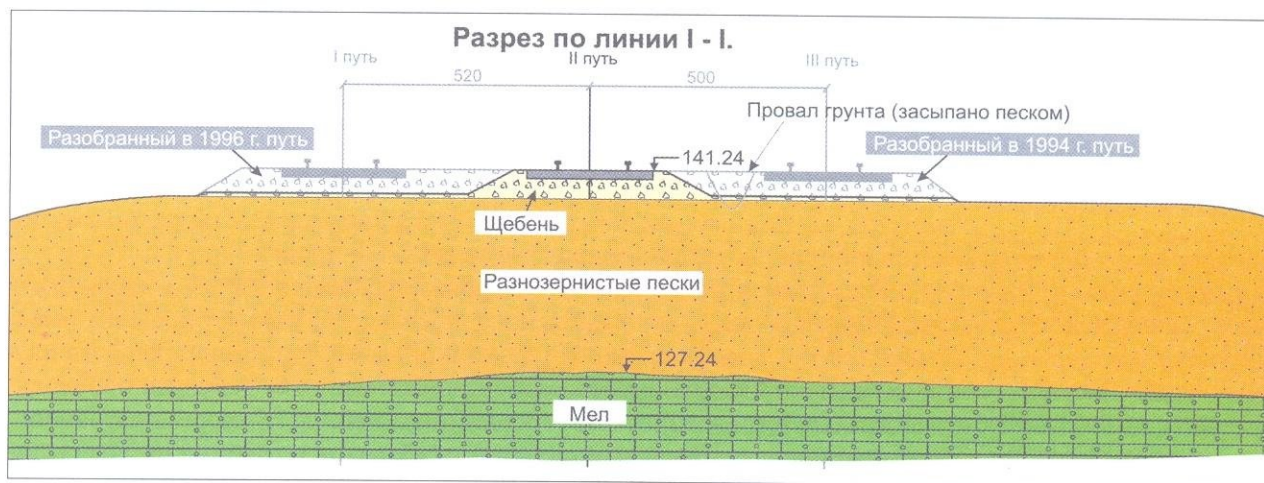
Если провалы грунта, связанные с образованием карстовых полостей в карбонатах, видны на поверхности, то целью георадиолокационных исследований является оконтуривание ослабленной зоны в плане и поиск потенциально опасных зон. На рис. 11.13 представлен георадиолокационный профиль через засыпанный карстовый провал.

В данном случае карстовый провал находится рядом с насыпью и причина небольших просадок на прилегающем участке насыпи, выявленных по результатам георадиолокационных работ, очевидна. В тех случаях, когда просадка имеет место, для выяснения ее генезиса необходимы данные о геологическом строении верхней части разреза изучаемого района, в первую очередь о наличии карбонатов и глубине их залегания.

Особенно необходимо отметить, что при небольших высотах насыпи просадки, как правило, связаны со строением грунтов основания, как это видно на рассмотренном примере (рис. 11.13А). При исследовании высоких (6–20 м) насыпей, когда большая их часть сложена мощным слоем глин или суглинков, причина деформаций зачастую обусловлена процессами, происходящими внутри насыпи.

Более сложная задача — прогноз карстово-суффозионной опасности — возникает при исследовании участков, где на насыпи неоднократно отмечались провалы, а глубина залегания карбонатных пород практически недоступна непосредственному изучению георадаром, например, более 10–15 метров. При таком строении разреза необходимо привлекать данные других методов, например, сейсморазведки. Целью георадиолокационных исследований в такой ситуации является изучение детального строения верхней части разреза для решения двух основных задач. Первая задача заключается в обнаружении зон провалов, которые происходили на поверхности насыпи за последние годы и которые, как правило, уверенно выделяются на радарограммах. Так как карстово-суффозионные процессы развиваются снизу вверх, то второй задачей георадиолокации является обнаружение аномальных зон, выделяющихся на радарограммах в нижних частях разреза, но не достигающих приповерхностных слоев, и выяснение их природы. Очевидно, что должны анализироваться только те аномалии, которые не обусловлены изменением свойств вышележающих отложений. Эти аномальные зоны, предположительно, можно увязывать с развитием суффозионных процессов. Примером может служить участок насыпи протяженностью около 2 км, на котором неоднократно происходили просадки грунта. Он был обследован комплексом геофизических и инженерно-геологических методов, включая бурение, с целью оценки карстово-суффозионной опасности. По материалам предыдущих работ предполагалось наличие здесь карстовых полостей в карбонатах и процессов суффозии в перекрывающих отложениях. Разрез насыпи показан на рис. 11.14. Насыпь сложена четвертичными разнородными песками мощностью 12–14 метров, залегающими на меловых сильно

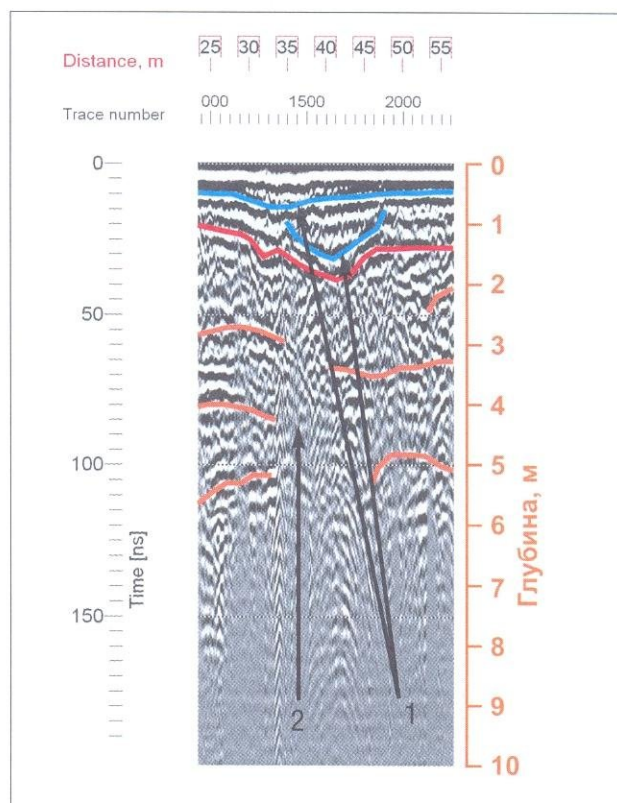
РИС. 11.14. Геологический разрез через железнодорожную насыпь по данным бурения (объяснения см. в тексте)



обводненных отложениях. Слой суглинков или глин отсутствует, что создает благоприятные предпосылки для использования георадиолокации. По верху насыпи было пройдено 6 продольных и 16 поперечных профилей. Использовалась экранированная антенна 300 МГц. Глубинность исследований в среднем составила 6–8 метров. Анализ данных показал, что на радарограммах можно выделить два основных типа деформаций. К первому типу, который был описан выше (см. рис. 11.6), относятся просадки протяженностью до 10 метров и глубиной до 1 метра (рис. 11.15 и 11.16).

РИС. 11.15. Фрагмент георадиолокационного профиля через зоны просадок:

1 — зоны просадок; 2 — аномальная зона (зона потери корреляции осей синфазности или резкого ослабления амплитуд отраженных волн)



В некоторых случаях просадки происходили практически на одном месте (рис. 11.16), в других — смещались на несколько метров в плане (рис. 11.15). Деформации второго типа выделяются на радарограммах как аномальные зоны — зоны потери корреляции или резкого ослабления амплитуд отраженных волн (рис. 11.15–1.18). Иногда наблюдается прогибание осей синфазности внутрь этой зоны (рис. 11.18), однако чаще оси синфазности на границах зоны довольно резко обрываются (рис. 11.16, 11.17). На рис. 11.17 и 11.18 отчетливо видно, что в некоторых случаях просадки в приповерхностных частях разреза над этими зонами могут отсутствовать.

Причиной такого локального исчезновения отражающих границ являются, по-видимому, процессы суффозии, вследствие которых происходит нивелирование электрофизических свойств разреза. Подтверждением

РИС. 11.16. Фрагмент георадиолокационного профиля через зоны просадок:

1 — зоны просадок; 2 — зона потери корреляции осей синфазности отраженных волн; 3 — оси синфазности дифрагированной волны

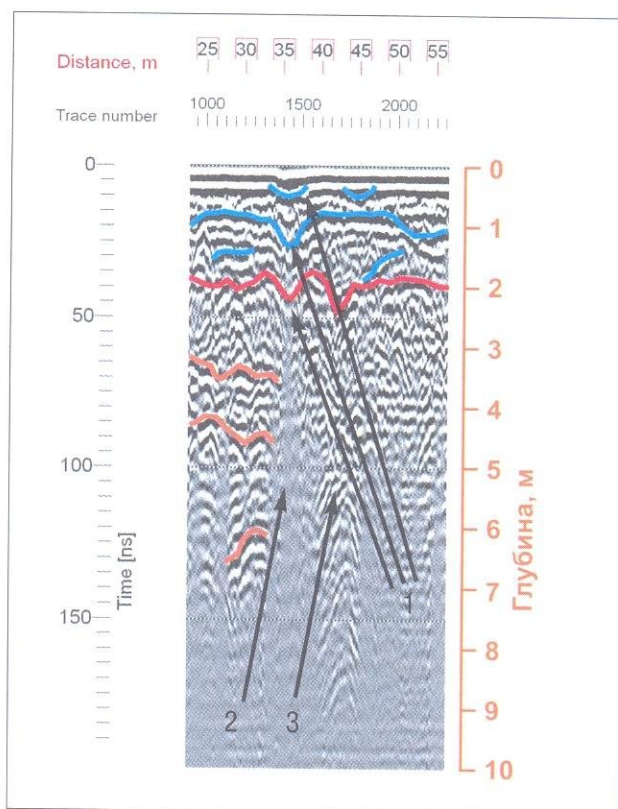


РИС. 11.17. Фрагмент георадиолокационного профиля через зону деформации второго типа (зона потери корреляции осей синфазности, показана стрелкой)

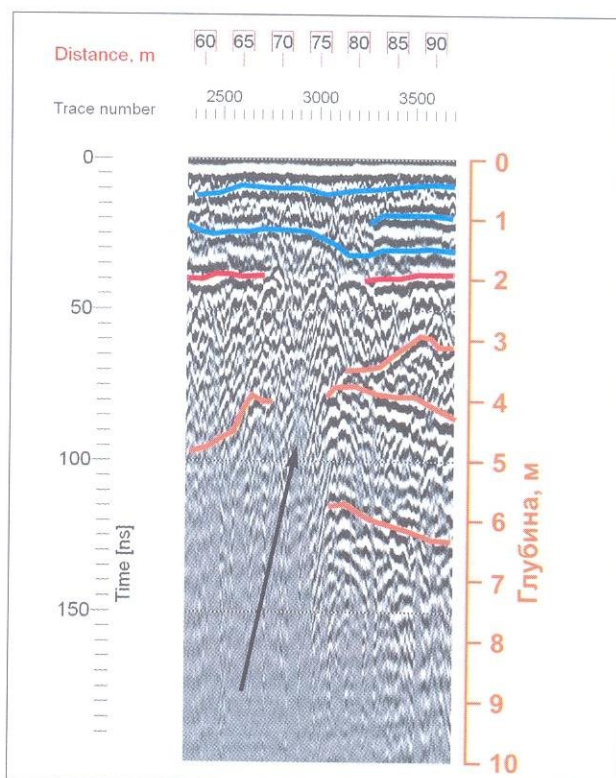
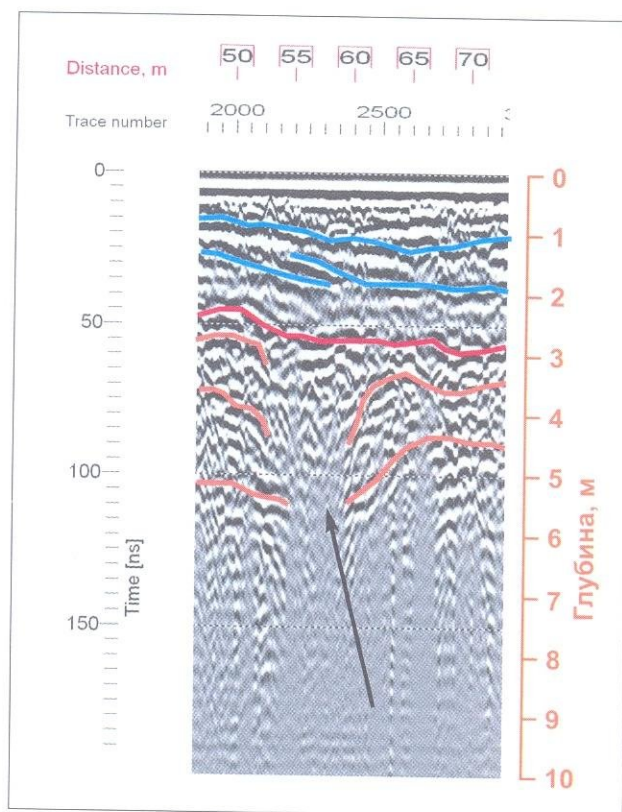


РИС. 11.18. Фрагмент георадиолокационного профиля через аномальную зону — зону деформации второго типа (показана стрелкой).

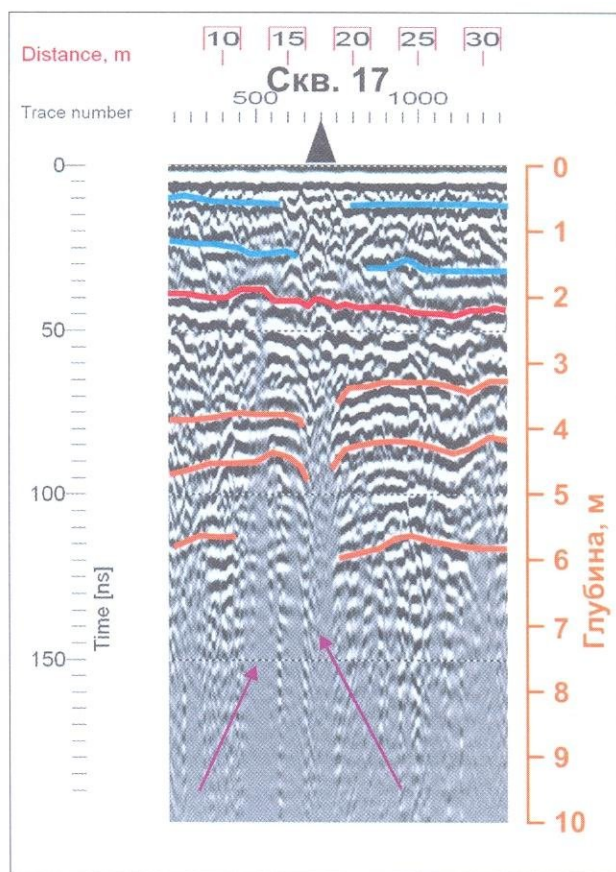
Виден наклон осей синфазности внутри этой зоны



данного предположения может служить фрагмент профиля, изображенного на рис. 11.19, который был пройден через скважину, пробуренную много лет назад. При бурении отмечалось образование провальных воронок небольшого диаметра, т.е. скважина, по-видимому, попала в зону разуплотнения, обусловленную суффозионными процессами, и спровоцировала проседание. Таким образом, выделенные по данным георадиолокационного профилирования участки предполагаемого проявления суффозионных процессов можно разделить на две группы. Если зона разуплотнения, обусловленная процессами суффозии, достигает поверхности насыпи, то на этом участке происходит просадка, как это видно, например, на рис. 11.16 (первая группа). Ко второй группе можно отнести участки, на которых зоны разуплотнения еще не достигли приповерхностных слоев и в их структуре никак не выражены (рис. 11.17 и 11.18). Можно предположить, что в дальнейшем они могут трансформироваться в участки первой группы. Верхняя кромка зон потери корреляции осей синфазности отраженных волн находится в среднем на глубинах около 4 метров, т.е. эти зоны приурочены к песчаным четвертичным отложениям, а не к техногенным грунтам насыпи. Не ясна природа возникновения гиперболических осей синфазности внутри этих зон, отмечаемая на некоторых участках (рис. 11.16), причем глубина расположения дифрагирующих объектов около 5 метров и находятся они непосредственно под зонами просадок. Никаких данных о наличии искусственных объектов на такой глубине (в коренных четвертичных отложениях!) нет. Не исключено,

РИС. 11.19. Фрагмент георадиолокационного профиля, пройденного через скважину, пробуренную много лет назад.

Стрелками показаны зоны потери корреляции. В точке бурения видна зона нарушений, которая протягивается до поверхности насыпи. Видно, что оси синфазности отраженных волн прогибаются внутрь зоны потери корреляции, что, по-видимому, можно объяснить суффозией в этих зонах



что возникновение дифракции как-то связано с верхней частью зоны разуплотнения.

В плане выделенные участки развития деформаций двух типов — достигших поверхности насыпи и развитых только в четвертичных отложениях — группируются в несколько вытянутых поперек насыпи зон и в целом совпадают с участком образования провалов, выявленных здесь ранее. Основываясь на данных георадиолокации и сейсморазведки, на этом участке насыпи был проведен комплекс инженерно-геологических исследований, включая бурение. Было установлено, что зоны максимальной концентрации участков с деформациями различных типов в плане приурочены к двум палеодолинам, где мощность четвертичных песчаных отложений значительно увеличивается. Также было установлено, что песчаные отложения, выполняющие эти долины, сильно разуплотнены (рис. 11.20). Признаков карстообразования в меловых породах не обнаружено, следовательно просадки на изученном участке железнодорожной насыпи связаны с процессами суффозии. На георадиолокационных профилях предполагаемые зоны просадок, как было показано, имеют специфическую волновую картину.

В рассмотренном выше примере были проанализированы возможности георадиолокации при оценке и прогнозировании карстово-суффозионных процессов на участке насыпи с довольно нетипичным стро-

РИС. 11.20. Сопоставление георадиолокационных и инженерно-геологических данных.

А — фрагменты георадиолокационных профилей через зоны деформаций;
Б — схема расположения участков с выделенными зонами деформаций (оконтурены зелеными линиями). Синим цветом выделены участки нарушений, выраженные в структуре техногенных отложений насыпи, красным показаны участки деформаций в четвертичном комплексе, т.е. не выраженные на поверхности; В — сводный инженерно-геологический разрез вдоль насыпи

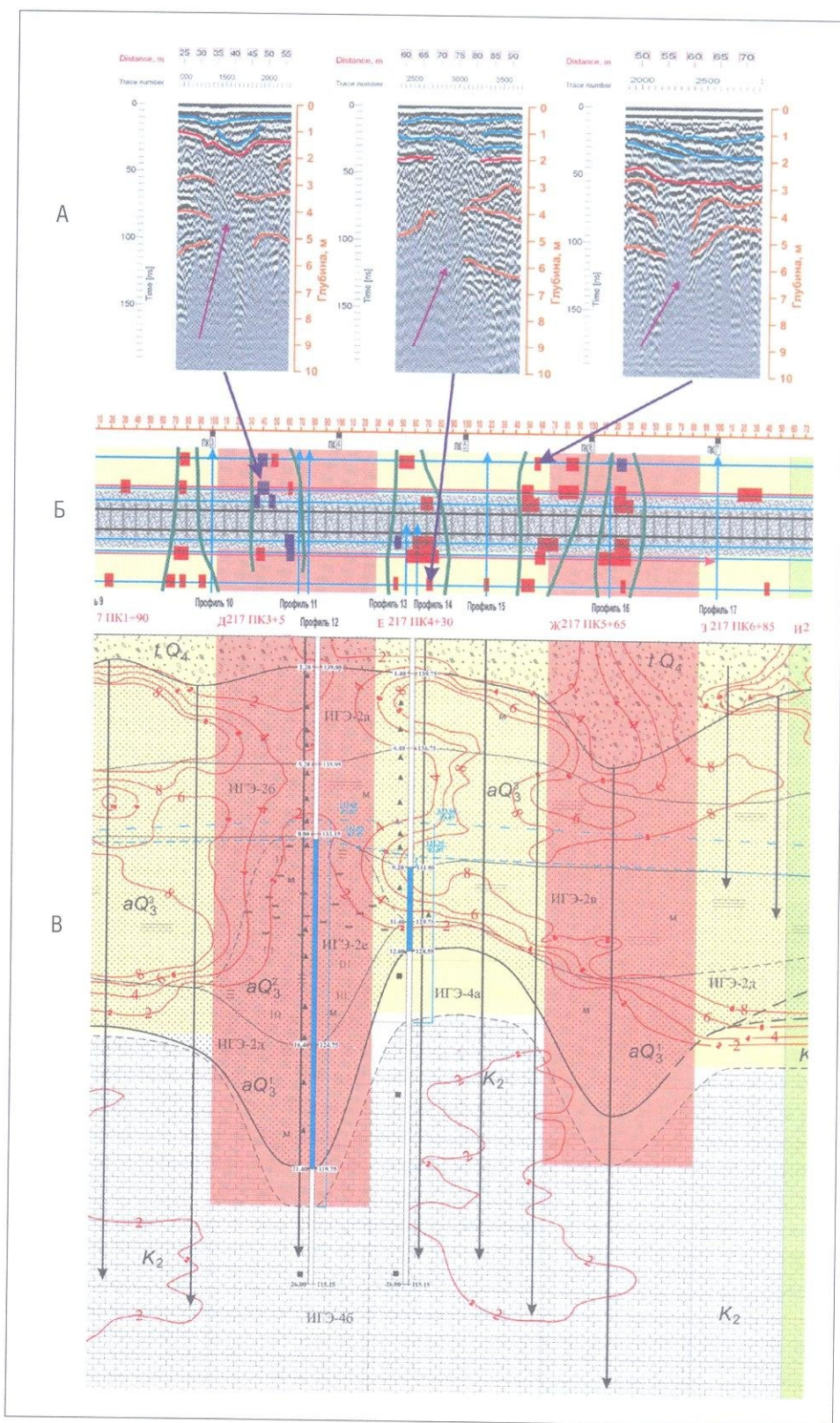
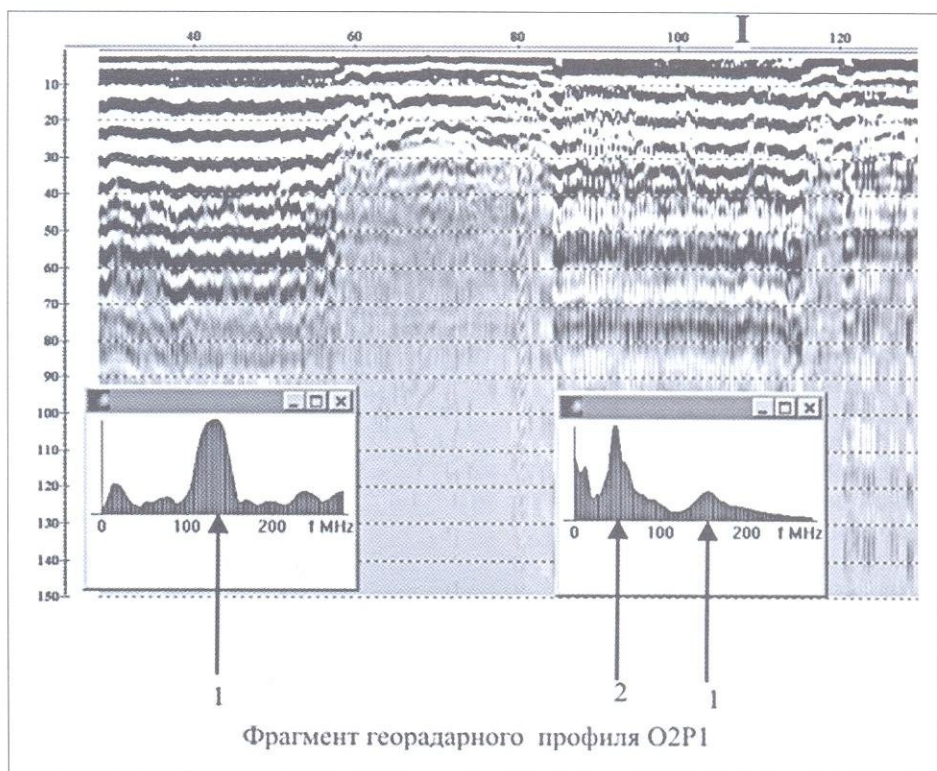


РИС. 11.21. Фрагмент георадиолокационного профиля через зону деформаций и модули спектров его частей вне зоны повышенного увлажнения (слева) и внутри такой зоны (справа).

Стрелками показаны центральные частоты сигналов: 1 — зондирующего сигнала георадара в грунте; 2 — низкочастотной компоненты сигнала, связанной с повышенным увлажнением. Использовалась экранированная антенна 300 МГц



ением разреза — отсутствует слой глин или суглинков. Однако в большинстве случаев деформации приурочены к верхней части слоя суглинков (или глин) и, как показывает опыт георадиолокационных наблюдений, проведенных за последние годы не только на железнодорожных насыпях, но и при обследовании зданий и автомобильных дорог, эти нарушения обусловлены локальным переувлажнением отложений. Поэтому важнейшей задачей исследований является поиск зон локального увлажнения, которые выявляются по появлению низкочастотной составляющей в сигнале (см. Главу 7). На рис. 11.21 представлен фрагмент профиля через участок, на котором в течение длительного времени происходило вспучивание и проседание поверхности насыпи. Основные особенности его строения были рассмотрены выше (см. рис. 11.9–11.12), здесь же отметим, что участку деформаций на радарограмме соответствует зона пониженной частоты (правая часть профиля), т.е. зона локального увлажнения.

Для прогноза развития деформаций поверхности насыпи и наблюдением за реакцией отложений насыпи после проведения ремонтно-восстановительных работ необходимо проводить повторные наблюдения. На рис. 11.22 показан георадиолокационный профиль, на котором никаких признаков нарушения в слое гравия не обнаружено, но имеются куполообразные поднятия в кровле суглинков. Если повторные наблюдения покажут изменения структуры отложений, например, рост поднятий и изменение формы кровли слоя песка над ними, то можно утверждать о начале деформаций на этом участке.

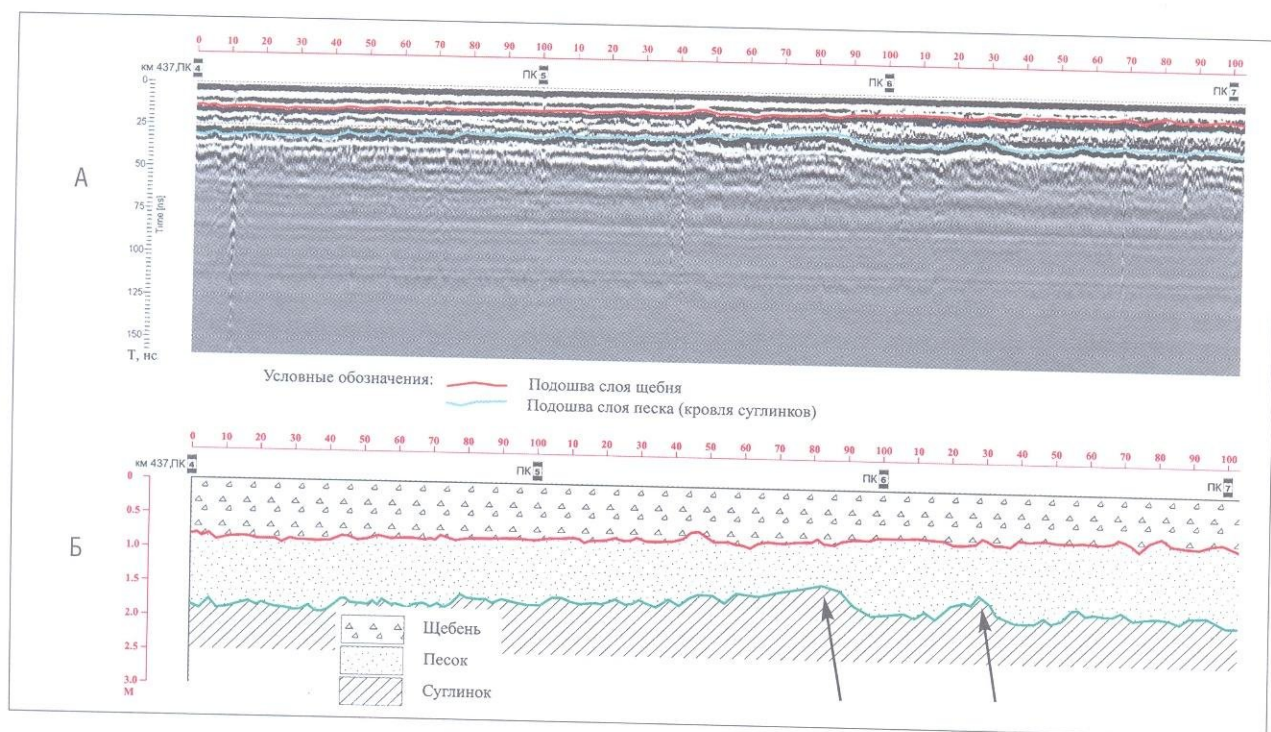


РИС. 11.22. Фрагмент георадиолокационного профиля (А) и его интерпретация (Б).

На геологическом разрезе кровля суглинков имеет довольно ровный рельеф, за исключением участков, показанных стрелками. Подошва балластной призмы (подошва слоя гравия) практически субгоризонтальна. Поднятия в кровле суглинков высотой до 0,5 м могли образоваться либо в процессе строительства, либо их генезис связан с началом деформаций насыпи. Очевидно, что решение данного вопроса может быть найдено при проведении повторных наблюдений. Если рост этих поднятий будет установлен, то, вероятно, имеет место начало деформаций грунтов основания насыпи

Георадиолокационные наблюдения имеют также большое значение при заверке ремонтно-восстановительных работ. На одном из участков высокой ж/д насыпи (до 18 м, дорога одноколейная) были проведены исследования в мае, в самом начале ремонтно-восстановительных работ, и в октябре, когда они уже были практически завершены. На рис. 11.23 представлены фрагменты профилей, пройденные по левой обочине насыпи в мае и октябре.

Их сопоставление показывает, что в течение нескольких месяцев, несмотря на проводимые мероприятия (укрепление склонов насыпи и продельывание прорезей) происходило деформирование конструктивных слоев насыпи. Аналогичная картина наблюдается и на профилях, пройденных по правой обочине. На рис. 11.24 приведены схемы расположения зон деформаций и повышенного увлажнения по материалам георадиолокационной съемки, выполненной в мае (А) и октябре (Б). Следует подчеркнуть, что за время проведения ремонтно-восстановительных работ в целом произошло уменьшение в плане участков с повышенным увлажнением и, наоборот, увеличение зон, затронутых деформациями. С другой стороны, необходимо отметить, что на некоторых участках произошло как бы «замещение» зон увлажнения на зоны деформаций, т.е. наблюдается их пространственная корреляция. Таким образом, можно утверждать, что одной из основных причин нарушений структуры разреза железнодорожных насыпей на некоторых участках является его повышенная увлажненность.

Учитывая большую протяженность железнодорожных насыпей, одной из важнейших задач георадиолокационной съемки является сокращение времени проведения наблюдений при одновременном увеличении

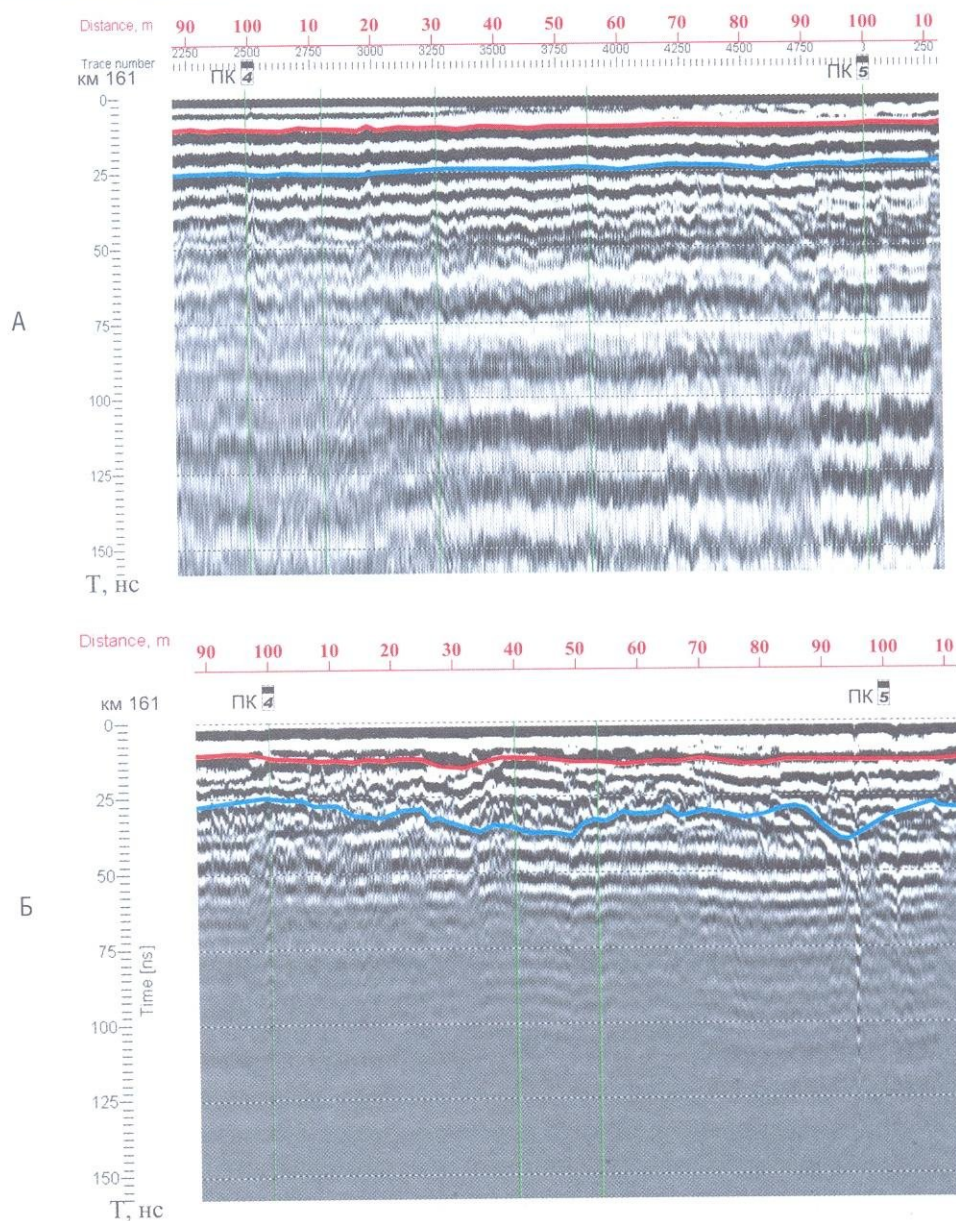


РИС. 11.23. Фрагменты георадиолокационных профилей, пройденные в мае (А) и в октябре (Б) по одному и тому же участку насыпи (исходные данные).

На майском профиле (А) видна характерная низкочастотная запись, которая свидетельствует о повышенном увлажнении грунтов насыпи. Вместе с тем, структура разреза свидетельствует о том, что никаких признаков деформаций слоев насыпи нет — мощности выдержаны и границы практически горизонтальны. На профиле, полученном в октябре после проведения ремонтно-восстановительных работ, наблюдается значительное усложнение структуры разреза, что свидетельствует о развитии деформаций на этом участке насыпи, начиная с мая месяца. Отметим, что низкочастотная запись, которая присутствовала на майском профиле, на октябрьском отсутствует, т.е. признаков локального увлажнения не обнаружено. Очевидно, что эти данные свидетельствуют о большой инерционности процессов, происходящих в насыпи

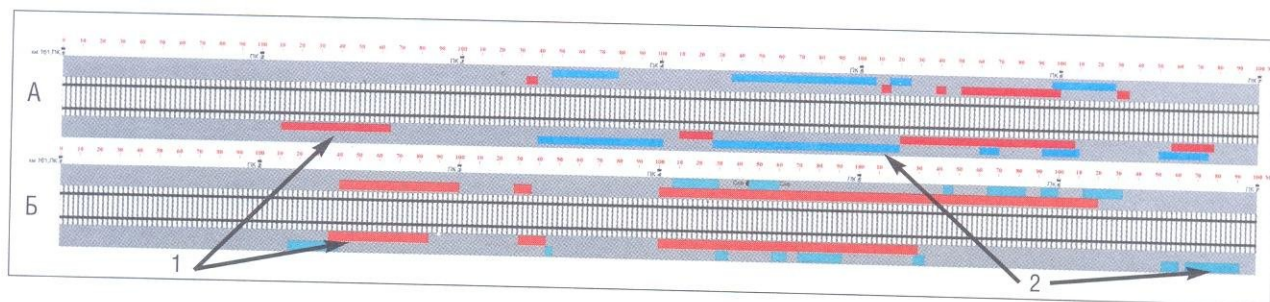


РИС. 11.24. Сопоставление схем расположения участков деформаций и повышенного увлажнения верха насыпи по данным георадиолокационных наблюдений, проведенных в мае (А) и октябре (Б).

1 — примеры зон деформаций (показаны красным цветом); 2 — примеры участков повышенного увлажнения (показаны синим цветом)

объемов работ и без потери их качества по сравнению с пешеходной съемкой. Это достигается увеличением частоты сканирования (до нескольких сотен сканирований в секунду, чтобы сохранить высокую детальность исследований в плане при исследовании на больших скоростях), и созданием мобильных многоканальных систем наблюдения, что позволяет за один период измерений получать профили по краям рельсовой решетки (по обочинам и междутью) и по оси пути. Опубликованные в настоящее время материалы показывают, что эти системы весьма эффективны при обследовании протяженных участков насыпи с целью выявления основных особенностей ее строения и проблемных зон. На рис. 11.25 даны несколько фрагментов георадиолокационных профилей с примерами участков загрязнения (А) и повышенной влажности (Б и В). Однако для выяснения некоторых особенностей строения, имеющих большое значение при определении генезиса деформаций и выработки комплекса мер по их устранению, необходимы исследования в режиме пешеходной съемки, которые в настоящее время невозможно проводить с движущегося средства — специального вагона-лаборатории или самоходной тележки. Прежде всего это профилирование поперек насыпи, работы с низкочастотными антеннами для достижения максимальной глубинности при работах на высоких насыпях, исследования другими методами и т.д. Работы на больших скоростях возможны, только если перемещаемые антенны оторваны от поверхности земли (например, ручные антенны).

С методической точки зрения не совсем ясны возможности изучения при большой скорости перемещения антенн аномальных участков протяженностью в несколько метров, которые, исходя из опыта работ, встречаются довольно часто. Анализ их строения имеет большое значение, так как эти аномальные участки могут указывать на начальные стадии развития деформаций. Представляется, что георадиолокационные исследования необходимо проводить в два этапа. На первом этапе наблюдения выполняются на большой скорости для определения наиболее проблемных участков, на втором — детально изучается их строение с помощью пешеходной съемки.

Приведенные примеры георадиолокационных профилей, полученные при исследовании различных типов нарушений конструктивных слоев железнодорожной насыпи, и опыт повторных наблюдений на одном из участков показывают, что метод георадиолокации позволяет эффективно и в сжатые сроки проводить исследования насыпей и осуществлять их мониторинг.

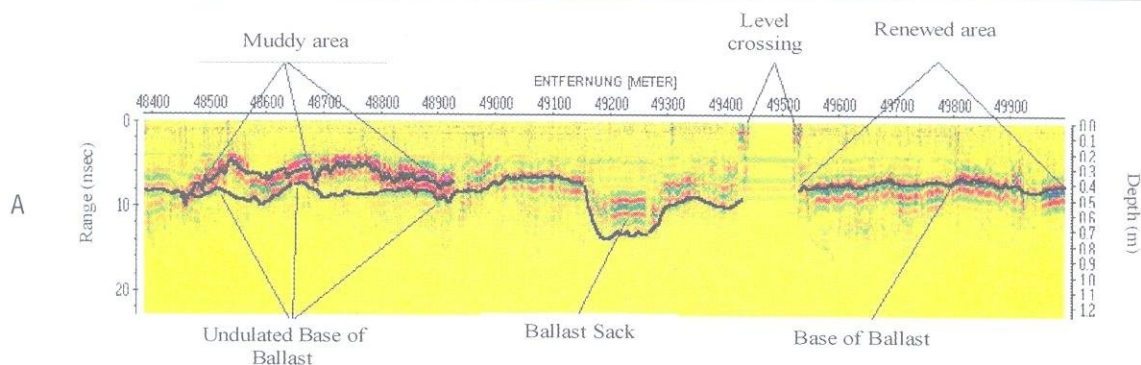


Figure 7: Example of a ballast sack and a muddy area

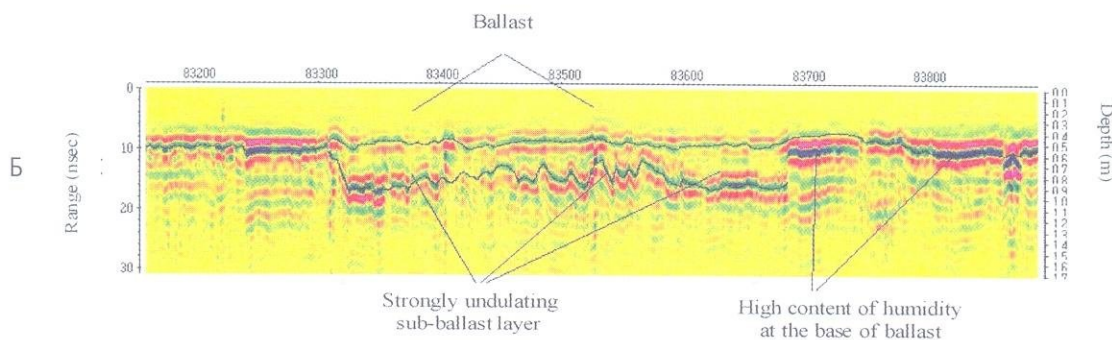


Figure 8: Example of a wrongly-built sub-ballast layer

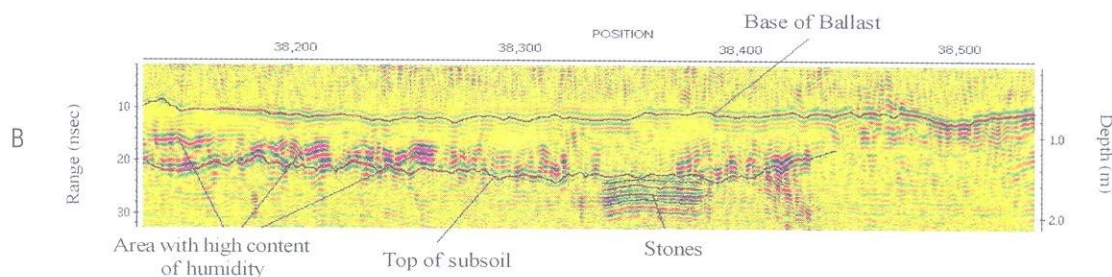


РИС. 11.25. Фрагменты георадиолокационных профилей, выполненных на ж/д насыпях. Частота сканирования — 400 сканов в секунду, возможно проведение исследований на скоростях до 80 км/час.

Кроме мощности основных слоев насыпи и рельефа границ между ними — слоя гравия (Ballast), защитного слоя (sub-ballast layer) и собственно насыпи (subsoil layer) — на представленных радарограммах можно выделить участки с резко увеличенной амплитудой отраженных электромагнитных волн. В левой части верхнего профиля (А) в слое балласта выделяется высокоамплитудное отражение, которое предположительно обусловлено загрязнением гравия (т.е. его глинизацией). Необходимо подчеркнуть, что под этим сильным рефлексом оси синфазности отраженной от подошвы балласта волны практически не видны. На среднем (Б, правая часть) и нижнем (В, левая часть) профилях оси синфазности большой амплитуды увязываются с повышенным увлажнением. Основное отличие этих сильных рефлексоров от высокоамплитудного отражения от кровли загрязненного гравия на профиле А состоит в том, что под ними видны оси синфазности более глубоко залегающих границ. Резкое ослабление отражений под сильным рефлексом на профиле А, по-видимому, можно объяснить большим поглощением электромагнитных волн в загрязненном слое [48]

ГЛАВА 12. Исследования полотна автомобильных дорог и взлетно- посадочных полос (ВПП) аэродромов

Георадиолокационные исследования широко используются при изучении покрытий и подстилающих их слоев автомобильных дорог и взлетно-посадочных полос аэродромов. Эти два типа объектов имеют много общих особенностей строения и довольно близкие типы нарушений, поэтому они рассматриваются в одном разделе. Применение антенн различного частотного диапазона позволяет изучать самую верхнюю часть разреза (железобетонные плиты, асфальт, подстилающие слои и т.д.) с разрешением в первые сантиметры и строение основания полотна дорог и ВПП на глубину в несколько метров. Основными задачами этих наблюдений являются:

- 1. Определение толщин бетонного покрытия, железобетонных (ж/б) плит, асфальта и подстилающих слоев их основания, т.е. построение верхней части разреза коренных пород и конструктивных слоев дорог и взлетно-посадочных полос;*
- 2. Определение внутреннего строения слоя бетона, ж/б плит (наличие арматуры, шаг арматуры и т.д.), выделение зон трещиноватости и плохой сохранности;*
- 3. Определение пустот и провалов под покрытиями;*
- 4. Обнаружение зон разуплотнения под полотном дороги и взлетно-посадочной полосой.*
- 5. Выделение зон повышенного увлажнения.*

Кроме перечисленных задач, при обследовании этих объектов в областях развития многолетнемерзлых пород, возникают специфические задачи по изучению деформаций, обусловленных криогенными процессами. Однако, не имея большого собственного опыта работ в таких районах, в данной главе эти проблемы не рассматриваются. Одним из немногочисленных примеров криогенных дислокаций могут служить материалы, полученные при изучении бугров пучения (см. Главу 9).

Все многообразие задач по исследованию полотна дорог и ВПП можно объединить в две основные группы. К первой относятся задачи по проверке толщин конструктивных слоев покрытий и их соответствие техническому заданию. Эти исследования могут проводиться или непосредственно в процессе строительства, или сразу же после его окончания. Для этого используются в основном высокочастотные антенны (более 1 ГГц). Вторая группа включает в себя задачи по выяснению причин разнообразных деформаций полотна автомобильных дорог и ВПП аэродромов. В этом случае применяются как низкочастотные, так и высокочастотные антенны. Как было показано в Главе 11, причина деформаций может быть обусловлена процессами, протекающими на больших глубинах (например, карстово-суффозионные процессы). Пример практически постоянной деформации полотна автомобильной дороги, связанный с близким к поверхности положением уровня грунтовых вод, был рассмотрен в Главе 7 (см. рис. 7.5).

12.1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛОТНА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

РИС. 12.1. Опытно-методические работы по определению мощности покрытия на испытательном стенде «Союздорнии».

Подшова асфальтобетона мощностью 11 см показана стрелкой. Работы проводились с экранированной антенной 1 ГГц, георадар «Зонд 12». Для перевода из временного в глубинный масштаб использовалась средняя скорость распространения электромагнитных волн 12 см/нс (покрытие сухое)

При обследовании дорожных покрытий одной из важных задач является определение толщин различных типов покрытий (асфальтных, бетонных, асфальто-бетонных и т.д.) как на уже находящихся в эксплуатации дорогах, так и заверка толщин слоев на строящихся. В главе 11 (рис. 11.1а) приведен пример устройства насыпи автомобильной дороги. При исследовании используются высокочастотные антенны — около 1 ГГц и выше, которые позволяют выделять верхние слои насыпей автомобильных дорог с вертикальным разрешением в первые сантиметры. На рис. 12.1 приведен фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного на стенде «Союздорнии», где представлены различные типы строения покрытий дорог. Опытно-методические работы проводились с экранированной антенной 1 ГГц. На радарограмме на времени менее 2 наносекунд отчетливо выделяется ось синфазности отраженной волны, которая разделяет части разреза с различным типом волновой картины (показаны стрелкой). При скорости в 12 см/нс (сухое покрытие) толщина верхнего слоя составляет 11 см и он сопоставляется со слоем асфальтобетона.

Другой распространенной задачей является выделение зон просадок и выяснение причин их образования. Амплитуда просадок может составлять несколько десятков сантиметров, а в плане эти участки могут протягиваться на несколько десятков метров. На рис. 12.2 дан пример подобной зоны просадки.

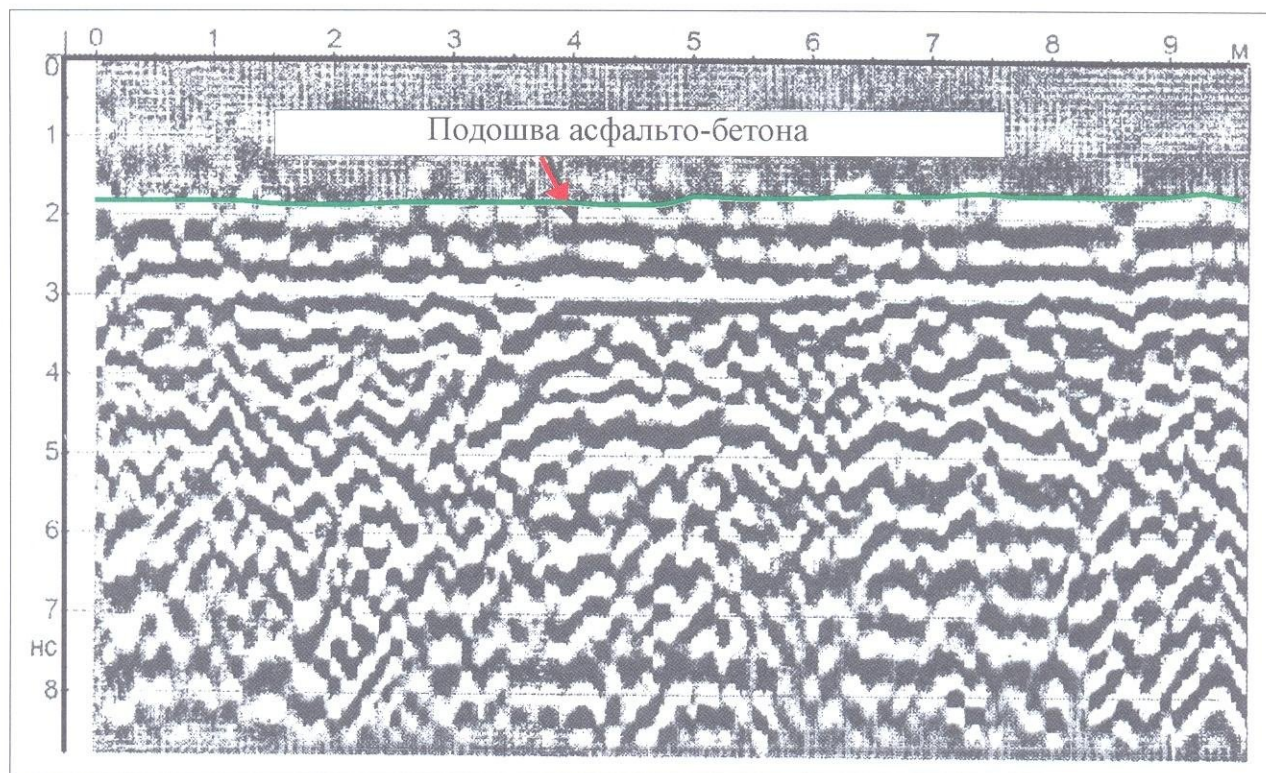
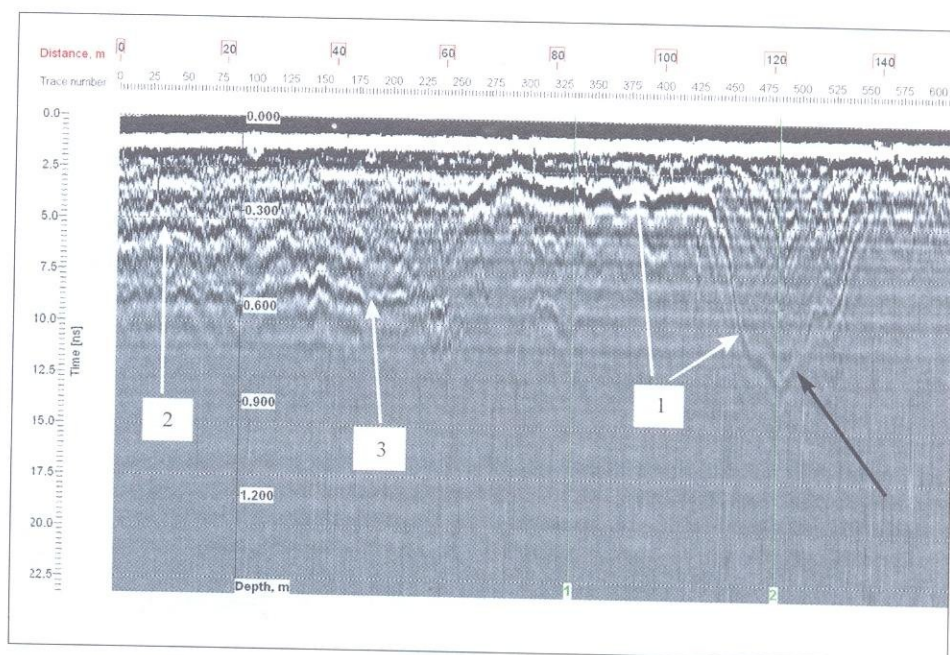


РИС. 12.2. Фрагмент радарограммы по автомобильной дороге. Цель исследований — выяснение причин и мест просадки дорожного покрытия.

1 — подошва бетона;
2 — подошва слоя щебня;
3 — подошва слоя песка (кровля суглинков).
Ширина зоны просадки (показана черной стрелкой) около 30 метров, глубина — 60–70 см. На пикетах 60 — 110 метров амплитуда отраженной от подошвы бетона волны резко увеличилась, что, по-видимому, обусловлено повышенным увлажнением отложений под слоем бетона на этом участке. Ниже кровли суглинков никаких осей синфазности не прослеживается, что связано с сильным поглощением электромагнитных волн в глинах и суглинках. Использовался георадар «Око», антенна 1700 МГц. Данные предоставлены А.М. Кулижниковым



Одной из самых распространенных задач является также определение мощности и состава конструктивных слоев автодорожного полотна. Эти данные необходимы как для составления паспорта дороги, так и для мониторинга. Эти исследования проводятся, как правило, с заверкой бурением (рис. 12.3, 12.4).

В последние годы для увеличения скорости обследования автомобильных дорог все чаще применяют рупорные антенны, которые устанавливаются на автомобили. Пример георадиолокационного профиля, полученного с помощью рупорной антенны, представлен на рис. 12.5.

Весьма специфические задачи возникают при обследовании временных зимних дорог, которые прокладываются в условиях бездорожья по льду — так называемые зимники и переправы. Целью исследований в этом случае является определение мощности льда для оценки его несущей способности. Наиболее актуальной эта проблема является для районов Сибири и Дальнего Востока. Пример решения подобной задачи дан на рис. 12.6.

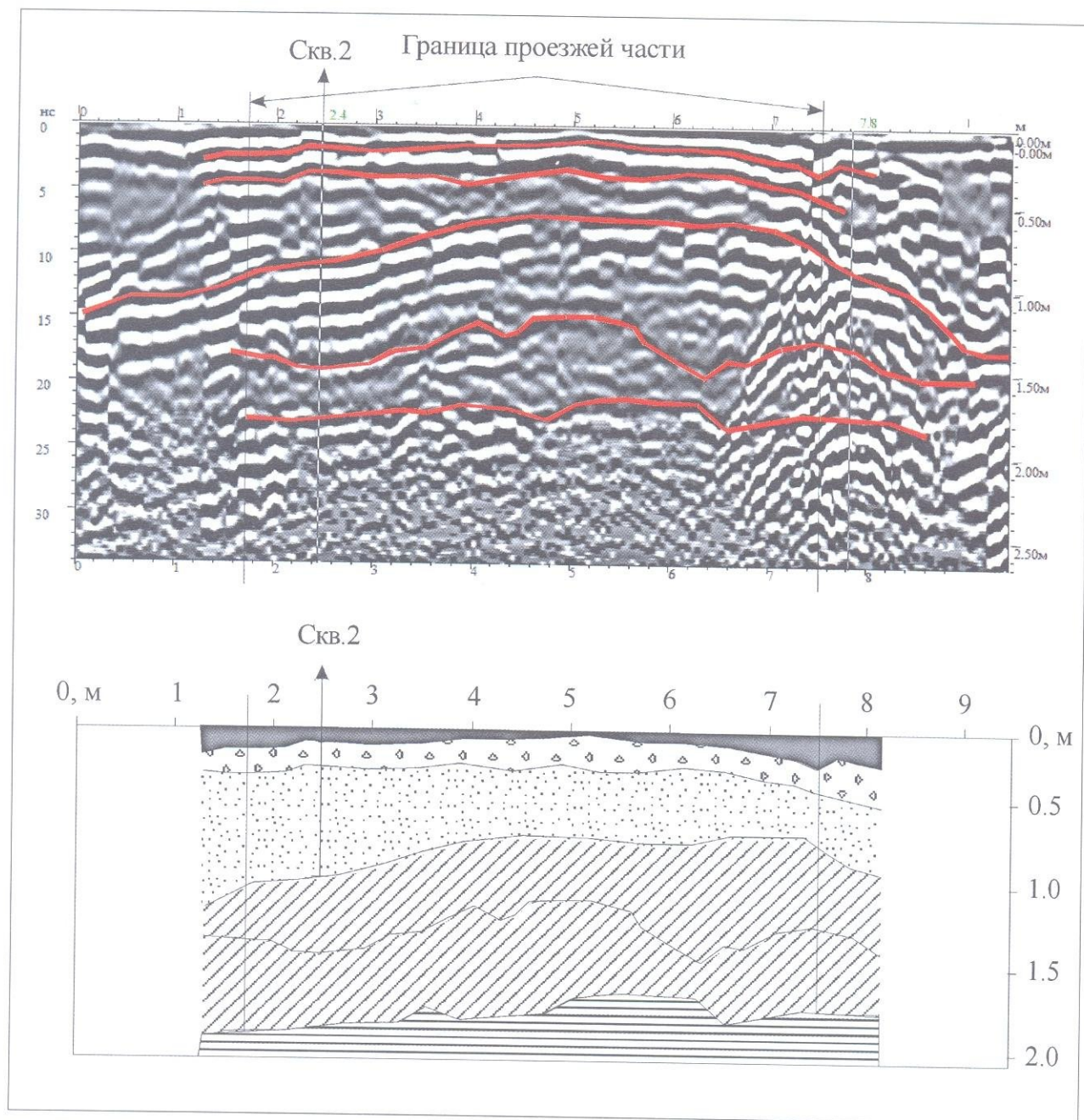


РИС. 12.3. Поперечный георадиолокационный профиль через дорогу и построенный по нему геологический разрез. Довольно уверенно выделяются пять георадарных комплексов, которым соответствуют (сверху вниз):

1 — асфальт; 2 — слой щебня; 3 — слой песка; 4 — слой суглинка или супеси, который предположительно можно разделить на две толщи; 5 — слой глины или плотного суглинка. В центральной части георадиолокационного профиля на отдельных участках границ между слоями песка и суглинка, суглинка и глины оси синфазности отраженных волн практически исчезают (интервал 4,5–6,0 м), что, по-видимому, может быть связано с суффозией (зона разуплотнения?). Использовался георадар «Око» с антенной АБ-700 МГц. Материалы предоставлены НПЦ «Геотех»

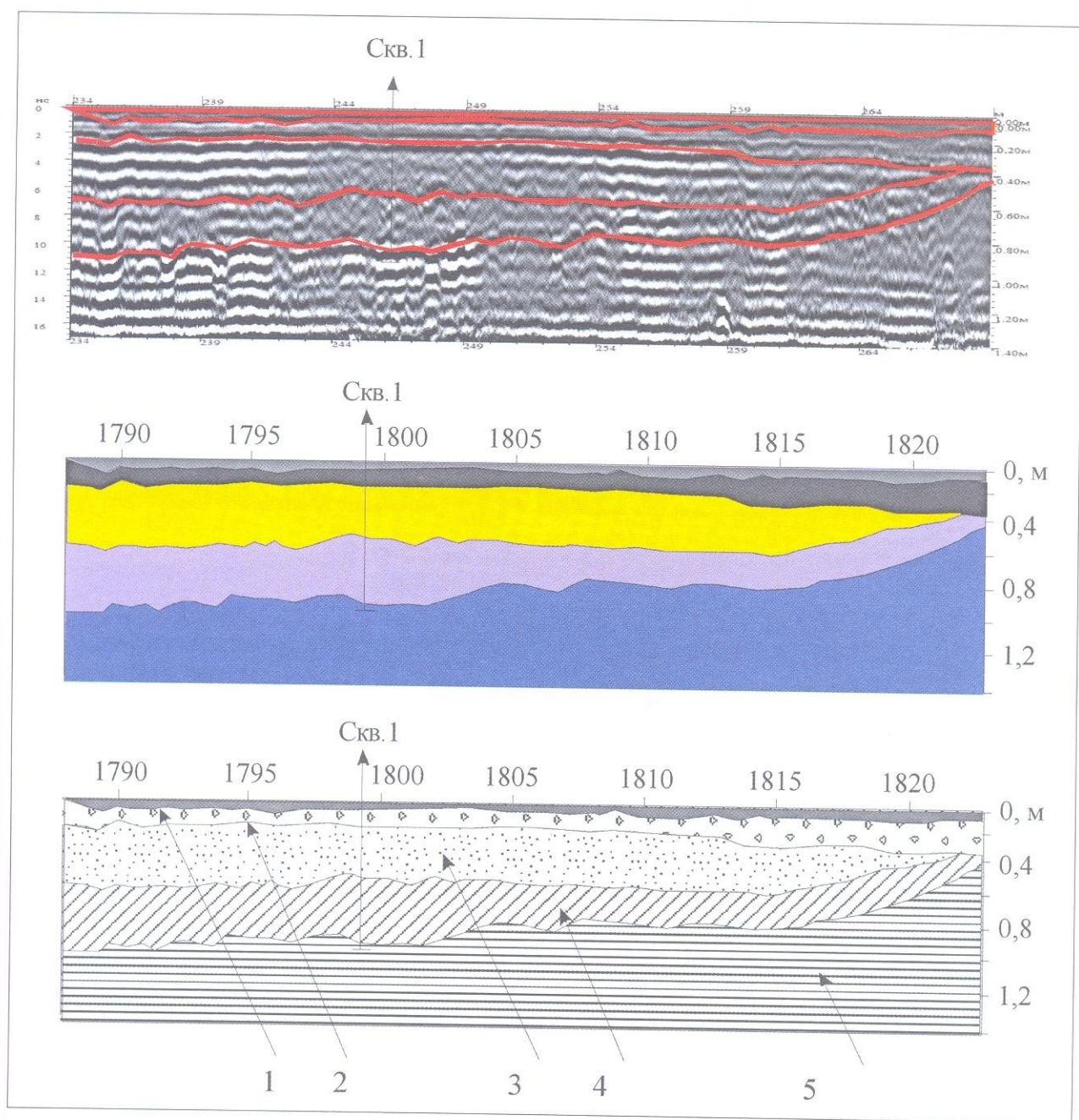


РИС. 12.4. Продольный профиль по автомобильной дороге с интерпретацией. Цель исследований — определение строения дорожного покрытия и выяснение причин его деформаций.

1 — асфальт; 2 — слой щебня; 3 — слой песка; 4 — слой суглинка; 5 — слой глины. В левой части профиля (верхний рисунок) наблюдается увеличение амплитуды отражений, которое, по-видимому, обусловлено повышенным увлажнением. Особенно отчетливо это видно на границе суглинка и глины (см. верхний рисунок). В правой части профиля отмечается выклинивание слоя песка, который является защитным (дренирующим) слоем, и слой щебня залегает непосредственно на суглинках и глине. В районе этого участка происходят максимальные деформации полотна дороги. Использовался георадар «Око» с антенной АБ-1200 МГц. Материалы предоставлены НПЦ «Геотех»

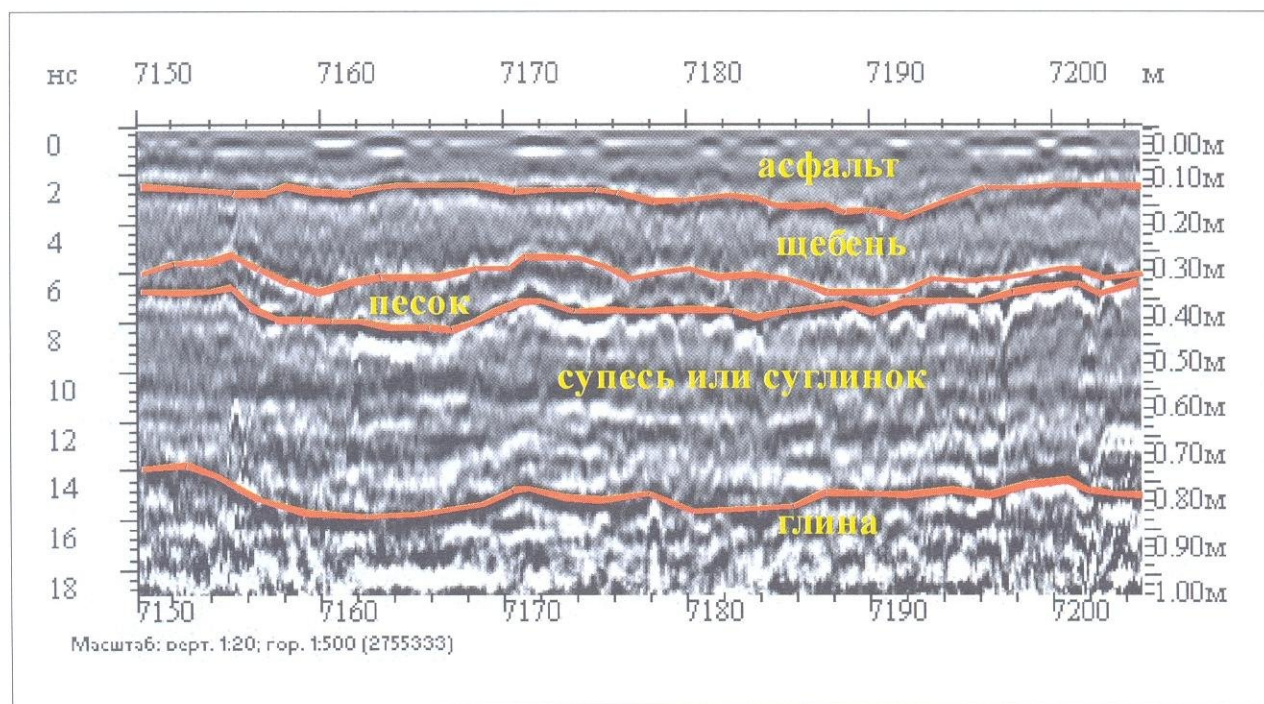
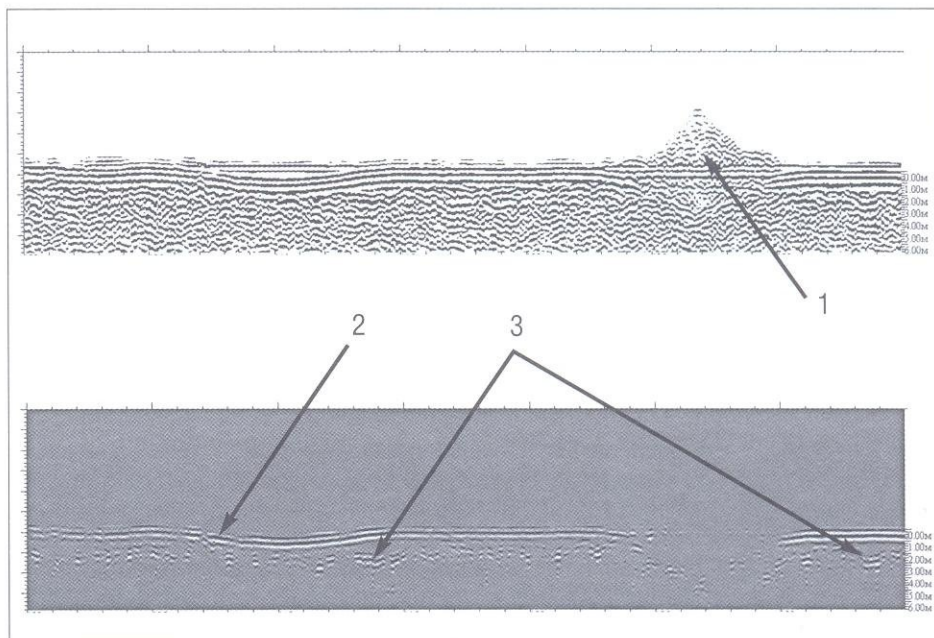


РИС. 12.5. Фрагмент георадиолокационного профиля, полученного с помощью рупорной антенны.

Кроме асфальтного покрытия выделяются четыре слоя. Основанием дороги служит слой глин, который выделяется на волновой картине более низкочастотной записью. Суммарная мощность дорожного покрытия (включая асфальт) составляет около 80 см. Слой песка имеет незначительную мощность, что, предположительно, не соответствует проектной документации. Работы выполнялись с автомашины. Использовался георадар «Око» с рупорной антенной АБ-1000 МГц. Материалы предоставлены НПЦ «Геотех»

РИС. 12.6. Георадиолокационный профиль поперек реки Лены, полученный с вертолета.

Высота полета около 15 метров. Цель исследований — определение толщины льда на переправе. Применены два графа обработки данных. 1 — торосы; 2 — поверхность льда; 3 — нижняя кромка льда. Средняя толщина ледяного покрова около 1 метра. Данные получены А.В. Омеляненко георадаром «Око» с антенной АБ-400. Материалы предоставлены НПЦ «Геотех»

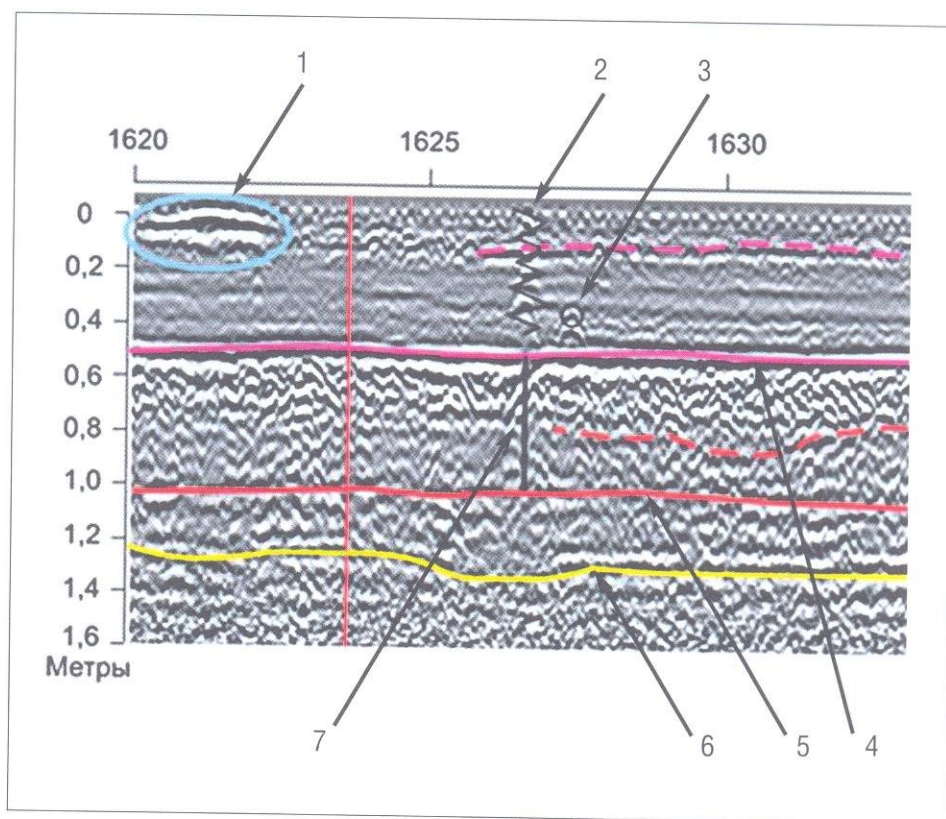


12.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНЫХ ПОЛОС (ВПП) АЭРОДРОМОВ

В соответствии с данными бурения и проектной документацией на изученных участках взлетно-посадочных полос аэродромов разрез представлен несколькими слоями (сверху вниз): толщина асфальтобетона (состоит обычно из нескольких слоев и имеет толщину иногда до 100–110 см); слой песка или цементобетон, преимущественно неармированный, толщиной до 50–60 см; слой песка толщиной 20–30 см. Нижняя граница этого слоя песка является кровлей коренных грунтов. На рис. 12.7 показан типичный пример строения ВПП на одном из изученных участков.

РИС. 12.7. Фрагмент георадиолокационного профиля по ВПП на одном из участков.

1 — трещиноватый участок асфальтобетона (или участок расслоения?), трещины которого, по-видимому, заполнены водой. На радарограмме он выделяется по резкому увеличению амплитуды отражения. Аналогично на радарограммах выделяются участки с увлажненным грунтом; 2 — так называемая отраженная трещина в асфальтобетоне над местом стыка цементобетонных плит (место стыка плит показано черной вертикальной линией (7)). На радарограмме выделяется как узкая зона «звучащей» записи; 3 — дифрагирующий объект (это может быть крупный щебень, пустота и т.д.); 4 — подошва асфальтобетона, который состоит из нескольких слоев. Одна из границ между слоями показана пунктирной линией; 5 — подошва цементобетона; 6 — подошва слоя песка (кровля суглинков); 7 — стык между цементобетонными плитами (наблюдаются оси синфазности дифрагированной волны). Использовался георадар «Око» с антенной АБ-1700 МГц. Материалы предоставлены НПЦ «Геотех»



На рис. 12.8 даны фрагменты георадиолокационных профилей с несколько другим типом разреза и с инженерным сооружением в левой части. Отчетливо выделяются отражающие границы между многослойной толщей асфальтобетона общей мощностью около 0,6–0,7 м и слоем цементобетона (1), между слоями цементобетона и песка (2). Внутри частей разреза, коррелируемых со слоями асфальтобетона и цементобетона наблюдаются также оси синфазности волн, отраженных от различных слоев внутри этих толщ — соответственно 4 и 8. Самая глубокозалегающая граница выделена на нижнем разрезе. Она, вероятно, является отражением от границы песка и суглинка, залегающего в основании взлетно-

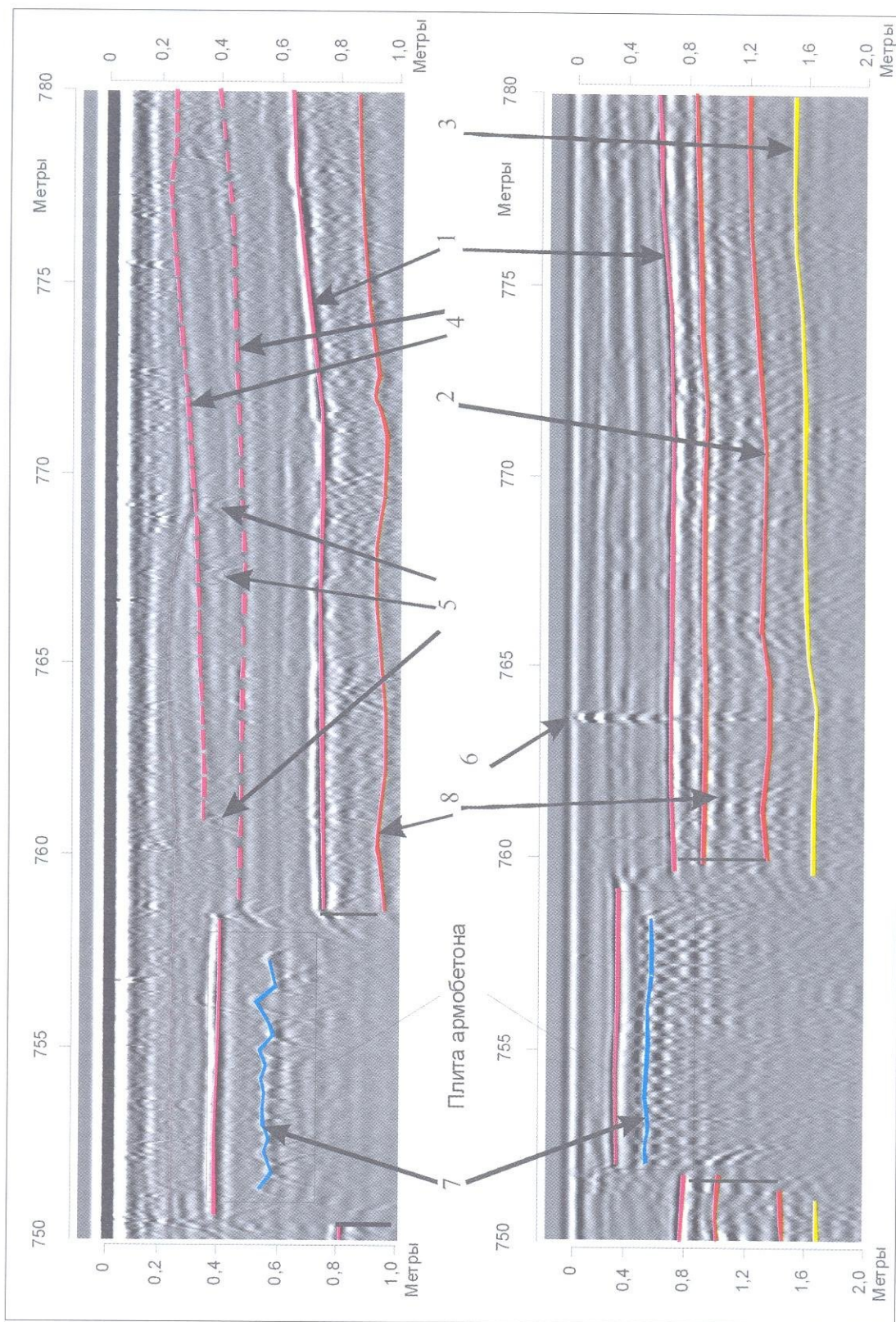


РИС. 12.8. Фрагменты георадиолокационных профилей по ВПП.
Объяснения см. в тексте. Использовался георадар «Око» с антенной АБ-1700 МГц (верхний профиль) и АБ-700 (нижний профиль).
Материалы предоставлены НПЦ «Геотех»

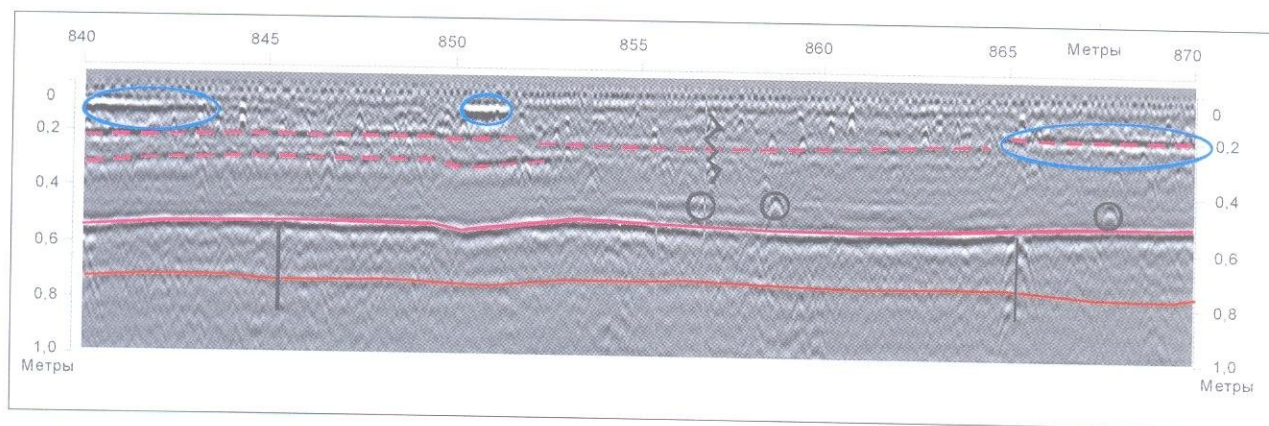


РИС. 12.9. Фрагмент георадиолокационного профиля по ВПП.

Объяснения см. в тексте. Использовался георадар «Око» с антенной АБ-1700 МГц. Материалы предоставлены НПЦ «Геотех»

посадочной полосы (3). Внутри слоя асфальтобетона отмечаются отдельные оси синфазности дифрагированных волн, обусловленные наличием различных включений (небольшие валуны, галька и т.д.). Следует также отметить, что аналогичные признаки характерны и для пустот. На верхнем профиле некоторые из этих объектов отмечены цифрой 5. Близко от поверхности наблюдения на профиле, полученном с антенной АБ-700 МГц, наблюдается «звнящая» запись (6), которая, как показывает опыт работ по поиску коммуникаций, вероятно, связана с наличием здесь кабеля (?). В левых частях разрезов выделены также плиты армобетона, которые, по-видимому, перекрывают какие-то инженерные объекты (кабели, трубопроводы). Сплошной синей линией показан уровень заложения арматуры (7).

Одной из основных задач при исследовании ВПП является выделение разнообразных аномальных зон на георадиолокационных профилях, которые могут указывать на наличие зон разуплотнения, зон повышенного увлажнения и т.д. На рис. 12.9 показан фрагмент разреза, на котором внутри слоя асфальтобетона голубым контуром выделены участки горизонтальных границ, на которых наблюдается значительное возрастание амплитуд отраженных волн (пикеты 840–843 м, 850–851 м и 865–870 м). По протяженности эти участки границ иногда достигают 3–5 метров. Можно предположить, что увеличение амплитуд обусловлено здесь повышенным увлажнением зон расслоения асфальтобетона. Для достоверного заключения о причинах возникновения подобных аномальных участков записи необходимо провести их вскрытие. Следует также отметить многочисленные дифрагирующие объекты в слое асфальтобетона, которые, как уже указывалось выше связаны с крупными включениями (гравия ?) или пустотами. Остальные цветковые условные обозначения аналогичны тем, которые представлены на рис. 12.7 и 12.8.

Расположение профилей по нормали друг к другу позволяет выявлять такие особенности строения армированных покрытий, как шаг армирования по различным направлениям, толщину защитного слоя арматуры и т.д. На рис. 12.10 представлены два фрагмента пересекающихся профилей, проходящих через скважину, полученные на рулевой дорожке. По сравнению с данными, представленными выше, на этом участке в толще цементобетона отчетливо выделяется арматура, причем шаг арми-

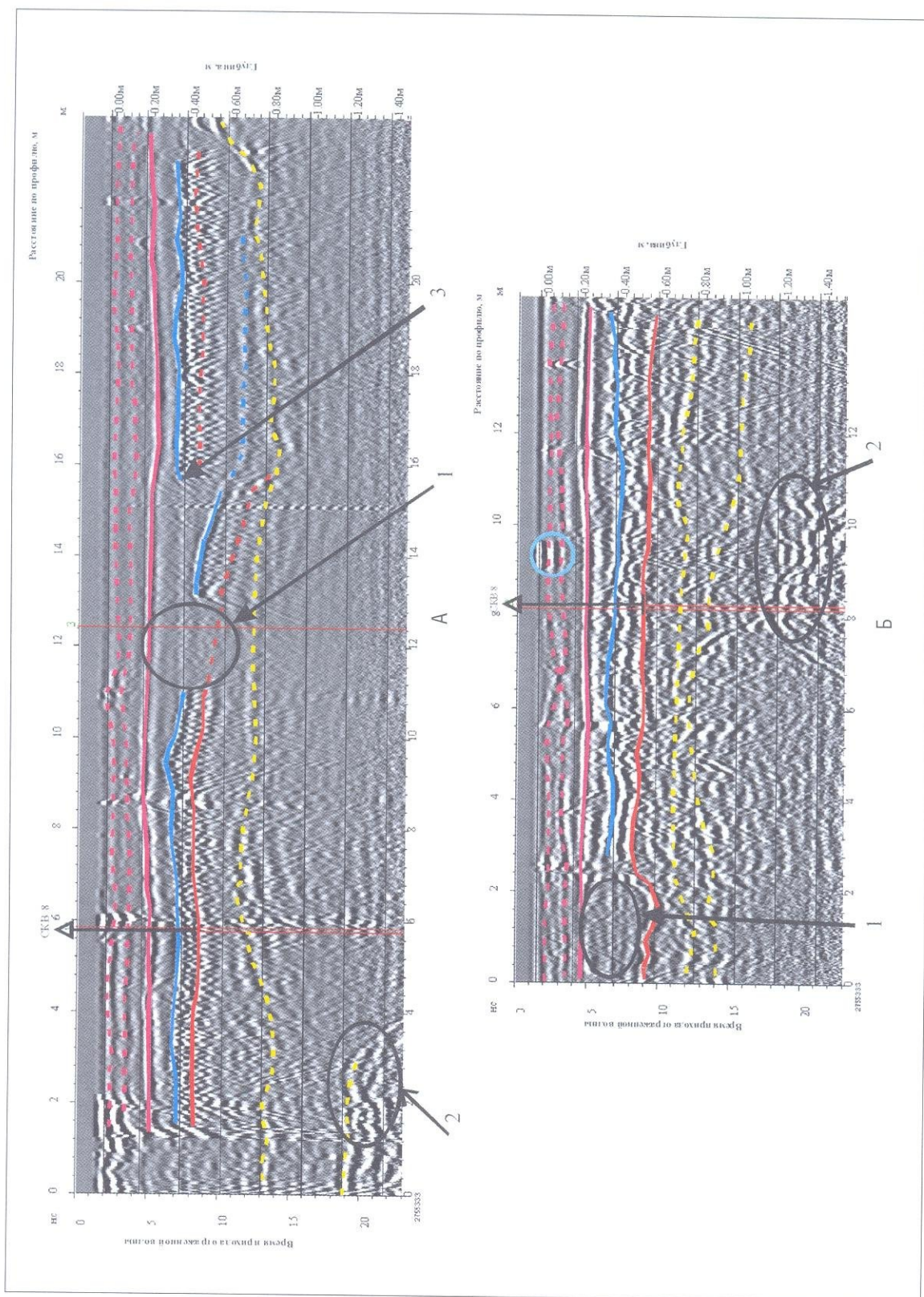


РИС. 12.10. Фрагменты поперечного (А) и продольного (Б) георадиолокационных профилей по рулевой дорожке на участке проседания. 1 — зоны отсутствия арматурной сетки; 2 — глубокозалегающие объекты; 3 — зона опущенного участка арматурной сетки. Остальные условные обозначения как на рис. 12.7 и 12.8. Использовался георадар «Око» с антенной АБ-1700 МГц. Материалы предоставлены НПЦ «Геотех».

рования отличается по различным направлениям. Уровень заложения арматуры показан голубой сплошной линией. На поперечном профиле (рис. 12.10 А) шаг армирования составляет около 13 см, на продольном профиле (рис. 12.10 Б) значительно больше — около 50 см. На глубине 1,1–1,2 м обнаружены также какие-то объекты — кабели или трубопроводы (на рисунке обозначены цифрой 2). Особое внимание необходимо обратить на участки записи на рассматриваемых профилях, показанные цифрами 1 и 3. На участках, обозначенных цифрой 1, отсутствуют признаки арматурной сетки. Это может быть связано как действительно с ее отсутствием, так и с сильно разрушенным слоем цементобетона. На пикете 15, 6 м на поперечном профиле (рис. 12,10 А) выделяется резкое смещение арматурной сетки на глубину около 20 см (показано цифрой 3) — с 40 см до 60 см. Это может быть обусловлено как нарушением технологии работ при строительстве, так и с деформацией покрытия в процессе последующей эксплуатации. Учитывая тот факт, что на изученном участке рулевой дорожки (РД) отмечались просадки, не исключено, что влияли оба фактора.

Другой тип строения покрытия представлен на рис. 12.11. На изученном участке оно представляет собой бетонные плиты (7 x 7 метров) с двумя (?) уровнями армирования. Верхний уровень выделяется уверенно, нижний — предположительно. Верхняя сетка армирования (показана красной пунктирной линией) находится на глубине 8–10 см, шаг армирования — 25 см. Нижний край плит на георадиолокационном профиле выделен красной линией. Мощность бетона достаточно выдержана и незначительно варьирует в пределах 27–28 см. На некоторых участках (0–7 метров), по-видимому, связанных с просадками, плиты перекрыты слоем асфальта, толщина которого составляет около 8 см (левая часть профиля, подошва асфальта показана зеленой линией). Ниже слоя армобетона залегает слой песка толщиной 35–38 см, на профиле его подошва дана сплошной желтой линией. Основанием является слой суглинков.

На представленном фрагменте профиля отчетливо видны стыки плит армированного бетона (показаны на рисунке вертикальными черными линиями). Следует отметить, что на участках бетона, прилегающих к стыкам плит, часто отмечается увеличение амплитуды отраженных волн, которое, очевидно, обусловлено повышенным увлажнением. Особенно отчетливо это отмечается на профиле, полученном с антенным блоком АБ-700 (рис. 12.11 Б). На профиле, выполненном с антенным блоком АБ-1700, на отдельных участках подошвы слоя армированного бетона наблюдается уменьшение амплитуды отраженных волн (выделены на профиле черным контуром), что свидетельствует об уменьшении контрастности данной границы. По-видимому, это связано с разрушением (разуплотнением) армобетона. Более резкие изменения амплитуды отраженных волн отмечаются на границе песка и суглинка, что особенно хорошо видно на профиле, пройденном с антенной АБ-700 (нижний профиль на рис. 12.11). Контурные этих зон выделены черными линиями (пикеты 13–20 м и 35–42 м). На последнем участке граница между слоями песка и суглинка практически исчезла. Эти две зоны так-

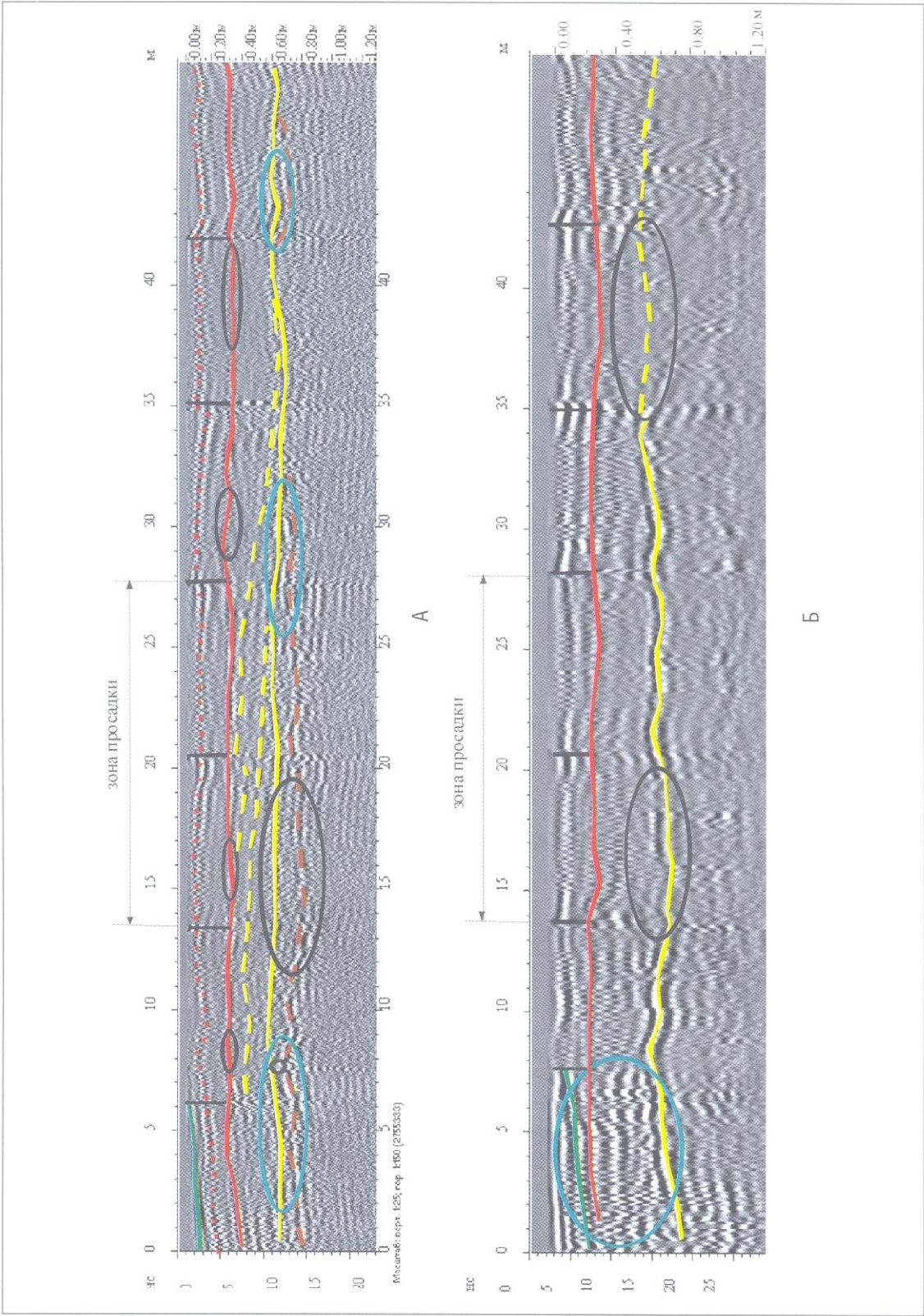


РИС. 12.11. Фрагмент георадиолокационного профиля через зону просадки, выполненный георадаром «Око» с двумя антенными блоками — АБ-1700 (А) и АБ-700 (Б).
Объяснения в тексте

же предположительно можно выделить как зоны разуплотнения, т.е. зоны возможных деформаций полотна ВПП. Как потенциально опасный следует также рассматривать участок в начале профиля между пикетами 0—8 метров. Здесь отмечается значительное увеличение амплитуд отраженных волн, очевидно, обусловленное повышением увлажненности разреза (участок показан на профиле голубым контуром, нижний профиль). В пользу данного предположения может свидетельствовать погружение подошвы песка на этом же участке, которое можно объяснить уменьшением скорости распространения электромагнитных волн (так называемый скоростной эффект). Упомянувшееся выше наличие здесь слоя асфальта на армобетоне также служит косвенным доказательством просадок на этом участке.

В настоящее время значительная зона просадки наблюдается между пикетами 14—28 метров. На этом же участке отчетливо выделяется прогибание подошвы слоя песка. Не исключено, что причиной просадки могут быть процессы, протекающие на больших глубинах, чем изученные с помощью данных антенн.

При анализе использованных материалов для пересчета из временного в глубинный масштабы использовалась средняя скорость распространения электромагнитных волн 9—10 см/нс.

Из обсуждения приведенных данных видно, что использование антенн с различной частотой позволяет весьма успешно решать многие вопросы строения объектов данного типа, определять причины деформаций покрытий и, при необходимости, проводить мониторинг этих сооружений.

ГЛАВА 13.

Использование георадио- локации в строительстве и реставрации

В последние годы результаты георадиолокационных исследований все чаще применяются при строительстве различных сооружений, реконструкции, реставрации и мониторинге уже действующих объектов. Области применения георадиолокации 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 детального строения разреза, поиск пустот под конструкциями, определение причин деформаций сооружений, определение длины и состояния свай и фундаментов, выделение 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 бурения.

В предыдущих разделах были продемонстрированы некоторые результаты применения георадиолокационных исследований в строительстве. Это работы по обнаружению трубопроводов, кабелей, фрагментов фундаментов и строительных конструкций, изучение причин разрушения насыпи и полотна автомобильных и железных дорог, поиск карстоопасных участков и зон трещиноватости в подземных выработках и т.д. Ниже будут рассмотрены некоторые результаты 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. По-прежнему практически неизученными остаются вопросы оценки прочностных характеристик строительных конструкций с помощью метода георадиолокации.

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 и при проведении натурных исследований, процессы суффозии значительно ускоряются в местах локальных протечек на теплотрассах и других трубопроводах.

Некоторые примеры использования георадиолокационных данных, которые будут приведены ниже, не всегда являются достаточно убедительными, однако автор считает полезным их демонстрацию, чтобы привлечь к ним внимание и заинтересовать специалистов в дальнейшем продвижении этого метода в строительстве и реставрации.

Ниже представлен ряд примеров с подробными объяснениями, в которых показаны возможности георадиолокации при решении ряда задач.

13.1. ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ

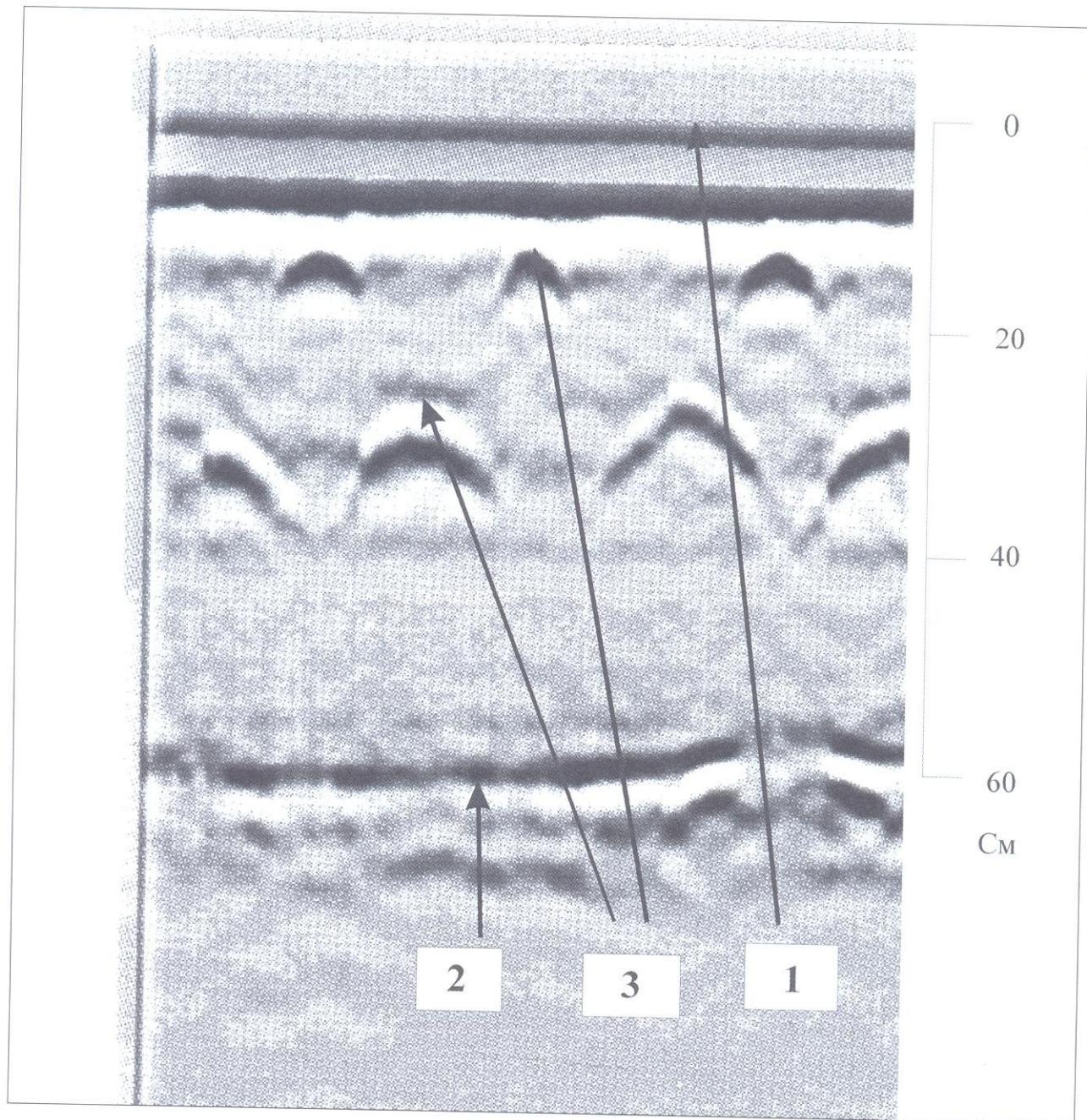


РИС. 13.1. Фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного с антенной АБ-1700 (георадар «Око-2», материалы предоставлены ООО «ЛОГИС»). Работы выполнялись с целью обнаружения арматуры в бетонном блоке толщиной 60 см.
1 — поверхность блока; 2 — противоположная сторона блока; 3 — оси синфазности дифрагированных волн от металлических стержней арматуры. Отчетливо видно два ряда арматурной сетки. Если стержни находятся друг под другом, то обнаружить их крайне сложно.

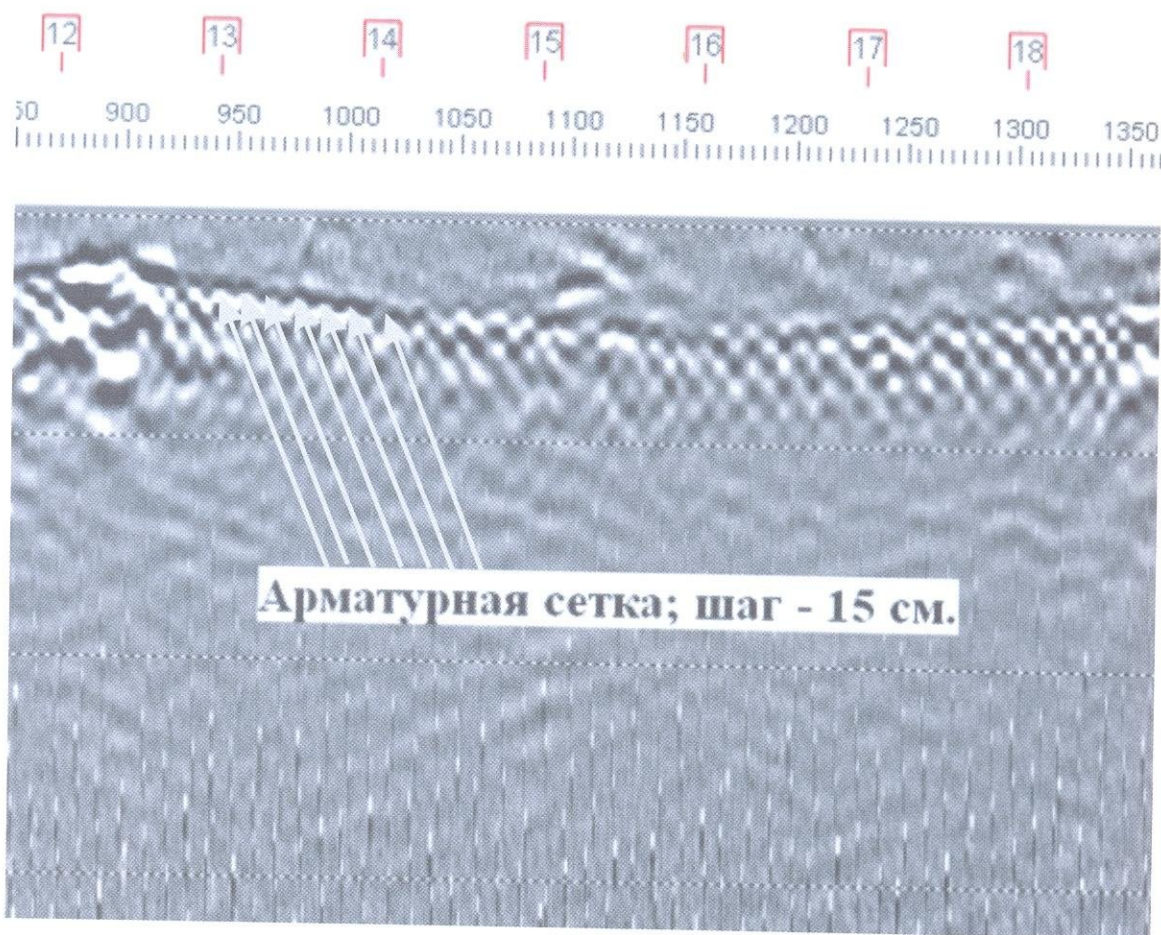


РИС. 13.2. Фрагмент георадиолокационного профиля по бетонному полу спортивного комплекса.

Целью исследований было определение его строения и выяснение причин образования трещин. Заливка бетона производилась по квадратам на арматурную сетку, которая была уложена на грунт. На радарограмме видно, что глубина залегания арматурной сетки сильно меняется по площади. Шаг сетки — 15 см. Никаких аномальных зон под полом выявлено не было. Причиной появления трещин на отдельных участках было, по-видимому, несоблюдение технологии при заливке пола. Использовалась антенна 1 ГГц, георадар «Зонд 12 е»

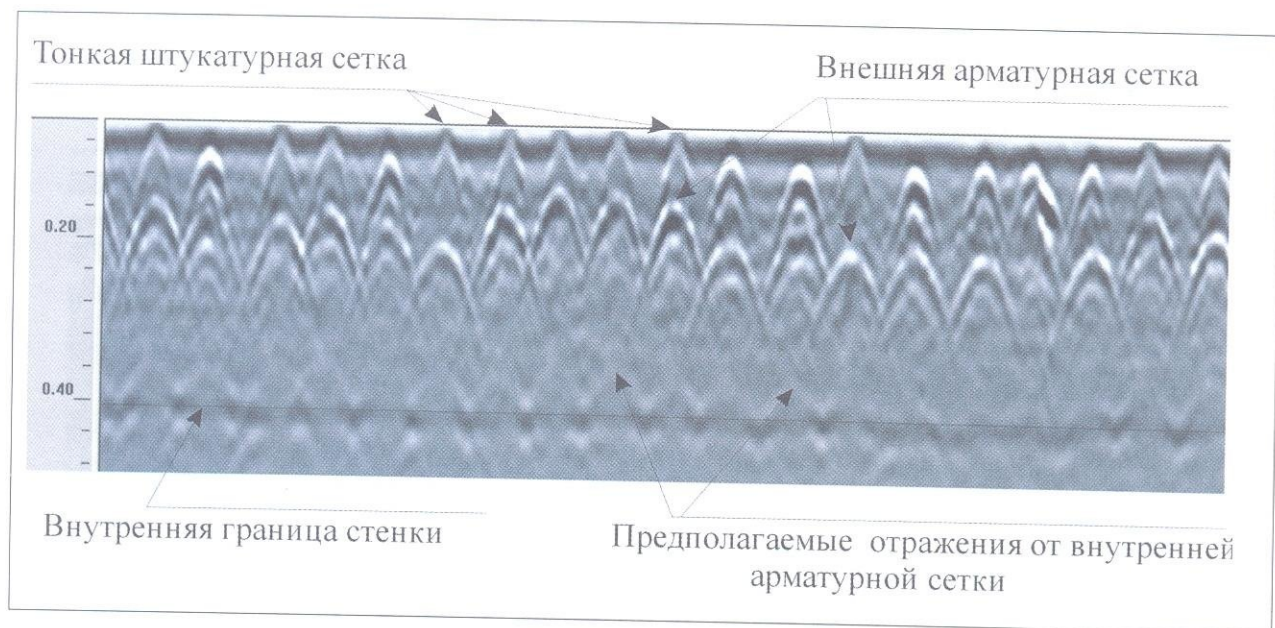


РИС. 13.3. Фрагмент георадиолокационного профиля по внешней стороне подпорной железобетонной стенке лестничного схода.

Цель работ — определение внутреннего строения стенки и оценка степени ее сохранности. Штукатурная и внешняя арматурная сетки уверенно выделяются по отчетливым гиперболическим осям синфазности, внутренняя сетка выделяется предположительно. Штукатурная сетка закрыта тонким слоем бетона толщиной около 2 см. Толщина стенки должна быть одинакова. Исследования показали, что глубина заложения внешней арматурной сетки значительно меняется по профилю, что обусловлено, по-видимому, нарушением технологии работ при строительстве. Антенна 1500 МГц, георадар SIR-20 (материалы предоставлены ГУП «Гормост»)

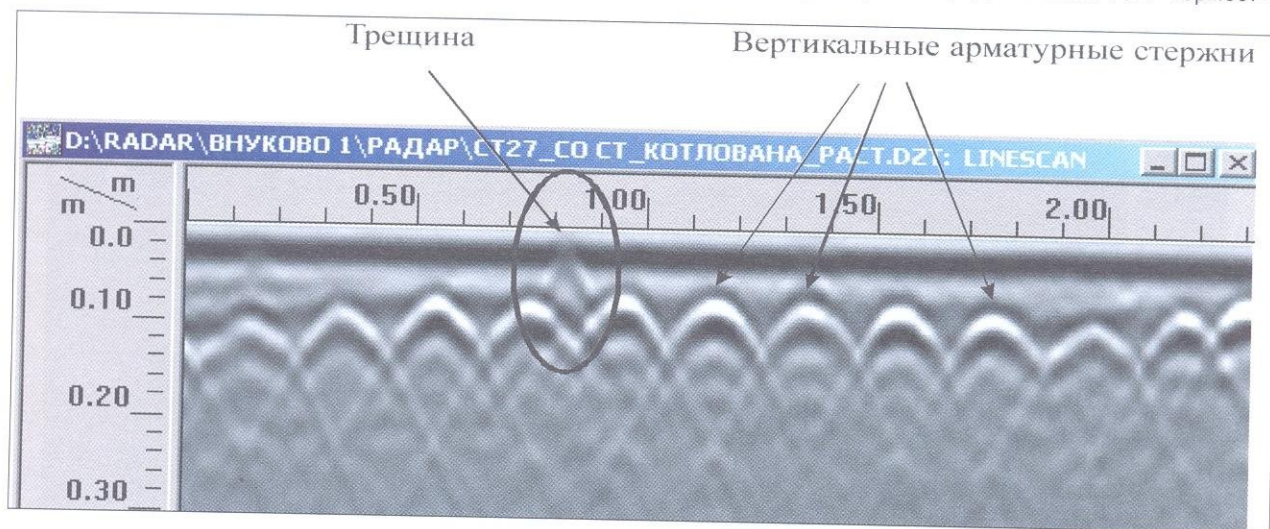


РИС. 13.4. Фрагмент георадиолокационного профиля по поверхности круглой железобетонной стойки (по окружности).

На поверхности стойки видна трещина, которая на радарограмме выделяется по наличию гиперболической оси синфазности. Толщина трещины около 0,5 мм. Антенна 1500 МГц, георадар SIR-20 (материалы предоставлены ГУП «Гормост»)

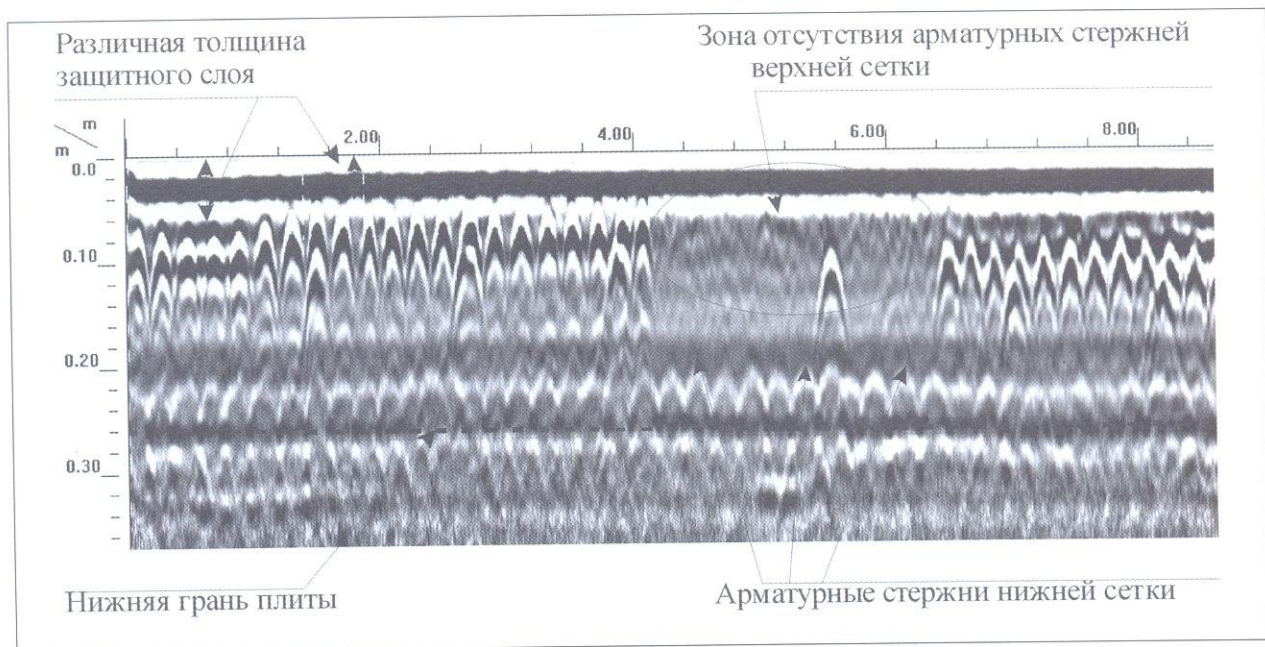


РИС. 13.5. Фрагмент георадиолокационного профиля по плите перекрытия цеха.

Цель исследований — определение конструкции плиты (наличие или отсутствие арматуры, ее шаг, количество слоев арматурной сетки, толщина защитного слоя арматуры и т.д.). На участке плиты длиной около 2 метров, в верхней части плиты арматурных стержней не обнаружено, что, очевидно существенно снижает ее прочностные характеристики. Антенна 1500 МГц, георадар SIR-20 (материалы предоставлены ГУП «Гормост»)

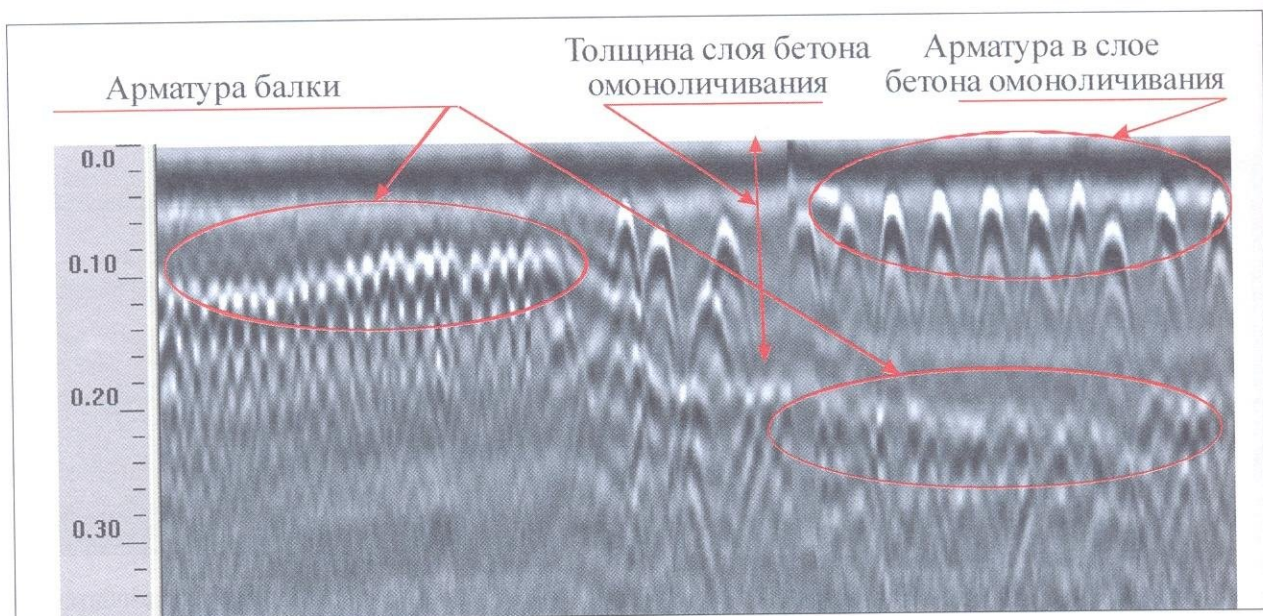


РИС. 13.6. Фрагмент георадиолокационного профиля по полу внутри коробчатой балки моста.

Углубление в балке было забетонировано (омоноличено) с использованием арматуры. Антенна 1500 МГц, георадар SIR-20 (материалы предоставлены ГУП «Гормост»)

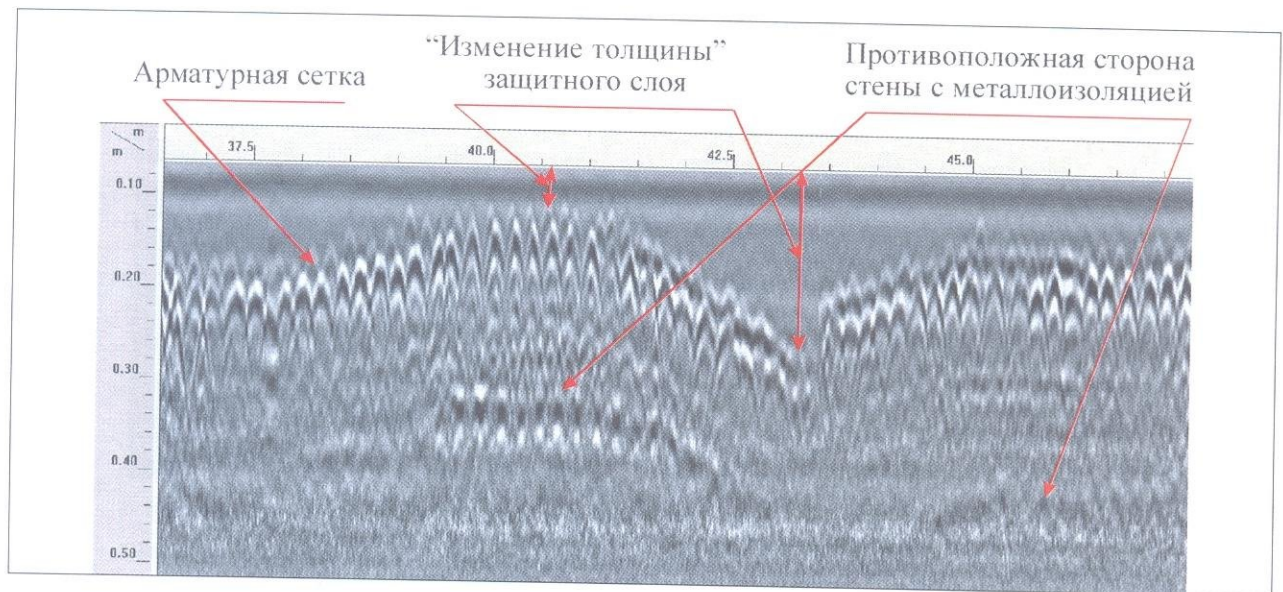


РИС. 13.7. Фрагмент георадиолокационного профиля по бетонной стене с армированием и с металлоизоляцией на противоположной стороне.

Толщина стены на всем протяжении профиля практически одинакова (около 50 см), поэтому все изменения толщины защитного слоя бетона до арматуры и толщины самой плиты на временном разрезе обусловлены значительными вариациями скорости распространения электромагнитных волн, связанные с различным увлажнением бетона. Участок максимального прогибания арматурной сетки приурочен к месту протечки стены. Антенна 1500 МГц, георадар SIR-20 (материалы предоставлены ГУП «Гормост»)

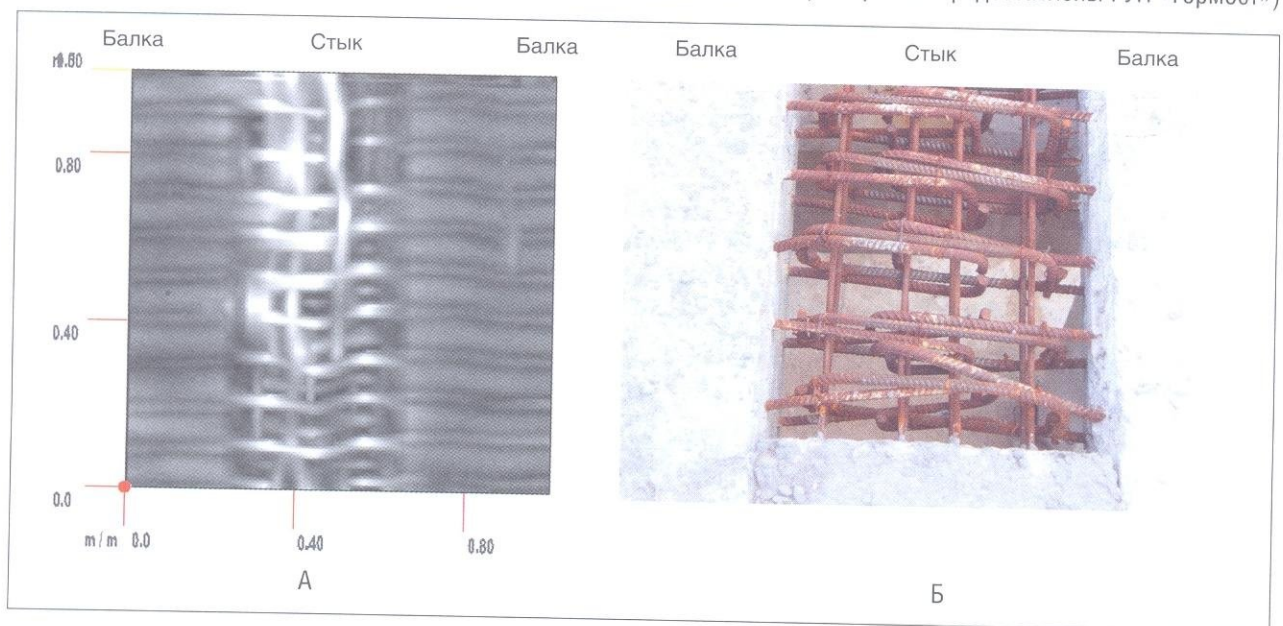


РИС. 13.8. Исследования проводились по сетке профилей с целью получения объемного изображения (горизонтальных амплитудных срезов на разных глубинах):

А — амплитудный срез забетонированного стыка; Б — фото фрагмента стыка до бетонирования (до омоноличивания). Антенна 1500 МГц, георадар SIR-20 (материалы предоставлены ГУП «Гормост»)

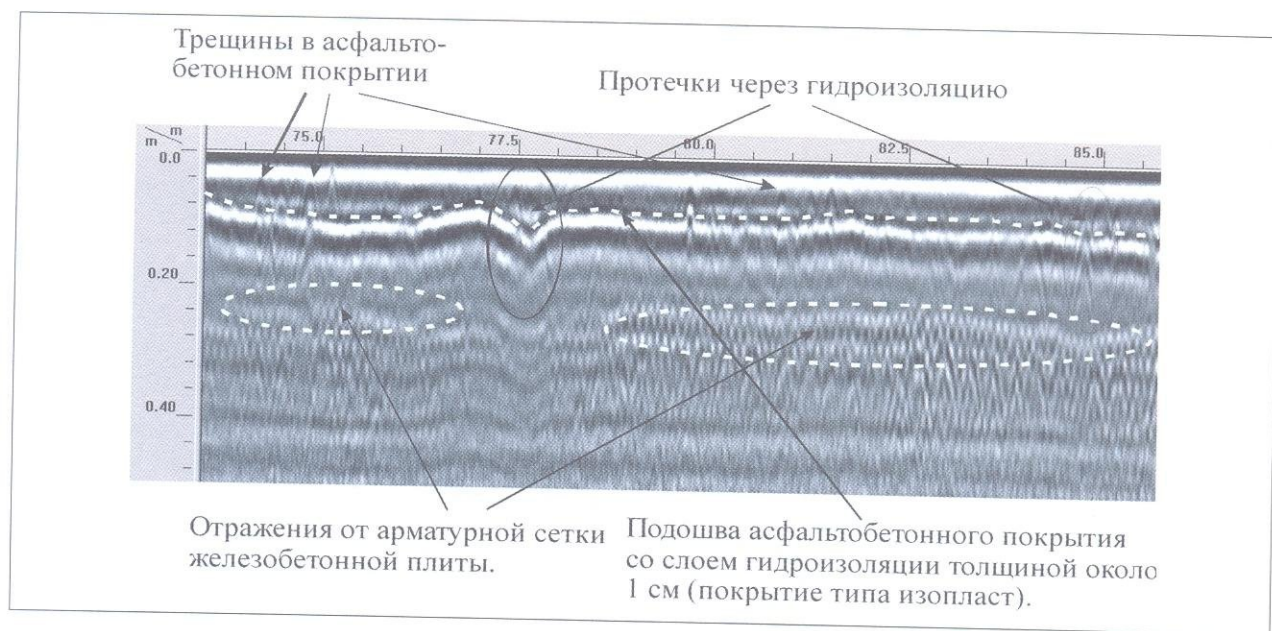


РИС. 13.9. Фрагмент георадиолокационного профиля вдоль пролета моста.

Цель исследований — определение толщины асфальтобетонного покрытия железобетонной плиты, его состояния и поиск мест нарушений гидроизоляции в основании покрытия. Нарушения в слое гидроизоляции предположительно выделялись по участкам прогибания осей синфазности отраженных волн (прогибание связывается с понижением скорости электромагнитных волн в местах протечек вследствие увлажнения). Следует также отметить, что о понижении скорости указывает также прогибание нижележащих границ (см. рисунок). Антенна 1500 МГц, георадар SIR-20 (материалы предоставлены ГУП «Гормост»)

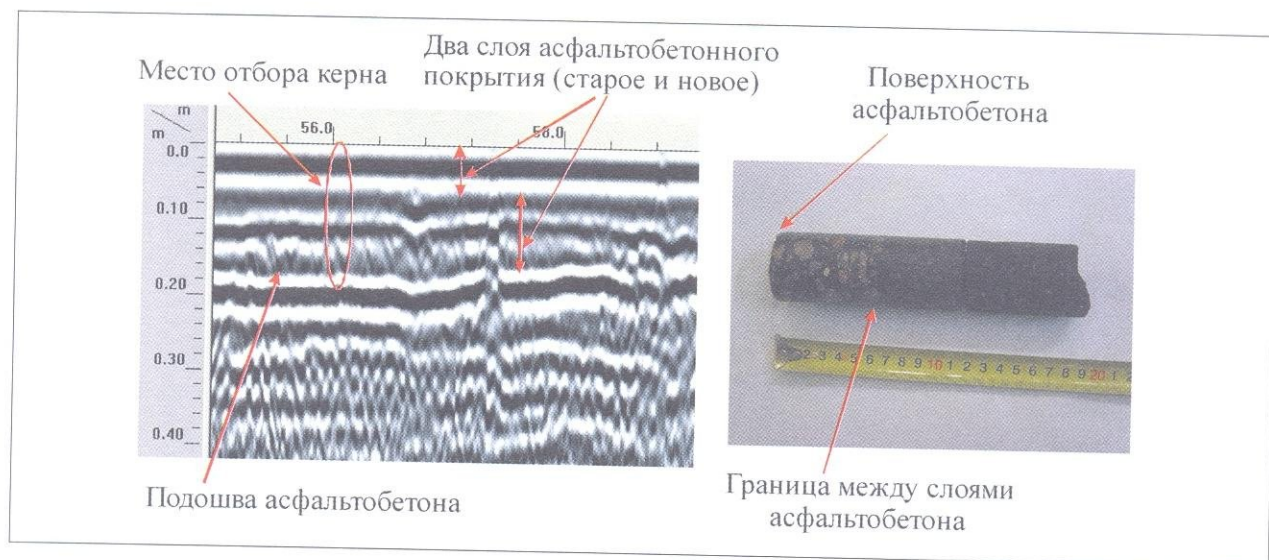


РИС. 13.10. Фрагмент георадиолокационного профиля по путепроводу и фото керна, выбуренного на одном из участков.

Отчетливо выделяется подошва асфальтобетона и граница между старым и новым покрытиями. Антенна 1500 МГц, георадар SIR-20 (материалы предоставлены ГУП «Гормост»)

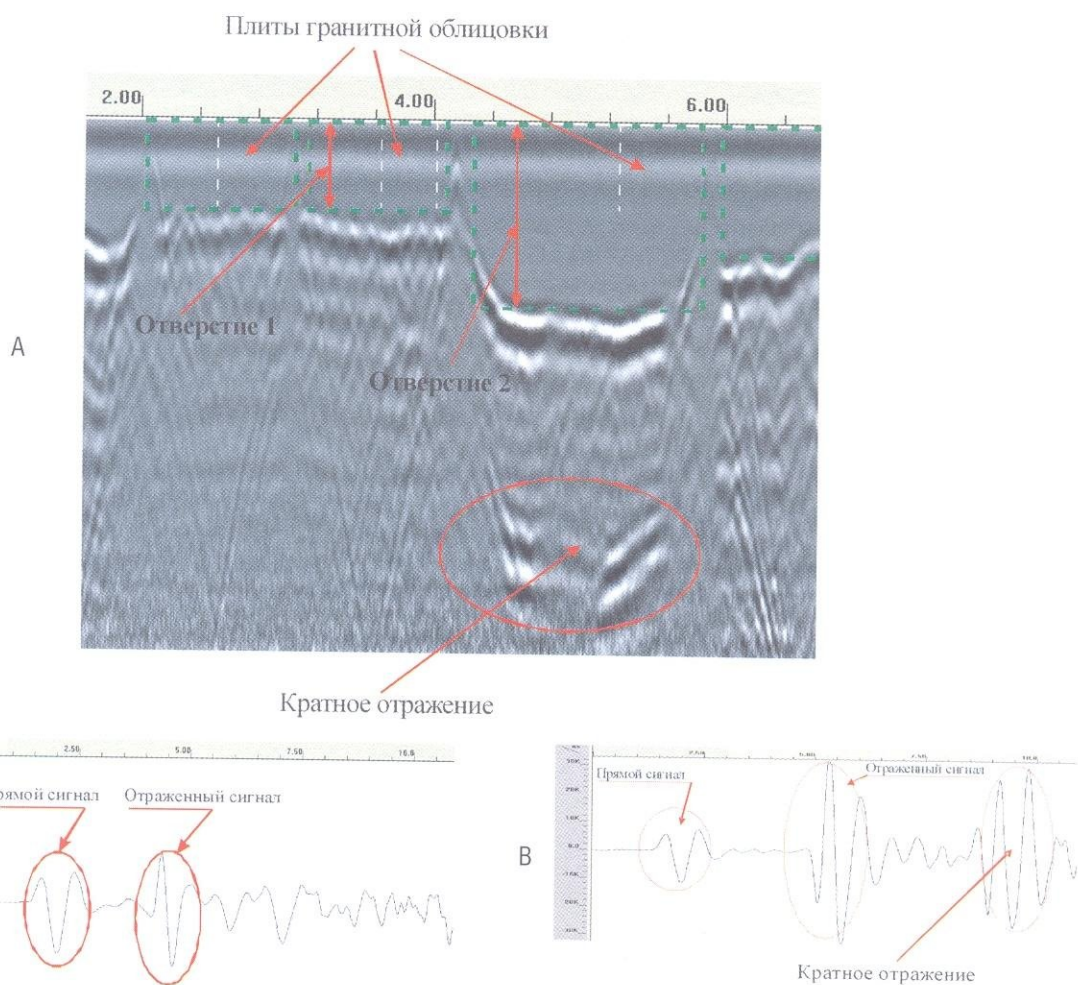


РИС. 13.11. Фрагмент георадиолокационного профиля по облицованной гранитом стене устоя моста (А) и одиночные трассы с двух участков с этой же радарограммы (Б, В).

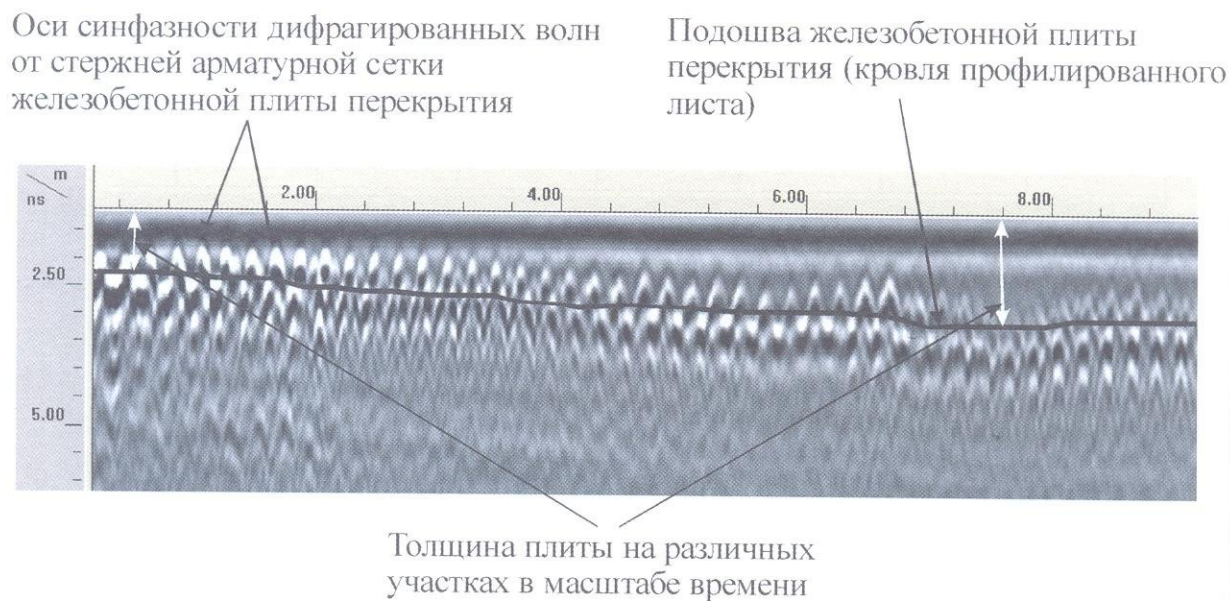
Цель исследований — определение пустот между плитками облицовки и бетонной стенкой устоя, которые возникают вследствие разрушения раствора в процессе эксплуатации. Толщина облицовочной плитки меняется иногда более чем в два раза. Отражение от границы плитка — бетон отчетливо выделяется на радарограммах (А), причем амплитуда отраженных от этой границы волн значительно меняется вдоль профилей. На участках повышенных значений амплитуд наблюдается образование кратного отражения. Повышение амплитуды обусловлено, по-видимому, наличием воздушного зазора (т.е. воздушной полости). Для заверки данного предположения было проведено высверливание отверстий в гранитной плитке и с помощью эндоскопа оценена толщина воздушной полости. На первом участке (отверстие 1, А) толщина плитки 8,5 см, а воздушный зазор менее 1 мм, т.е. практически отсутствует. На трассе с этого же участка радарограммы (Б) видно, что амплитуды прямой и отраженной волны мало отличаются. На втором участке (отверстие 2, А) толщина плиты 19 см, а воздушный зазор составляет 2,5 см. Наличие такой пустоты и привело к образованию отраженной волны большой амплитуды с интенсивной второй кратной (В). По этому признаку по всей площади исследований была построена схема расположения воздушных полостей, которая в дальнейшем была использована при проведении ремонтно-восстановительных работ. Антенна 1500 МГц, георадар SIR-20 (материалы предоставлены ГУП «Гормост»)



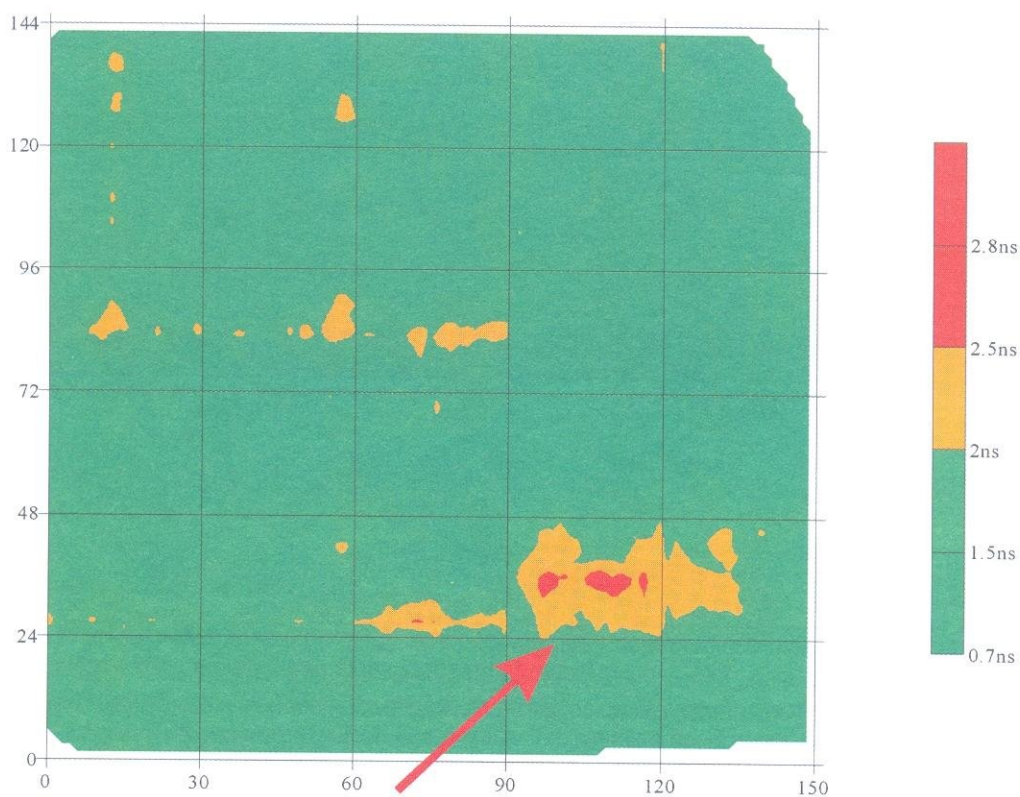
РИС. 13.12. Цель исследований — определение пустот под бетонным покрытием причала. Нижняя пунктирная линия показывает глубину провала. Максимальная глубина провала составляет около 4 наносекунд двойного времени (около 60 см при $V=30$ см/нс). Антенна 1 ГГц, георадар «Зонд 12»

РИС. 13.13. Цель исследований — изучение свойств бетона плиты перекрытия для получения исходных данных при оценке несущей способности перекрытия и определения уровня нагрузок, которым может подвергаться конструкция во время эксплуатации.

А — пример георадиолокационного профиля; Б — поле времен прохождения зондирующего сигнала от поверхности плиты перекрытия до поверхности профилированного металлического листа по всей изученной площади. Перекрытие представляет собой монолитную железобетонную плиту. При бетонировании снизу был использован профилированный лист, который входит в конструкцию перекрытия. Таким образом, толщина перекрытия одинакова на всем протяжении. Однако на временном разрезе время прихода отраженной от основания плиты волны сильно меняется на различных участках, что, очевидно, обусловлено значительными латеральными изменениями скорости распространения электромагнитных волн. Эти изменения скорости могут быть связаны либо с изменением увлажнения бетона плиты перекрытия, либо с неоднородностью строения бетона. Так как перекрытие длительное время находится внутри помещения (т.е. является, вероятно, сухим), то основной, а может быть и единственной причиной является изменение свойств бетона. В пределах данного фрагмента радарограммы (рис. 13.13 А) для понижения границы в ее правой части достаточно уменьшения скорости на 25 %. Работы по бетонированию плиты выполнялись постепенно в течение года на 14 участках различной площади, причем выдерживание бетона иногда осуществлялось с использованием методов электроподогрева, что и могло привести к значительной изменчивости свойств бетона в плане. На нижнем рисунке (Б) видно, что в правом нижнем углу выделяется зона с увеличенными временами прихода отраженных волн (показана стрелкой и желтым цветом). Эта зона характеризуется пониженными значениями прочности поверхностного слоя бетона, определенной неразрушающим способом (использовался склерометр Шмидта) и по испытанию отобранных образцов на прочность при сжатии. Также эта зона совпадает с участками бетонирования и можно сделать вывод, что изменение прочности бетона плиты перекрытия обусловлено неоднородностью поставляемого бетона, расслоением бетонной смеси при ее уплотнении и возможными структурными нарушениями бетона при его выдерживании в конструкции. Использовалась антенна 1500 МГц, георадар SIR-20. Данные предоставлены ГУП «Гормост»



А



Б

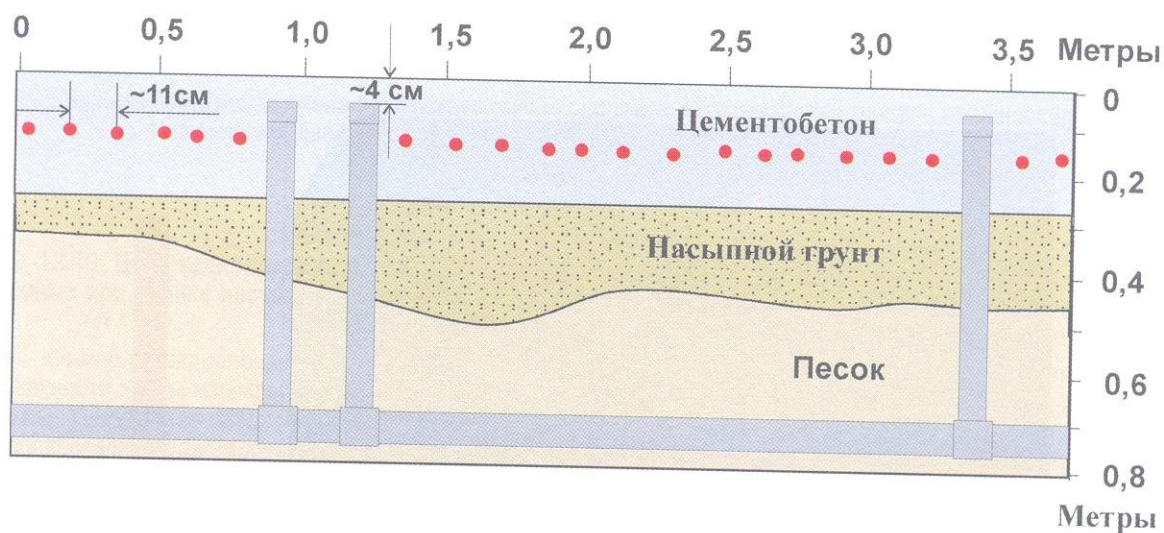
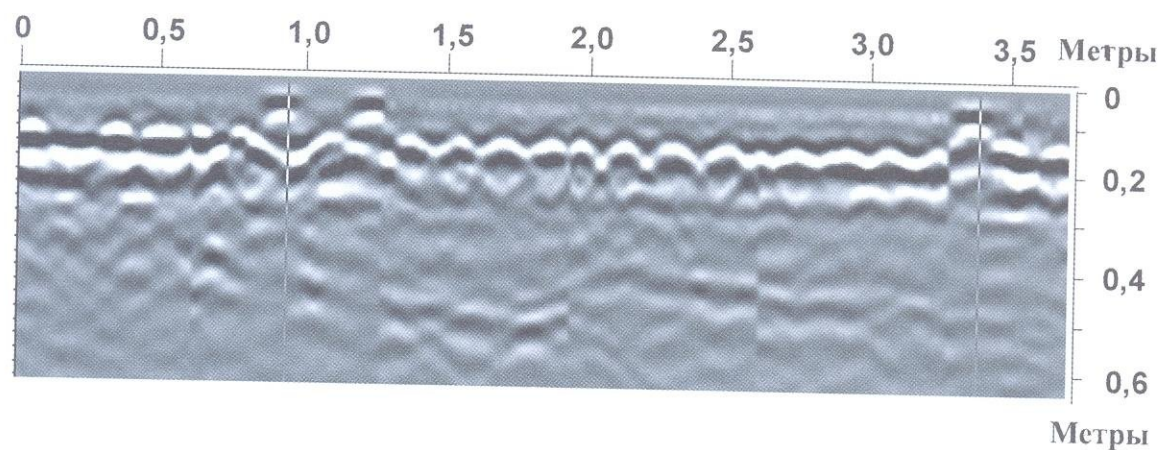


РИС. 13.14. Георадиолокационный профиль по полу строящегося здания.

Целью исследований было обнаружение вертикальных выходов пластиковых труб под бетонной стяжкой. В процессе строительства сначала были проложены пластиковые трубы, которые затем были засыпаны песком и насыпным грунтом. Сверху был уложен армированный бетон толщиной около 25 см. Шаг арматурной сетки 11–12 см, глубина заложения в среднем составляет около 15 см. По проекту уровень пола должен был быть не выше, чем выходы пластиковых труб. В действительности уровень пола превысил выходы труб на 3–5 см. Задача состояла в обнаружении мест выхода труб, которые достаточно четко выявляются на радарограммах. Использовался георадар «Око» с антенной АБ-1700. Данные предоставлены НПЦ «Геотех»

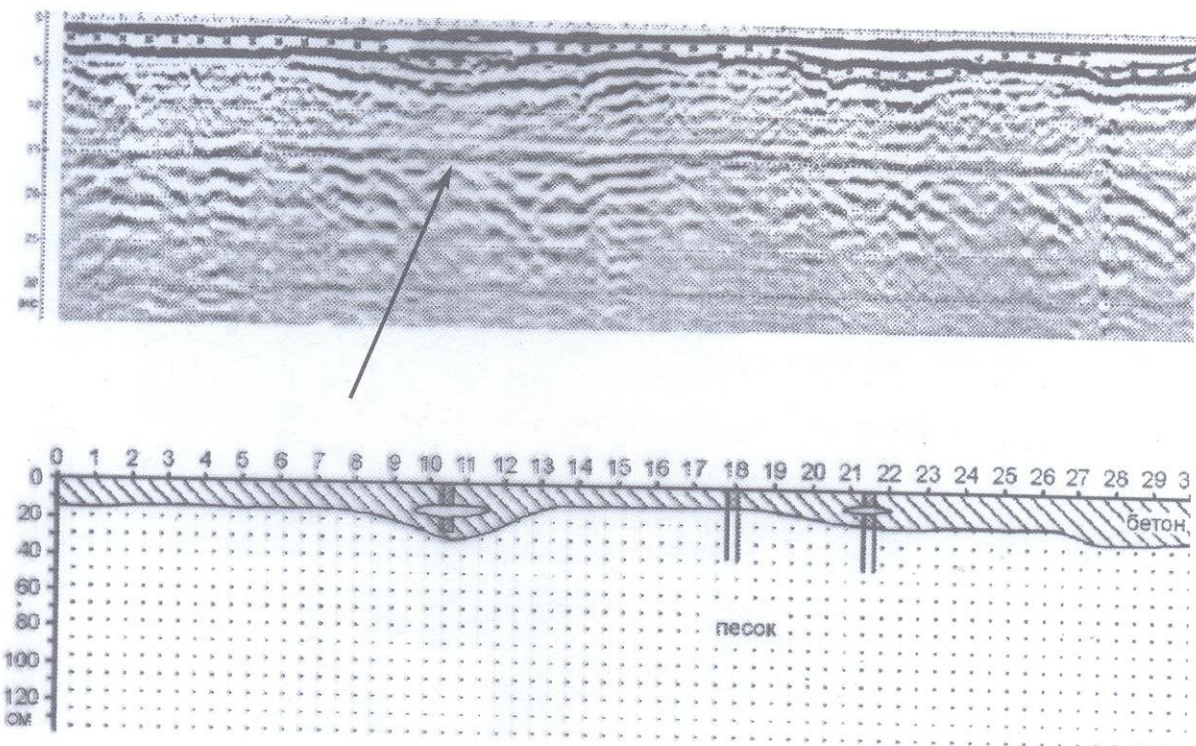


РИС. 13.15. Георадиолокационный профиль по полу подвального помещения и его интерпретация.

Цель исследований — определение толщины бетонной стяжки (слоя бетона), наличие пустот под ней и поиск трубопроводов и кабелей. Пунктирной линией на радарограмме показана подошва стяжки. Горизонтальные оси синфазности — отражение от потолка (показано стрелкой). Для заверки георадиолокационных данных было пробурено три скважины, которые показали наличие двух пустот в бетонной стяжке на пикетах 10,5 и 21,5 м (на пикете 10,5 м: интервал 0–11 см — бетон, интервал 11–19 см — воздух, интервал 19–25 см — бетон; на пикете 21,5 м: интервал 0–8 см — бетон, интервал 8–11 см — воздух, интервал 11–19 см — бетон, ниже 19 см — сухой песок). При построении глубинного разреза использовалась средняя скорость распространения электромагнитных волн 12 см/нс. Использовалась антенна 1 ГГц, георадар «Зонд 12»

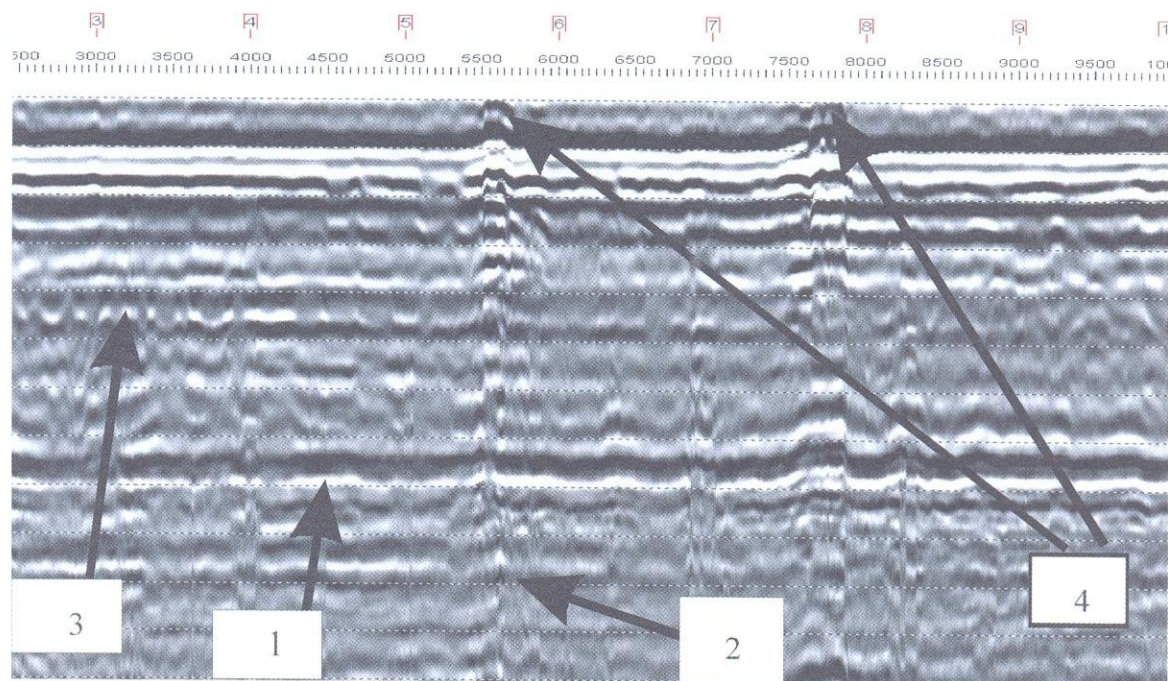


РИС. 13.16. Георадиолокационный профиль по бетонной плите.

Цель исследований — определение толщины плиты, выяснение особенностей ее строения и определение толщины нижележащего слоя бетонной стяжки. 1 — основание плиты (толщина около 70 см); 2 — основание бетонной стяжки (толщина около 20 см); 3 — участок с дополнительным армированием (?); 4 — вертикальные элементы конструкции плиты. Антенна 1 ГГц, георадар «Зонд 12»

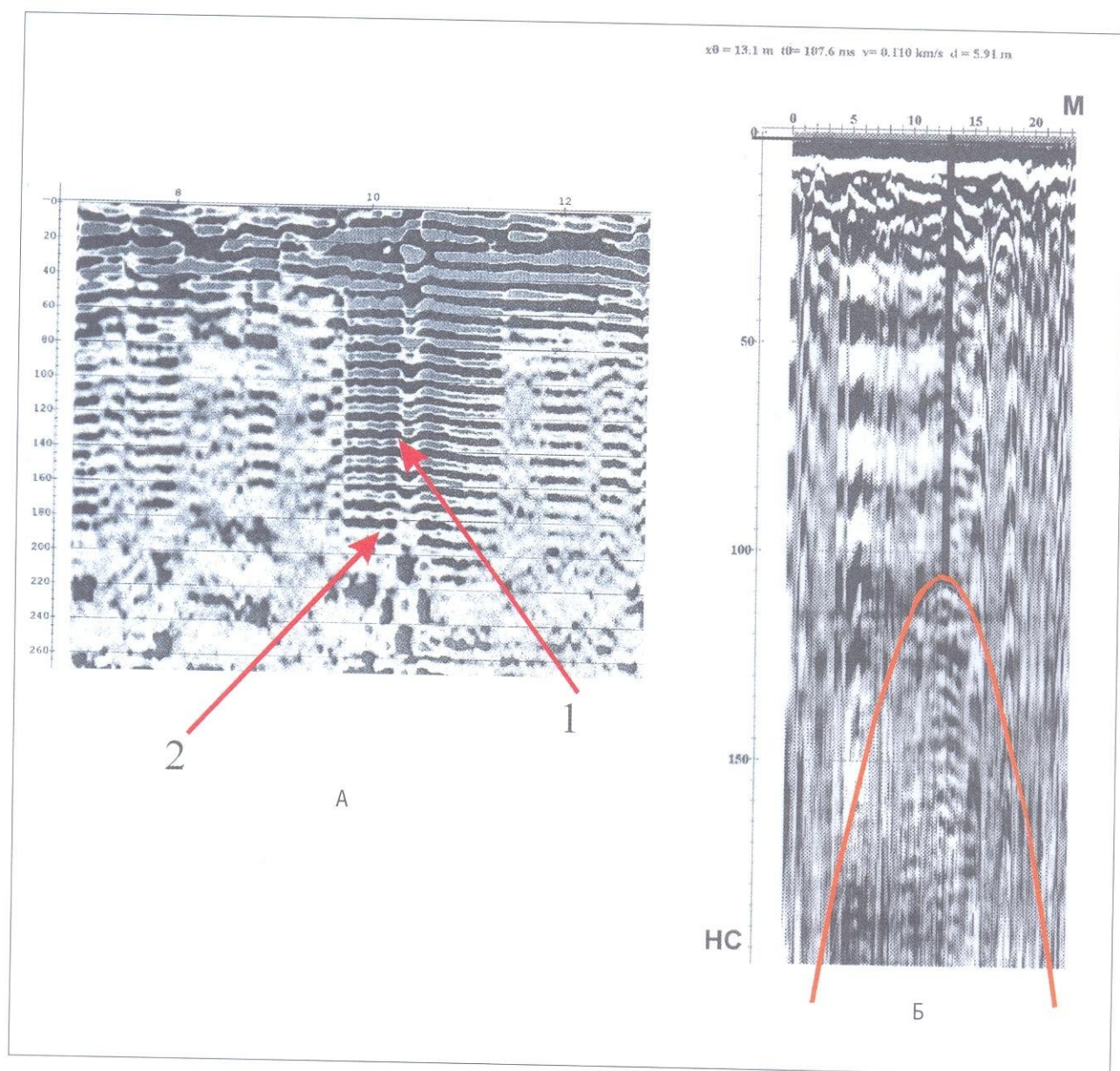


РИС. 13.17. Фрагменты георадиолокационных профилей, пройденных у изголовья свай.

Цель исследований — определение их длины. А: 1 — положение железобетонной сваи 30 x 30 см; 2 — окончание так называемой «звучащей» записи (около 180 нс). Известно, что длина сваи — 9 метров. При средней скорости 10 см/нс, окончание «звучащей записи» будет соответствовать длине сваи (180 нс/2 x 10 см/нс=9 м). Б — железобетонная свая 30 x 30 см, показана черной линией. На конце сваи наблюдается дифракция. Оценка скорости по годографу дифрагированной волны дает значение скорости около 11 см/нс и длину сваи 5 м 80 см, что хорошо согласуется с проектными данными. Определение длины свай по георадиолокационным данным представляет довольно сложную задачу. На приведенных примерах видно, что существует по крайней мере два картировочных признака: 1. наличие зон «звучащей» записи; 2. появление дифрагированной волны на конце сваи. Однако следует отметить, что эти признаки крайне неустойчивы: первый признак, как показывает опыт, «работает» только если свая одиночная; второй признак наблюдается довольно редко. В обоих случаях использовалась антенна 300 МГц (георадар «Зонд 12»)

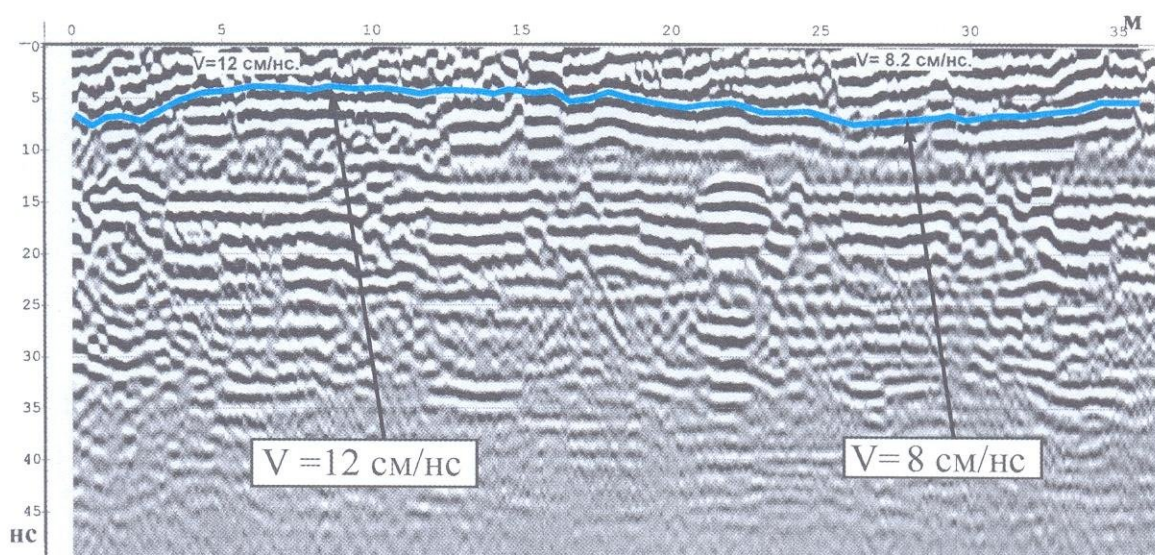


РИС. 13.18. Георадиолокационный профиль по полу подземного гаража. Известно, что толщина пола, который представляет собой бетонную стяжку, в среднем около 25 см.

Цель исследований — выяснение причин появления увлажненных участков на полу гаража. Оконтуривание зон локального увлажнения проводилось на основе анализа скоростей распространения волн. На увлажненных участках на временных разрезах наблюдается прогибание осей синфазности отраженных от подошвы слоя бетона волн. Учитывая то, что толщина бетонной стяжки, судя по проектной документации, практически постоянна, прогибание осей синфазности можно объяснить только падением скорости (скорость падает до 8 см/нс, на сухих участках пола скорость около 12 см/нс). Использовалась антенна 1 ГГц, георадар «Зонд 12»

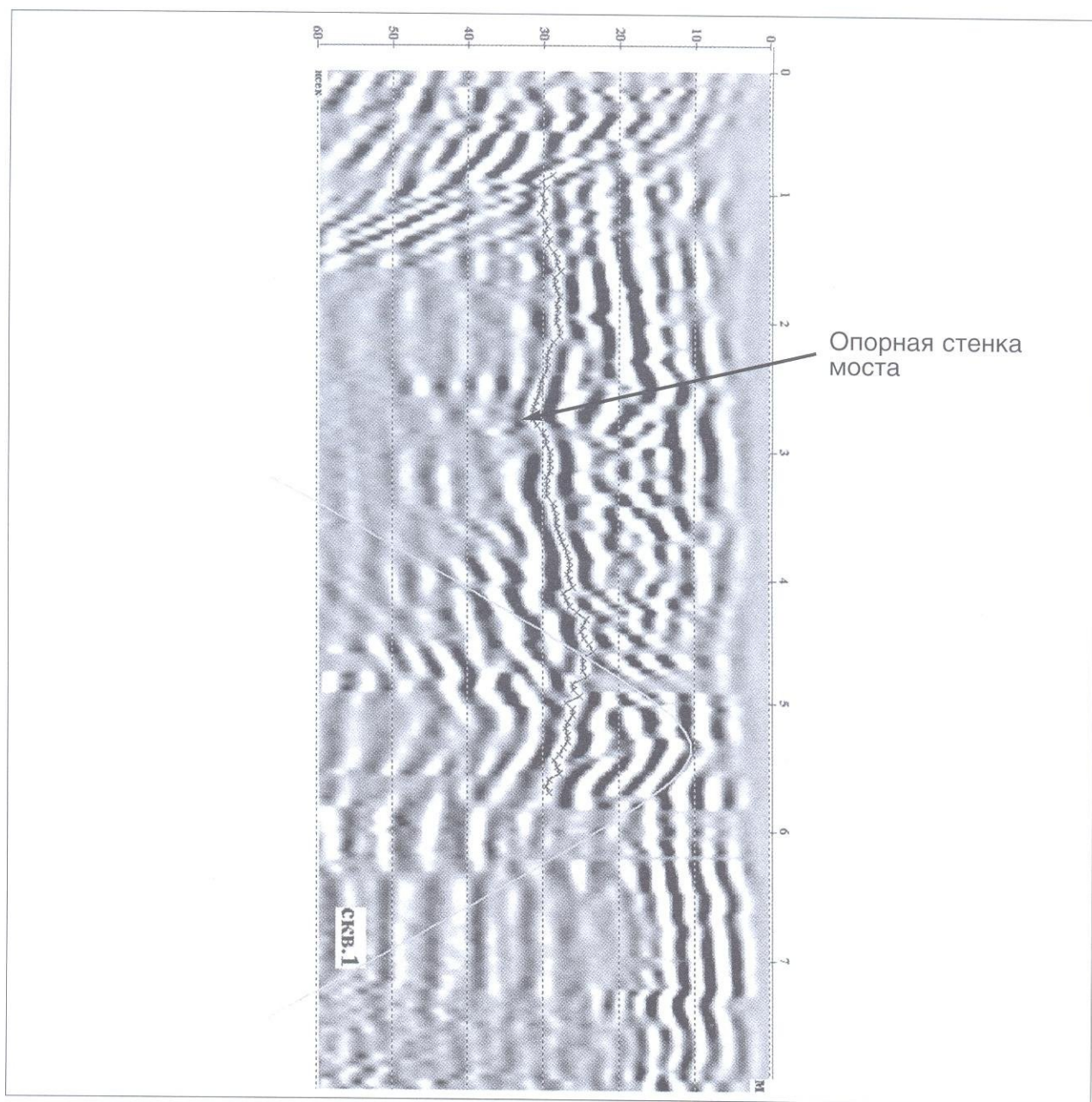


РИС. 13.19. При изучении фундаментов различных подземных сооружений часто нет возможности проводить их непосредственное обследование, поэтому возникает задача получения информации бесконтактным способом.

Для этой цели используются скважинные георадары. Наблюдения проводятся из скважин, пробуренных вблизи изучаемых объектов. На рисунке показана радарограмма, полученная с помощью скважинного георадара при изучении опорной стенки моста во время непрерывного перемещения антенны вдоль ствола скважины. Оси синфазности на временах около 30 нс были приняты за отражение от внешней поверхности фундамента, что хорошо согласуется с расстоянием между скважиной и фундаментом. Глубина залегания основания стенки около 6 метров, в нижней части предположительно выделено расширение («пятка»). Использовалась антенна АБ-700СК (700 МГц), георадар «Око». Материалы предоставлены ООО «Логис», г. Жуковский

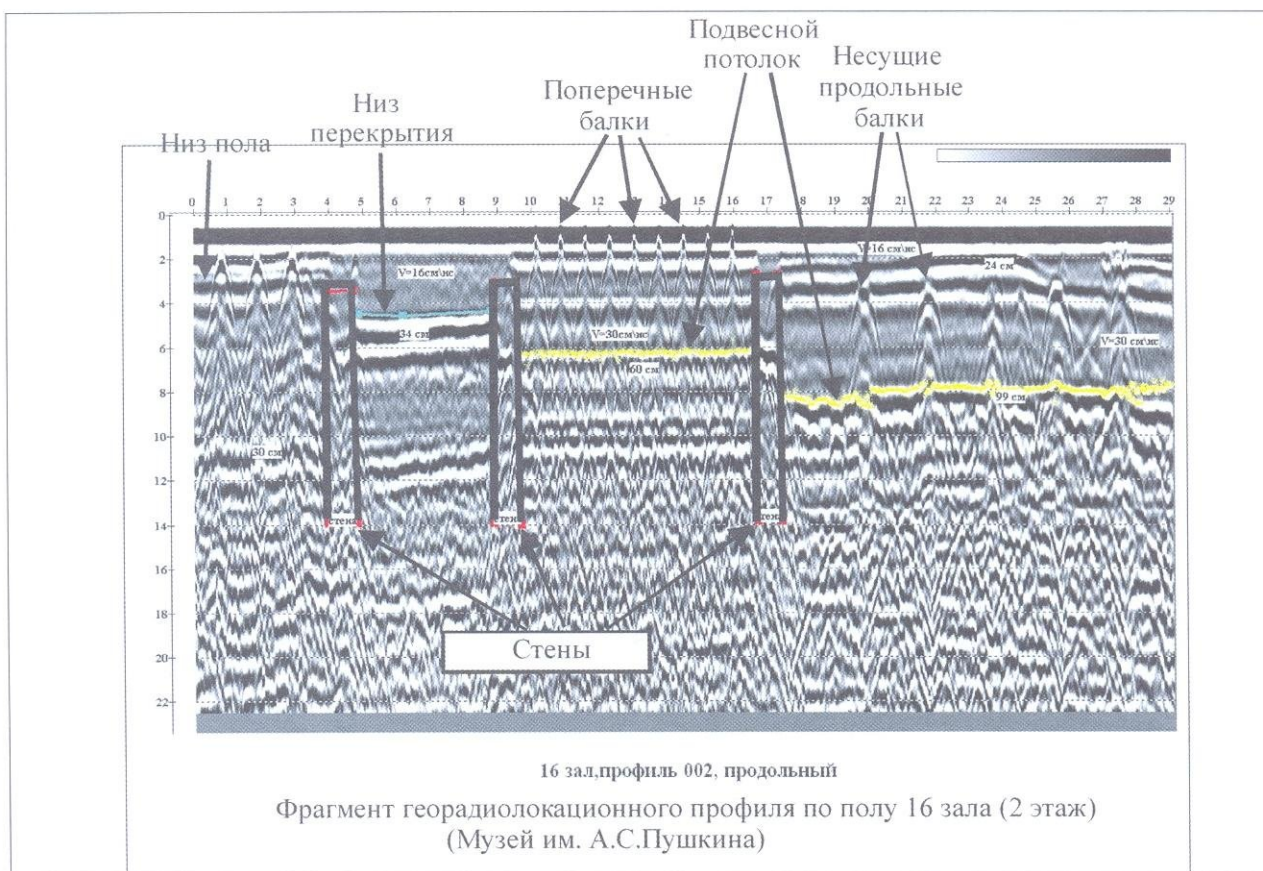
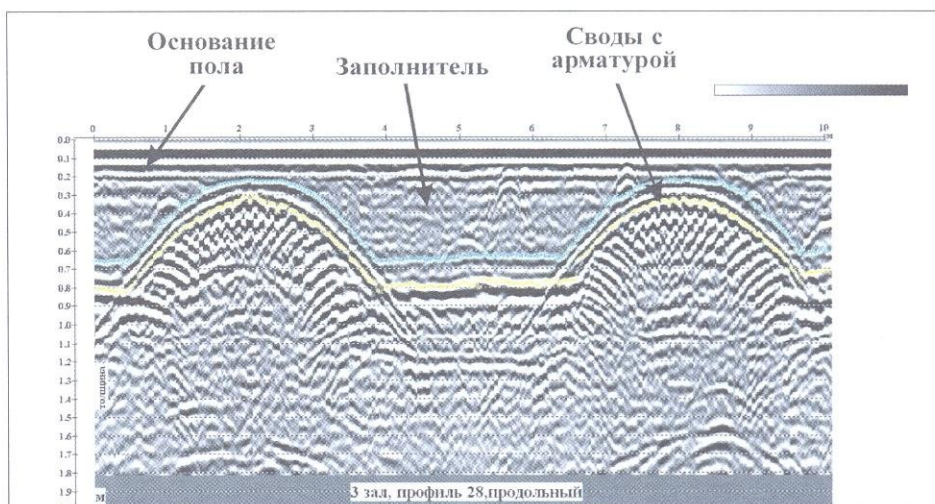


РИС. 13.20. Георадиолокационный профиль по полу здания.

Цель исследований — определение строения перекрытий между этажами и заверка имеющейся строительной документации. Была определена толщина перекрытий, их строение, определен шаг и количество несущих продольных и поперечных балок в различных помещениях. Использовалась антенна 1700 МГц, георадар «Око». Материалы предоставлены В.В.Капустиним

РИС. 13.21. Георадиолокационный профиль по полу.

Цель исследований — определение строения пола и арочных перекрытий. Установлена толщина пола и заполнителя и шаг арматурного каркаса. Использовалась антенна 1700 МГц, георадар «Око». Материалы предоставлены В.В.Капустиним



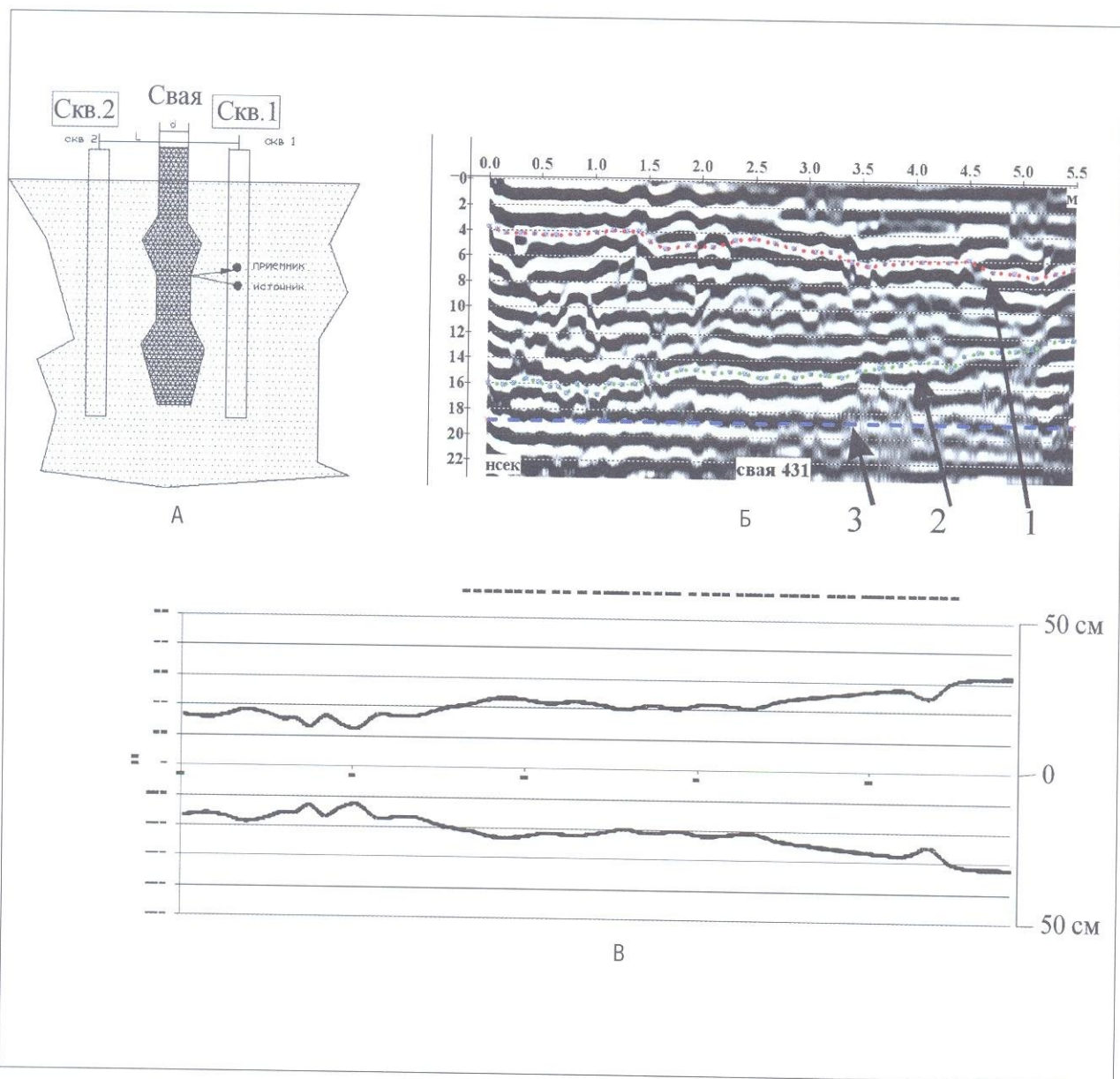


РИС. 13.22. Исследование формы армированных бетонных свай, изготовленных по разрядно-импульсной технологии, методом георадиолокации.

Для оценки несущей способности различных по методике изготовления свай необходимо иметь данные об их форме и особенностях внутреннего строения (наличие пережимов, пустот и т.д.). Опытные-методические исследования с этой целью проводились с помощью скважинного георадара, который непрерывно перемещался вдоль ствола скважин, пробуренных с двух сторон сваи на расстоянии около 80 см от ее оси. Скважины были обсажены пластиковыми трубами. Схема наблюдений показана на рис. 13.22 А. На рис. 13.22 Б представлена радарограмма по одной из скважин, на которой показаны оси синфазности отраженных волн: 1 — от границы распространения бентонитового раствора; 2 — от поверхности сваи; 3 — от армокаркаса. Радарограмма по второй скважине худшего качества (обусловлено более мощным слоем бентонита?), поэтому разрез сваи показан (рис. 13.22 В) по данным измерений в одной скважине (т.е. симметрично оси). Использовалась антенна АБ-700СК (700 МГц), георадар «Око». Материалы предоставлены В.В.Капустиним

РИС. 13.23. Георадиолокационные исследования по выяснению причин появления трещин на стене нового 2-х этажного здания.

На рис. 13.23 А стрелкой показано положение георадарного профиля вдоль здания и фото трещины на стене. Георадиолокационные наблюдения проводились в декабре, апреле и июле одной и той же аппаратурой. На рис. 13.23 Б представлены радарограммы по этому профилю после преобразования Гильберта. Одновременно с геофизическими исследованиями в течение года проводились геодезические измерения суммарных смещений в вертикальной плоскости как на стенах двух зданий, так и между ними (рис. 13.23 В, сечение изолиний 0,2 мм). Суммарные смещения за год в целом не превышают 1,0 мм, т.е. крайне незначительны. Никаких аномальных зон в геологическом строении этого участка обнаружено не было (погребенных долин, резких изменений мощностей отдельных слоев и т.д.). Анализ радарограмм показал, что в течение периода наблюдений отмечались небольшие изменения увлажнения на отдельных участках (см. Главу 7), что, вероятно, и привело к небольшим перемещениям фундаментных блоков и, соответственно, к появлению трещин на стенах здания. Использовалась экранированная антенна 300 МГц, георадар «Зонд 12»

13.2. ИЗУЧЕНИЕ ПРИЧИН ДЕФОРМАЦИЙ РАЗЛИЧНЫХ СООРУЖЕНИЙ

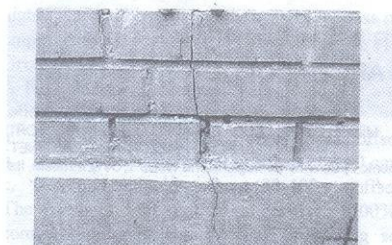


Fig. 1.

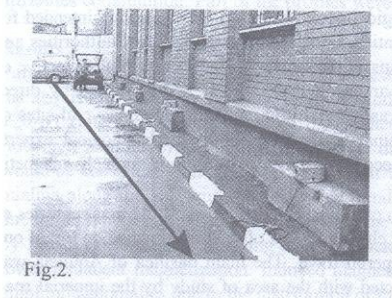
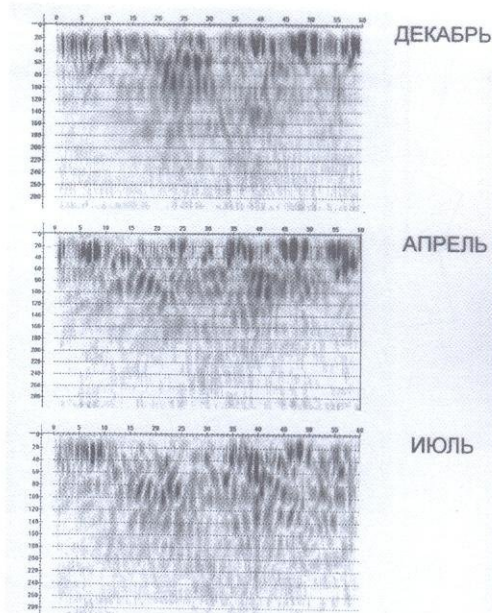
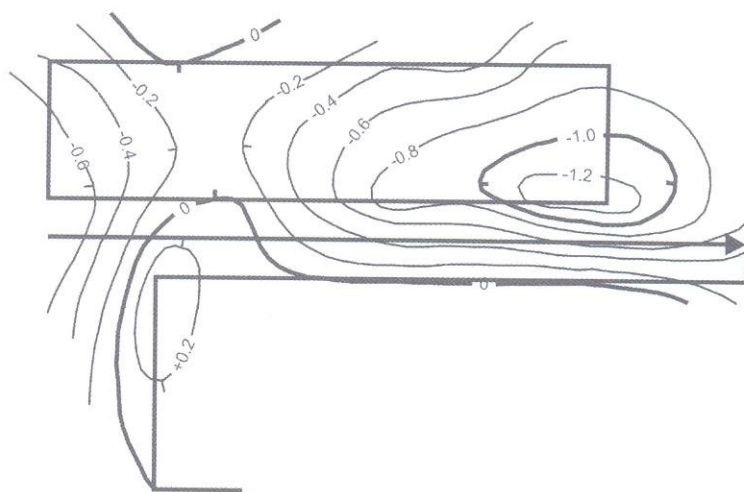


Fig. 2.



А

Б



В

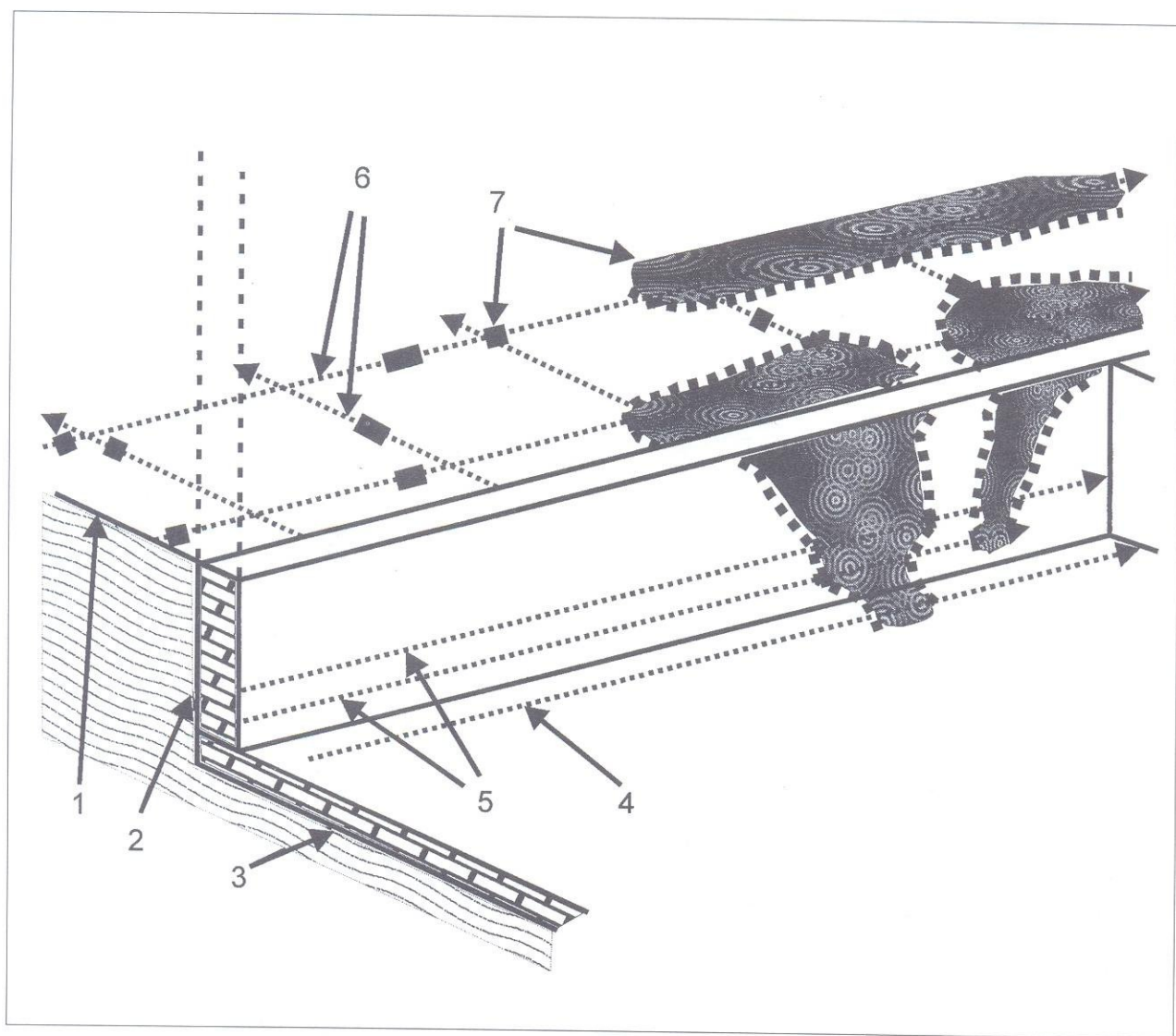


РИС. 13.24. Цель исследований — выяснение причин протечек и состояния стены в подвале высотного здания. На рисунке показана схема расположения профилей и выявленных зон локального увлажнения:

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 — выявленные зоны локального увлажнения. На георадиолокационных профилях их выделения см. Главу 7). На схеме видно, что эти зоны в плане совпадают. Следует также отметить, что в их пределах на участках, прилегающих к стене здания со стороны улицы, наблюдались также просадки до 10–15 см глубиной, что, очевидно, обусловлено процессами суффозии. Зоны повышенного локального увлажнения на улице связаны с авариями теплотрасс, во время которых отмечалось поступление воды через стену подвала внутрь здания. После снятия облицовки на стене в подвале на выявленных увлажненных участках было проведено обследование прочности бетона неразрушающим методом контроля, которое показало, что его прочность из-за постоянного замачивания и нарушения технологии производства работ снижена по сравнению с проектной на 30–40% (фото одного из участков стены см. на рис. 13.25). Исследования проводились с антенной 300 МГц на улице и 1 ГГц внутри подвала, георадар «Зонд 12»

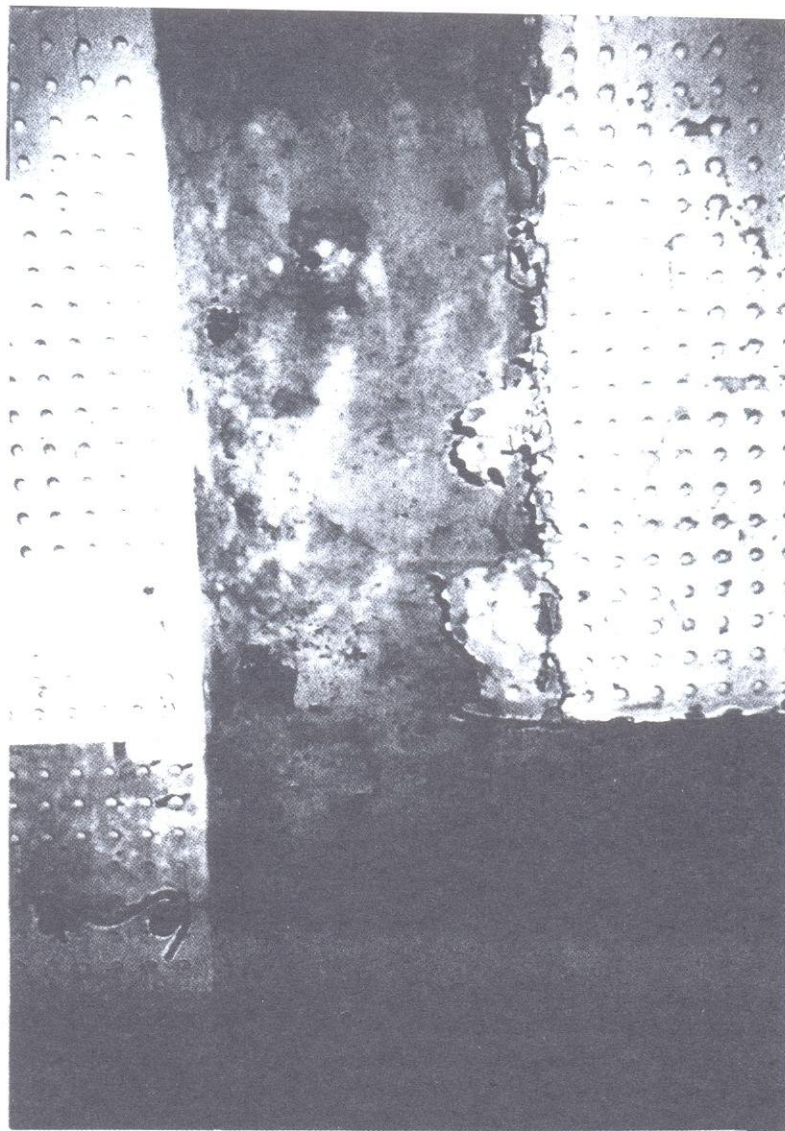


РИС. 13.25. Фото стены со снятой облицовкой (см. рис. 13.24).
Видны небольшие каверны и пустоты

Модуль плановых смещений реперов, расположенных на фасаде дома

—— Цикл № 1(22.11.01) - - - - - Цикл № 2(30.11.01) Цикл № 3(07.12.01)

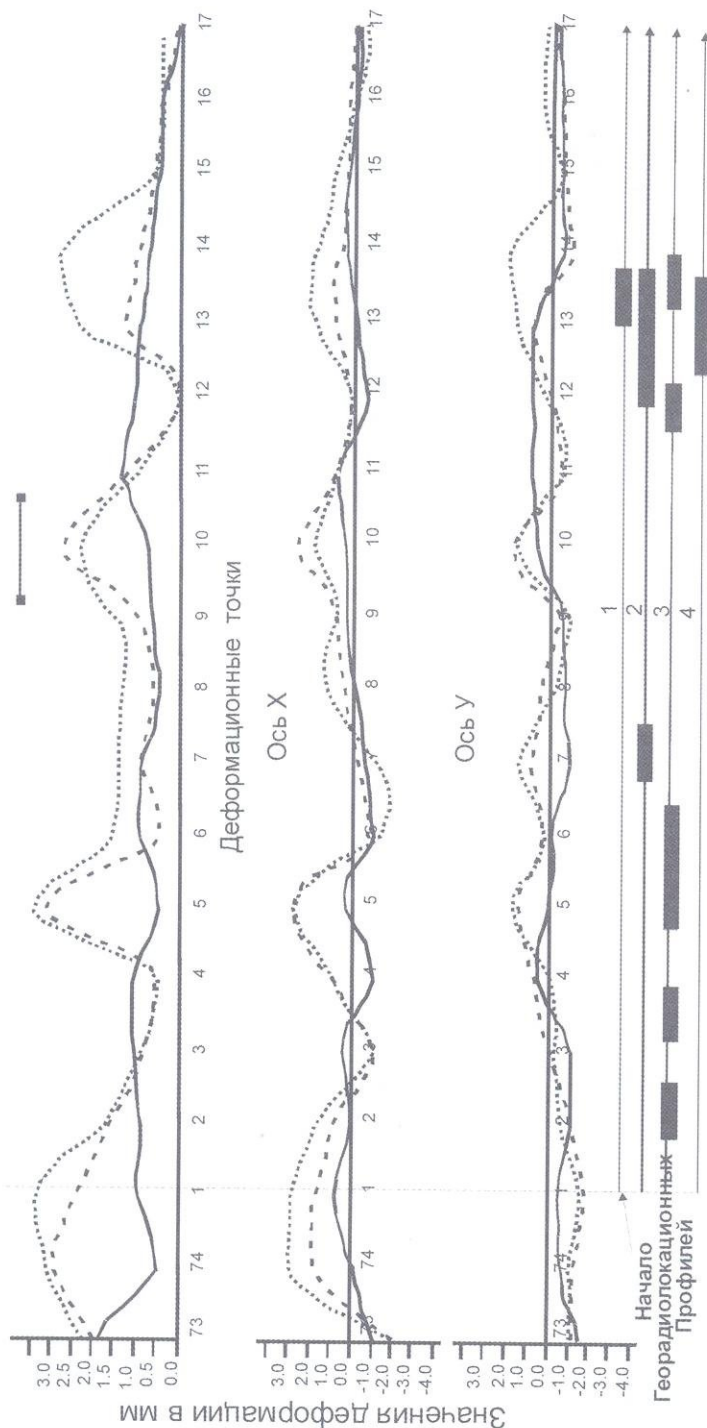
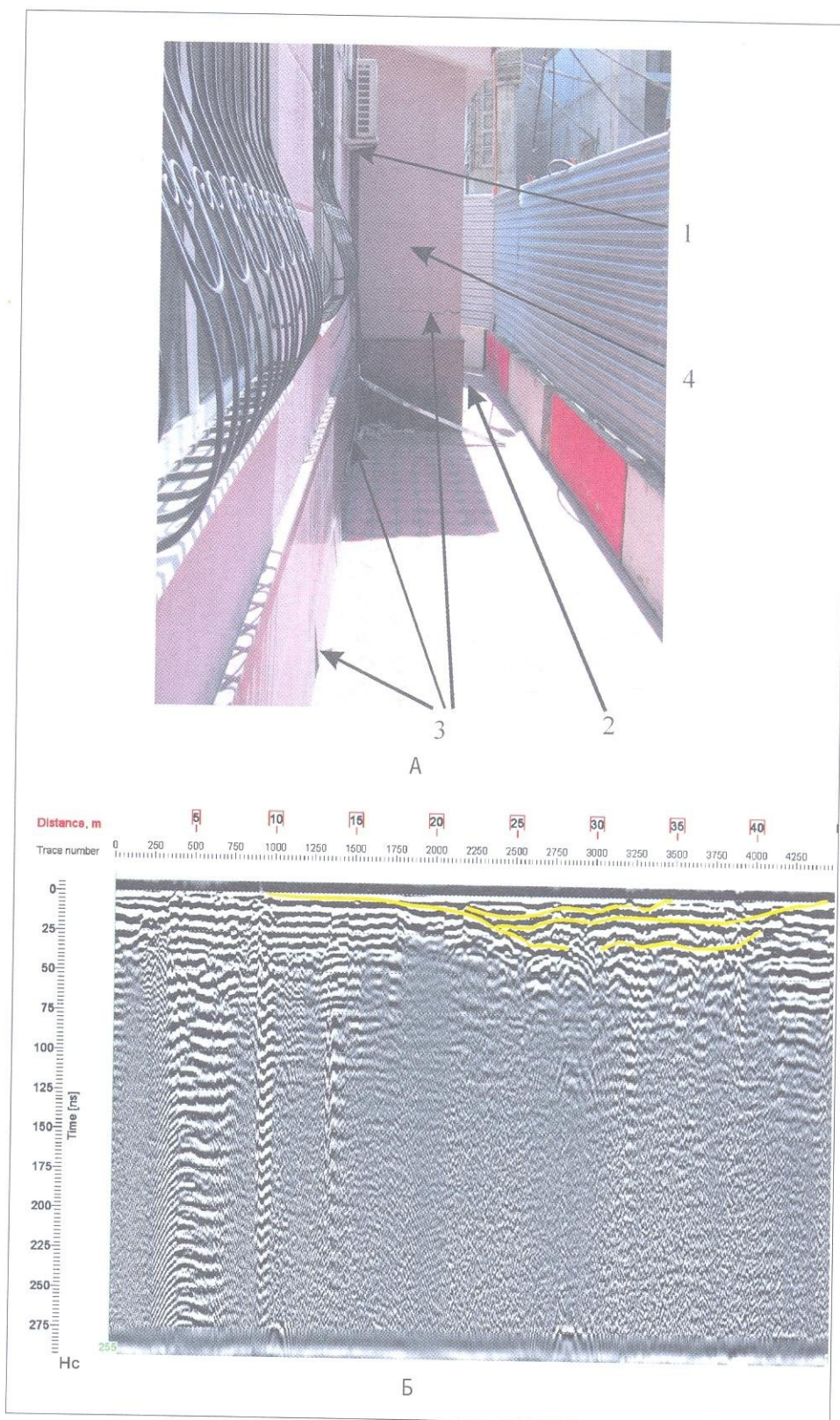


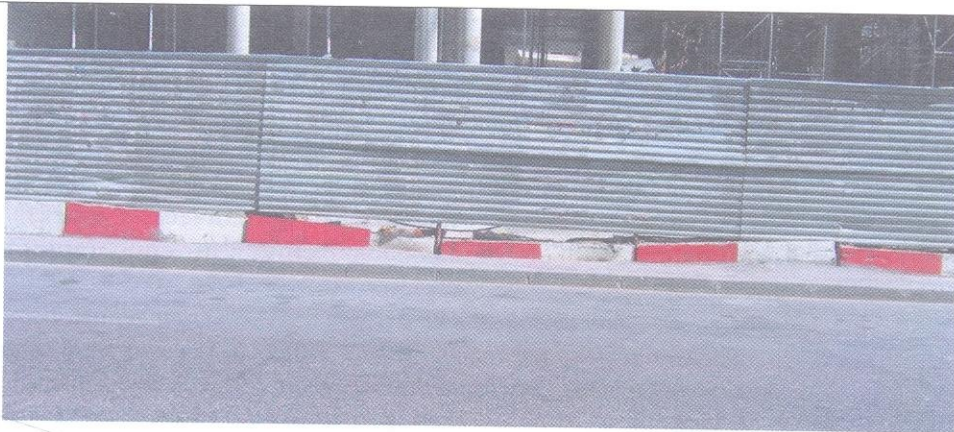
РИС. 13.26. Модуль плановых смещений реперов, расположенных на фасаде дома и положение зон локального увлажнения по данным георадиолокации.

Цель исследований — выяснение причины появления трещин на стенах здания. Измерения смещений по осям X и Y проводились в три этапа с интервалом 8 дней. Вдоль фасада дома было пройдено 4 георадиолокационных профиля, по которым были выделены зоны локального увлажнения (показаны на рисунке черными прямоугольниками). Наличие увлажненных грунтов подтверждается значительным понижением значений скорости распространения электромагнитных волн на этих участках. По результатам нивелировок в горизонтальной плоскости было выделено три участка с повышенными значениями деформаций: первый (пикеты 1–6) и третий (пикеты 12–14) пространственно совпадают с зонами повышенного увлажнения, которые обусловлены протечками в теплотрассах. Вторым участком, который находится между пикетами 9 и 11, приурочен к зоне сочленения двух конструктивных элементов здания. Таким образом, на наш взгляд имеется два фактора, которые могут быть причиной образования трещин на стенах здания: первый — развитие суффозии вследствие протечек теплотрасс и второй — деформации, связанные с конструктивными особенностями здания. Следует также отметить, что строительство нового объекта, с которым увязывали появление трещин, было справа, т.е. там, где деформации минимальны. Использовалась антенна 300 МГц, георадар «Зонд 12»

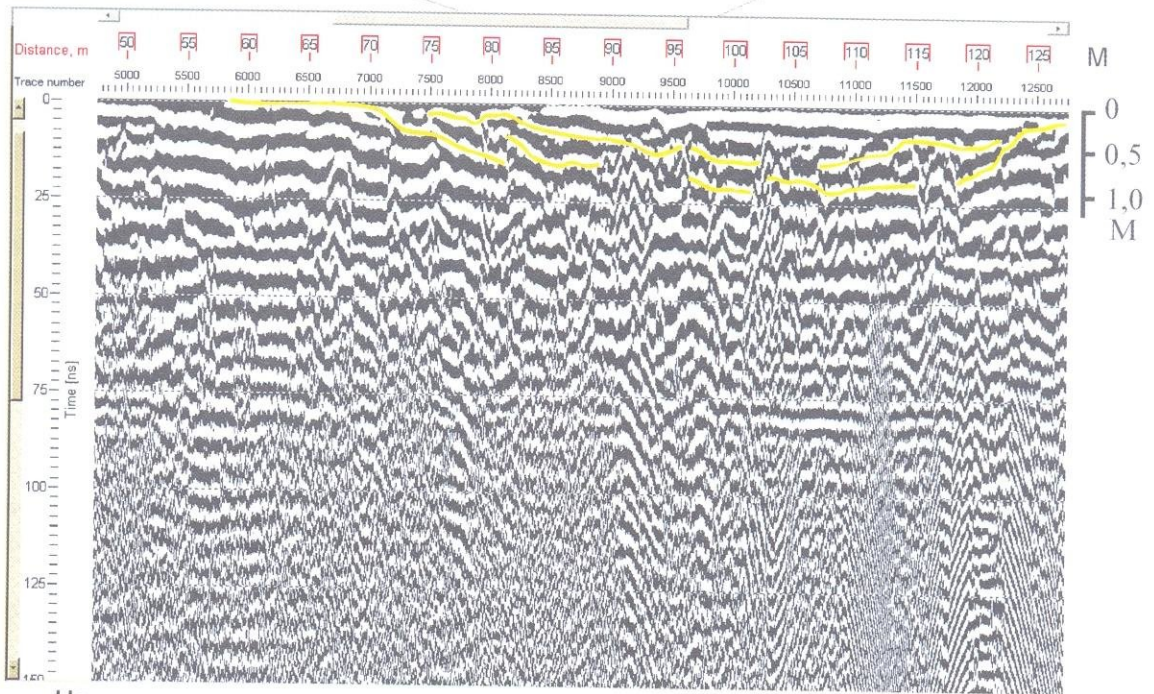
РИС. 13.27. На фото (А) показаны трещины на стенах здания и положение георадиолокационного профиля.

1 — трещина отрыва вентиляционной шахты (4) от стены здания (около 15 см); 2 — положение георадиолокационного профиля, представленного на рис. 13.27 Б; 3 — трещины в гранитной облицовке и на стене вентиляционной шахты; 4 — вентиляционная шахта. Цель исследований — выяснение причин образования трещин отрыва отдельных конструкций от стены здания, образования трещин на стене и ее облицовке и причин проседания асфальта. Рядом со стеной, на которой наблюдаются значительные деформации, находится котлован и строится новое здание (см. рисунок). Георадиолокационные профили располагались вокруг здания, в том числе несколько профилей было выполнено между стеной здания и котлованом. Известно, что в начале строительства нового здания произошло обрушение стенки котлована напротив старого здания. Затем, после строительства отпорной стенки котлована образовавшийся провал глубиной около 1,5 м был засыпан, что отчетливо видно на георадарограмме. Неравномерное проседание грунта, которым был засыпан провал, вероятно, и явилось причиной деформаций стен старого здания. Использовалась антенна 300 МГц, георадар «Зонд 12»





А



Бс

Б

РИС. 13.28. Фото участка проседания ограждения строящегося здания (А) и фрагмент георадиолокационного профиля, выполненного по тротуару вдоль ограждения (Б).

На профиле выделяется неглубокая впадина (0,8–1,0 м), которая была засыпана до возведения ограждения. Цель исследований — выяснение причин проседания асфальта на этом участке. Пространственное совпадение зоны проседания и засыпанного понижения позволяет высказать предположение о том, что причиной проседания является уплотнение грунта, использованного для засыпки. Так как нижележащие толщи залегают субгоризонтально, то высказанное предположение является наиболее предпочтительным. Использовалась антенна 300 МГц, георадар «Зонд 12»

Исходя из опыта георадиолокационных исследований и анализа приведенных материалов по обследованию железобетонных конструкций можно утверждать, что данный метод в большинстве случаев позволяет весьма эффективно решать задачи по изучению разнообразных конструкций — определению арматурного каркаса, толщин отдельных слоев, выявлять наличие трещин и пустот, проводить заверку выполненных работ и т.д. Следует отметить два методических аспекта при проведении георадиолокационных наблюдений и интерпретации полученных материалов:

- 1. Наиболее качественные данные получены при использовании высокочастотных антенн (более 1 ГГц). Для выяснения отдельных элементов строения конструкций большое значение имеет анализ осей синфазности дифрагированных волн (их наличие или отсутствие, расстояния между вершинами гипербола и глубина их расположения и т.д.);*
- 2. Определение свойств материала конструкций представляется крайне сложной задачей ввиду отсутствия достоверных корреляционных зависимостей между диэлектрической проницаемостью или скоростью распространения электромагнитных волн, т.е. теми параметрами, которые можно оценить по материалам георадиолокации, и прочностными характеристиками материала собственно конструкций. Однако некоторые данные позволяют на качественном уровне выделять части конструкций, отличающиеся друг от друга. Для выяснения причин этих отличий необходимо привлечение других методов. Так как во многих случаях толщина строительных элементов априори известна, особенно для выпускаемых промышленным способом, то на временных разрезах оси синфазности отраженных волн (например, от основания плиты перекрытия между этажами) должны быть субгоризонтальны. Иными словами скорость распространения волн, если влажность и внутреннее строение элемента конструкции одинаковы, должна быть в целом неизменна. В действительности на разрезах довольно часто отмечается сложная форма осей синфазности, которая свидетельствует о различном состоянии материала конструкции, т.е. о значительных латеральных изменениях скорости. Эти вариации скорости можно объяснить либо изменением влажности, либо изменением свойств железобетона. Часто для выяснения этого вопроса достаточно визуального обследования объекта, но для получения каких либо количественных значений свойств необходимо бурение с дальнейшими лабораторными испытаниями образцов. Примеры записи таких участков показаны на рис. 13.7, 13.9 и 13.18.*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автор книги выражает надежду, что она будет полезной для специалистов-геофизиков широкого профиля, желающих добавить в свой арсенал еще один действенный и перспективный инструмент, а также для студентов и магистрантов, осваивающих еще один геофизический метод изучения окружающей среды.

Необходимо еще раз отметить, что при описании и анализе результатов георадиолокационных исследований в различных областях, неоднократно отмечалось, что некоторые особенности волновых картин, которые, на наш взгляд, позволяют в целом решать поставленные задачи, не находят своего физического объяснения. 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 неоднородных 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.

Автор выражает 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. Введение в георадиолокацию. 2005, Изд-во МГУ, с. 153.
4. Владов М.Л., Старовойтов А.В., Калашников А.Ю. Основные типы деформаций в железнодорожных насыпях по данным георадиолокационного профилирования. Разведка и охрана недр, 2006, №12, с. 14-17.
5. Владов М.Л., Старовойтов А.В., Калашников А.Ю. Георадиолокационные исследования на пресноводных акваториях. М., Инженерная геология, март 2007, с. 47-52.
6. Вознесенский Е.А. Поведение грунтов при динамических нагрузках. М., Изд-во МГУ, 1997, с. 288.
7. Вопросы подповерхностной радиолокации. Под. редакцией А.Ю. Гринева, 2005, М., Изд-во «Радиотехника», с. 416.
8. Гуменский Б. М. Основы инженерной геологии для строителей железных дорог. Л., Недра, 1969, 383.
9. Ефимова Н.Н. Применение георадиолокации при решении задач инженерной геофизики. Автореферат дисс. канд. техн. наук, 1999, СПб, с. 16.
10. Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны. 1999, Изд-во МГУ, с. 244.
11. 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.
12. Калинин А.В., Владов М.Л., Шалаева Н.В. Оценка глубинности георадиолокационных исследований на основе классической теории. Вестник МГУ, сер. Геология, №3, 2003
13. Кири П., Брукс М. Введение в геофизическую разведку. Москва, «Мир», 1988, с. 384.

14. Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. М., Научный мир, 2006, с. 392.
15. Москва. Геология и город. Под ред. В.И. Осипова и О.П. Медве-
дева, М., 1997, с. 400.
16. Омеляненко А.В. Георадиолокация мерзлых рыхлых отложений.
Автореферат дисс. канд. техн. наук, М., 1989, с. 17.
17. Пархоменко Э. И. Электрические свойства горных пород. М.,
Наука, 1965.
18. Петровский А.Д. Радиоволновые методы в подземной геофизике.
Изд. второе, дополненное. М., ЦНИГРИ, 2001, с. 290.
19. Рекомендации по определению физико-механических свойств
мерзлых дисперсных грунтов геофизическими методами. ПНИИС
Госстроя СССР, 1989, М., с. 55.
20. Сейсмическая стратиграфия. Под ред. Ч.Пейтона., 1982, т. 1, М.,
«Мир», с. 373.
21. Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А, Голодков-
ская Г.А., Васильчук Ю.К., Зиангиров Р.С. Грунтоведение. 2005, Изд-во
МГУ, с. 1024.
22. Старовойтов А.В., Владов М.Л. Интерпретация данных геора-
диолокационных наблюдений. Разведка и охрана недр, 2001, №3,
с. 11-14.
23. Талалов А.Д., Даев Д.С. О структурном механизме частотной дис-
персии электрических свойств гетерогенных горных пород. Физика Зем-
ли, №8, 1996, с. 56-66.
24. Технические указания по инструментальной диагностике земля-
ного полотна. М., МПС РФ, 2000, с. 62.
25. Финкельштейн М.И., Мендельсон В.А., Кутев В.А. Радиолокация
слоистых земных покровов. М., Сов. Радио, 1977, 176 с.
26. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. Применение ра-
диолокационного подповерхностного зондирования в инженерной гео-
логии. М., Недра, 1986, 128 с.
27. Финкельштейн М.И., Карпухин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н.
Подповерхностная радиолокация. М., Радио и Связь, 1994, 216 с.
28. Фролов В.Т. Литология. 1995, Изд-во МГУ, т.3, с. 352.
29. Фролов А.Д., Электрические и упругие свойства мерзлых пород и
льдов. 1998, Пушино, с. 514.
30. Хаттон и др. Обработка сейсмических данных. М., Мир, 1990,
с. 215.
31. Хрусталеv Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне. М., Изд-во
МГУ, 2005, с. 541.

32. Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка. 1 и 2 том. М., Мир, 1987, с. 429 (1 т.), с. 381 (2 т.).
33. Цыганок В.С. Применение метода георадиолокации и электроконтактного динамического зондирования при обследовании земляного полотна и искусственных сооружений на латвийской железной дороге. Тезисы докладов 4-ой международной научно-практической конференции «Георадар-2004», М., МГУ, с. 47-48.
34. Явна В.А., Грицык В.И., Ковдус В.В., Шаповалов В.Л., Окост М.В. Георадиолокационные исследования объектов железнодорожного пути. Тезисы докладов 4-ой международной научно-практической конференции «Георадар-2004», М., МГУ, с. 83-84.
35. Annan A.P., Davis J.L. Impuls radar sounding in permafrost. *Radio Science*, 1976, vol. 11, №4, pp. 383-394.
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. 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.
41. 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.
42. Ground Penetrating Radar in Sediments. Edited by C.S. Bristow and H.M. Jol. Geological Society Special Publication 211, London, 2003, p. 330.
43. 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 Penetration Radar (GPR'96), Sendai, Japan, p. 439-443.
44. 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).

45. Hoekstra P., Deloney A. Dielectric properties of soil at UHF and microwave frequencies. *Journal of Geophysical Research*, v.79, N11, 1974, pp. 1699-1708.

46. Houck R.T. Measuring Moisture Content Profiles Using Ground—Penetrating Radar. NWWA/EPA conf. 1984, San-Antonio, Texas, Feb. 7-9, pp. 637-653.

47. Kathage A., Niessen J., White G., Bell N. "Fast Inspection of Railway Ballast by Means of Impulse GPR Equipped with Horn Antennas". *NDT.net.Sep2005.vol.10, №9*.

48. Manacorda G., Morandi D., Sarri A. "A customized GPR system for railroad tracks verification". International conference on ground penetrating radar, №9, ETATS-UNIS, 2002.

49. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. "The Rock Physics Handbook", Cambridge University Press, 1998

50. Neidell N.S., Poggiagliolmi F. Stratigraphic modeling and interpretation; in *Seismic Stratigraphy — Applications to Hydrocarbon Exploration* (ed. C.E. Payton), 1977, Tulsa, AAPG Memoir 26, pp. 389-416.

51. Pipan M., Baradello L., Forte E., Prizzon A. GPR study of bedding planes, fractures and cavities in limestone.

52. 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.

53. Sasahara K., Tsuchida T., Kobayashi T., Fenner T. J. An Investigation of Cracks in Rock Slope Using Ground Penetrating Radar. *Proc. of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, 1995, Orlando, Florida, p. 149-158.

54. Sheriff R. E. *A First Course in Geophysical Exploration and Interpretation*. IHRDC, Boston, 1987.

55. Toth T. High resolution geophysics provides optimal results on inland waterways. *First Break*, 2004, vol. 22, pp. 45-51.

56. 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.