

ГСД Продакшен

GDS Production

**МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО
ПО ПРОВЕДЕНИЮ
ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Авторы:

Владов М.Л.

Золотарев В.П.

Старовойтов А.В.

МОСКВА 1997

Оглавление.

	стр.
Введение.....	4
1. Физические основы метода георадиолокации.....	4
1.1. Электрофизические свойства горных пород.....	6
1.2. Отражение, преломление, дифракция и затухание электромагнитных волн в реальных средах	13
1.3. Сверточная модель трассы, понятие частотной характеристики среды и частотного спектра сигналов...	16
2. Круг задач, решаемых с помощью георадара.....	19
2.1. Геологические, инженерно-геологические и гидрогеологические задачи.....	19
2.2. Поиск локальных объектов, обследование инженерных сооружений, нарушение штатной ситуации.....	20
3. Аппаратура для георадиолокационных исследований.....	20
4. Методика работ.....	23
4.1. Глубинность, разрешающая способность и детальность георадарных исследований.....	23
4.2. Наблюдения на постоянной и переменной базах.....	25
4.3. Проектирование методики наблюдений.....	25
4.4. Волновая картина и способы ее изображения, оси синфазности, годографы.....	28
5. Обработка данных.....	34
5.1. Ввод-вывод данных.. Формат записи.....	35
5.2. Просмотр и редактирование данных.....	36
5.3. Коррекция амплитуд.....	37
5.4. Линейная обработка сигналов (фильтрация).....	40
5.5. Повышение разрешающей способности (деконволюция).....	42
5.6. Восстановление местоположения и формы локальных объектов (миграция).....	45
5.7. Определение скорости распространения волн.....	48
5.8. Ввод статических поправок.....	49
5.9. Преобразование Гильберта (огibaющая, фаза, частота).....	50
5.10. Пикирование границ и объектов.....	53
5.11. Печать радарограмм.....	54
5.12. Примерные последовательности обработки при решении некоторых задач.....	55
6. Интерпретация георадиолокационных данных.....	57
6.1. Выделение однократных отражений.....	59
6.2. Выделение комплексов отложений.	
Несогласия.....	60
6.3. Понятие фации. Разделение комплексов на фации.....	62

6.4. Выделение локальных объектов геологической природы и техногенного происхождения.....	65
6.5. Геологическая интерпретация радарограмм.....	66
Заключение.....	73
Список литературы.....	74

Введение.

Данное методическое руководство предназначено для ознакомления с методом георадиолокационных подповерхностных исследований при решении широкого круга инженерно-геологических, гидро-геологических, геоэкологических и других задач, связанных с изучением строения приповерхностной части геологической среды до глубин порядка 10 - 15 метров. С помощью этого руководства можно научиться работать с современными приборами - георадарами, разрабатывать методики полевых исследований, проводить обработку полевого материала и его интерпретацию. Тем не менее, данное руководство не является единственно необходимым для пользователя, ранее незнакомого с описываемым методом. Необходимыми составными частями настольной документации пользователя являются руководство по работе с конкретным георадаром и руководство по работе с конкретной системой обработки данных.

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

Руководство рассчитано на специалистов, знакомых с теорией распространения волн, основами геологии и геофизических методов изучения разреза, цифровой обработки сигналов.

1. Физические основы метода георадиолокации [1 - 5, 7 - 12, 14, 16, 18, 19, 22, 24].

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

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

1.1 Электрофизические свойства горных пород.

Наиболее важными параметрами, характеризующими возможности применения метода георадиолокации в различных средах, являются удельное затухание и скорость распространения электромагнитных волн в среде, которые определяются ее электрическими

свойствами. Первый из них определяет глубинность зондирования используемого георадара, знание второго параметра необходимо для пересчета временной задержки отраженного импульса в глубину до отражающей границы.

Практически все вещества, кроме чистого металла, могут быть отнесены к классу диэлектриков с конечной проводимостью. В связи с этим вводится комплексная относительная (относительно вакуума, где диэлектрическая проницаемость равна ϵ_0) диэлектрическая проницаемость $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$, где ϵ - комплексная относительная проницаемость, ϵ' - действительная часть, связанная с поляризацией диэлектрика под действием приложенного поля, а ϵ'' - мнимая часть, связанная с конечной проводимостью диэлектрика (в Ом/м): $\sigma = \omega\epsilon''\epsilon_0$, где ω - частота приложенного электромагнитного поля.

Диэлектрические потери характеризуются тангенсом угла - отношением мнимой и действительной частей относительной диэлектрической проницаемости: $\operatorname{tg}\delta = \epsilon'' / \epsilon' = \sigma / \omega\epsilon'\epsilon_0$;

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

Скорость распространения электромагнитной волны в диэлектрике зависит от его диэлектрической и магнитной проницаемостей, однако, для большинства горных пород значение магнитной проницаемости близко к 1 и не зависит от частоты поля. С учетом этого, фазовая скорость распространения волны будет: $V = c / \operatorname{Re} \sqrt{\epsilon} = c / \sqrt{\epsilon'}$, где c - скорость распространения электромагнитных волн в вакууме. Это одно из наиболее важных для радарных исследований соотношение, поскольку V - измеряемая величина, а ϵ' - свойство вещества.

При этом коэффициент затухания будет $\alpha = (\omega / c) \operatorname{Im} \sqrt{\epsilon}$;

Длина волны в среде будет равна $\lambda = c / \omega \sqrt{\epsilon'}$; Отсюда удельное затухание, то есть затухание волны на единицу длины пути в децибелах на метр (дБ/м) будет $\tilde{A} = (54,6 / \lambda) \operatorname{Im} \sqrt{\epsilon}$. Для практического использования эту формулу с погрешностью менее 1% разбивают на две - для случаев с малыми диэлектрическими потерями $\operatorname{tg}\delta < 0.3$ и с большими диэлектрическими потерями.

В первом случае $\tilde{A} = (27,3 / \lambda) \sqrt{\varepsilon' \operatorname{tg} \delta}$, а во втором случае $\tilde{A} = (38,6 / \lambda) \sqrt{\varepsilon' \operatorname{tg} \delta}$.

В наиболее практически важном случае малых потерь после соответствующих преобразований формула для оценки удельного затухания электромагнитной волны в среде может быть записана в виде: $\bar{A} = 1637 / (\rho_{\omega} \sqrt{\varepsilon'})$; где ρ_{ω} - удельное сопротивление в Ом.м на центральной частоте спектра зондирующего импульса.

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

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

Для осадочных пород в широком диапазоне изменения влажности 3 - 45 % : $\varepsilon' = 3.03 + 9.3W_{\text{об}} + 146W_{\text{об}}^2 - 76,7W_{\text{об}}^3$, где $W_{\text{об}}$ - объемная влажность $W_{\text{об}} = \gamma / 100$ и γ - плотность сухой породы в г/см³.

Для сред с большой влажностью получена зависимость:

$$\varepsilon' = 720 / (180 - W);$$

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

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

В таблице 1 представлены интервалы изменения данных по удельному сопротивлению грунтов на постоянном токе и данные по относительной диэлектрической проницаемости в метровом диапазоне волн.

Опыт отечественных и зарубежных работ показал, что интервал частот 50 - 100 мегагерц (интервал длин волн 6- 3 метра в воздухе) является оптимальным при выборе компромисса между приемлемой

глубинностью и достаточно высокой разрешающей способностью для послойной дифференциации верхней части разреза до глубин 10 - 15 метров.

На самом деле лабораторные измерения удельных сопротивлений пород ограничены в области низких частот диапазоном 0 - 100 Гц, но, учитывая плавный характер зависимости удельного сопротивления от частоты в этом диапазоне можно допустить приближенное равенство между лабораторными измерениями и полевыми исследованиями на постоянном токе. Можно представить таблицу 2 для приведения данных по удельному сопротивлению пород на постоянном токе к значениям для средней частоты зондирования пород в 75 МГц.

Таблица 1.

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

Тип породы	естественной влажности				водонасыщенные			
	ρ ,Омм				ρ ,Омм			
	0.1 - 0.4	0.5 - 0.8	1 - 3	ε'	0.1 - 0.4	0.5 - 0.8	1 – 3	ε'
	г/л	г/л	г/л		г/л	г/л	г/л	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Пески разнoзерн.	500-8000	150-2000	30-700	4-9	120-1200	40-400	10-100	16-25
Супеси	100-5000	40-160	10-50	6-16	60-500	20-70	8-20	16-25
Суглинки	60-2000	20-50	5-15	9-25	50-500	15-35	3-10	16-30
Глины	3-60	1-30	0.2-15	16-30	3-50	1-30	0.2-15	20-36
Валунно-галечниковые отложения с песчаным заполнителем	1200-50000	1500-20000	300-5000	4-9	600-3000	80-1500	20-1000	10-20
Валунно-галечниковые отложения с глинистым заполнителем	-	90- 500	20-150	6-16	-	70-300	15-80	10-25
Песчано-глинистые отложения с гравием, галькой и валунами	300-12000	90-3000	15-700	4-16	80-3000	25-800	7-250	10-25
Скальные породы невыветрелые	-	250-10 ⁸	-	3-6	-	-	-	-
Скальные породы выветрелые, Трещиноватые	-	30-400	-	-	-	-	-	-
Известняки крепкие плотные	-	100-10 ⁵	-	4-7	-	-	-	-
Доломиты крепкие плотные	-	50-10 ⁵	-	5-7	-	-	-	-
Мергели	-	20-500	-	20-30	-	-	-	-
Глинистые сланцы	-	5-5000	-	7-10	-	-	-	-

Таблица 2.

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

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

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

$$\bar{A} = 4911 / (\rho_{\text{const.}} \sqrt{\varepsilon'});$$

Пример.

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

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

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

Весь диапазон изменения диэлектрической проницаемости составляет $\varepsilon' = 5 - 60$.

Воздух	1.
Вода	81.
Лед	3 - 4.

Таким образом:

- основным признаком для расчленения толщи искусственных или естественных слоев является их контраст по диэлектрической проницаемости;

- для решения инженерных задач необходимо установить связи между диэлектрической проницаемостью и требуемыми характеристиками вещества - влагонасыщенностью, литологией, агрегатным состоянием и т.д., что может быть сделано в каждом конкретном случае с помощью параметрических наблюдений, скважин, лабораторных измерений и т.п.

Поскольку при положительной температуре максимальный контраст в диэлектрических проницаемостях между воздухом (1) и водой (81), их соотношение в породе и будет в основном определять диэлектрическую проницаемость слоя. Не влагонасыщенные, сухие, монолитные, слаботрещиноватые породы будут иметь низкие значения диэлектрической проницаемости, а влагонасыщенные, проницаемые, пористые, трещиноватые породы будут иметь высокие значения диэлектрической проницаемости и низкие значения скорости распространения электромагнитных волн.

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

Распространение электромагнитных волн метрового диапазона, характерного для георадарных исследований, рассматривается в рамках законов геометрической оптики соответственно для плоских волн на больших удалениях от источника и для сферических волн на малых удалениях от источника. Предполагается, что в рамках допустимых погрешностей в определении скоростей распространения и амплитуд волн действуют принципы Ферма, Гюйгенса, Френеля и закон Снеллиуса. Предполагается, что в изотропной среде луч перпендикулярен фронту волны и возможны геометрические построения путей волн в среде с последующим вычислением параметров среды по измеренным кинематическим и динамическим характеристикам записей волн (радарограмм) практически так же, как это делается в сейсморазведке.

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

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

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

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

При двукратном прохождении через границу, например, при отражении от более глубокой границы суммарное уменьшение амплитуды сигнала будет равно коэффициенту прохождения в квадрате.

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

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

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

Последний фактор имеет значение на небольших удалениях от источника колебаний в первые длины волн, когда волну можно считать сферической и плотность потока энергии от источника убывает обратно пропорционально площади поверхности фронта, а амплитуда, соответственно, обратно пропорционально радиусу сферы или расстоянию до источника $K_{\text{расх.}} = 1/R$, где R - расстояние до источника. Для расчета уменьшения амплитуды отраженной волны за счет расхождения сферического фронта R будет равно удвоенной глубине отражающей границы.

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

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

$$Ah = A_0 \text{ Котр.} \left(\prod_1^n K_i^2 \text{ пр.} \right) \exp(-\bar{A} 2h)/2h,$$

где \bar{A} - удельное затухание в дБ/м; h - глубина до границы в метрах; Котр. - коэффициент отражения от границы на глубине h ; $\prod_1^n K_i^2 \text{ пр.}$

- произведение квадратов коэффициентов прохождения через промежуточные границы.

В рамках лучевой теории распространения волн в процессе отражения от плоской границы участвует на 90% (по энергии отраженной волны) площадка радиусом $r = \sqrt{h\lambda}$, где h - глубина до отражающей границы, а λ - длина волны. Этот факт чрезвычайно важен при оценке пространственной разрешающей способности георадарных исследований, что будет обсуждаться ниже в разделе “Методика работ”.

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

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

На рисунках 1.1 и 1.2 представлены примеры георадиолокационной трассы и ее модуля спектра.

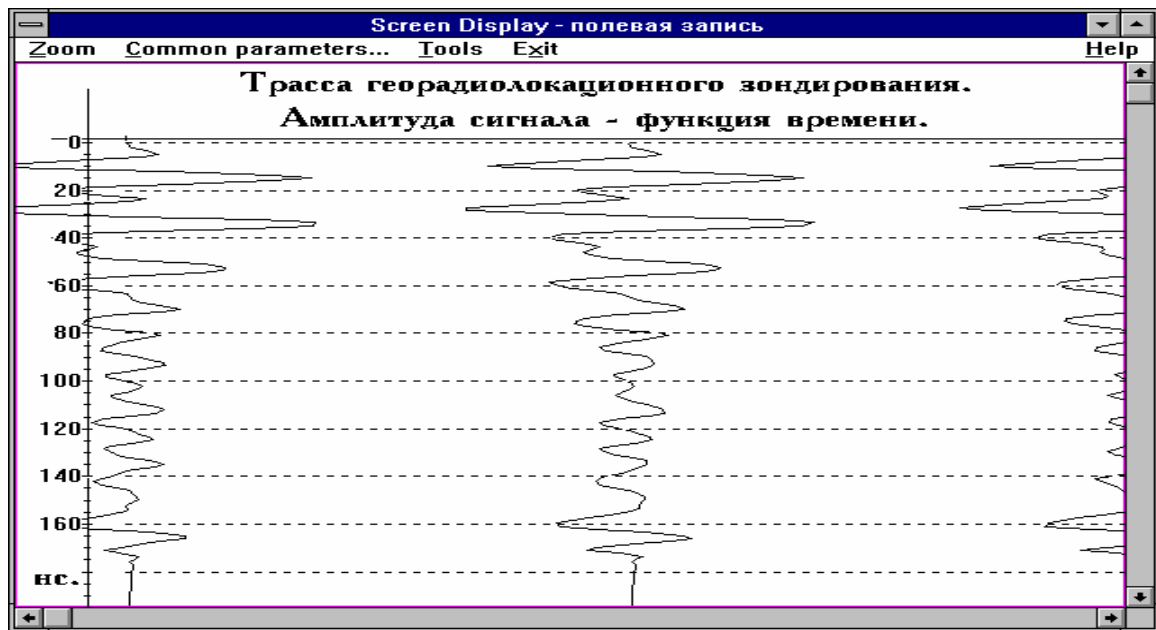


Рис. 1.1



Рис. 1.2

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

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

вой до правой к значению центральной частоты спектра - ширину спектра. На рисунках 1.3 и 1.4 представлены типичная форма зондирующего импульса и его амплитудно-частотный спектр.

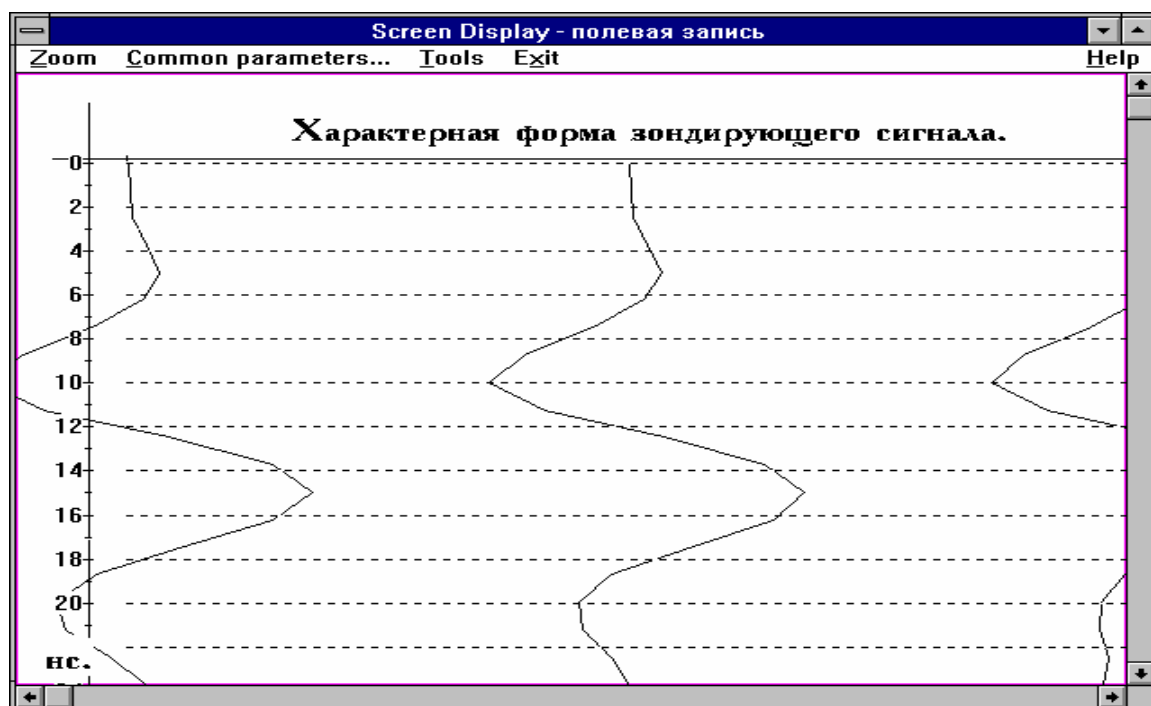


Рис. 1.3

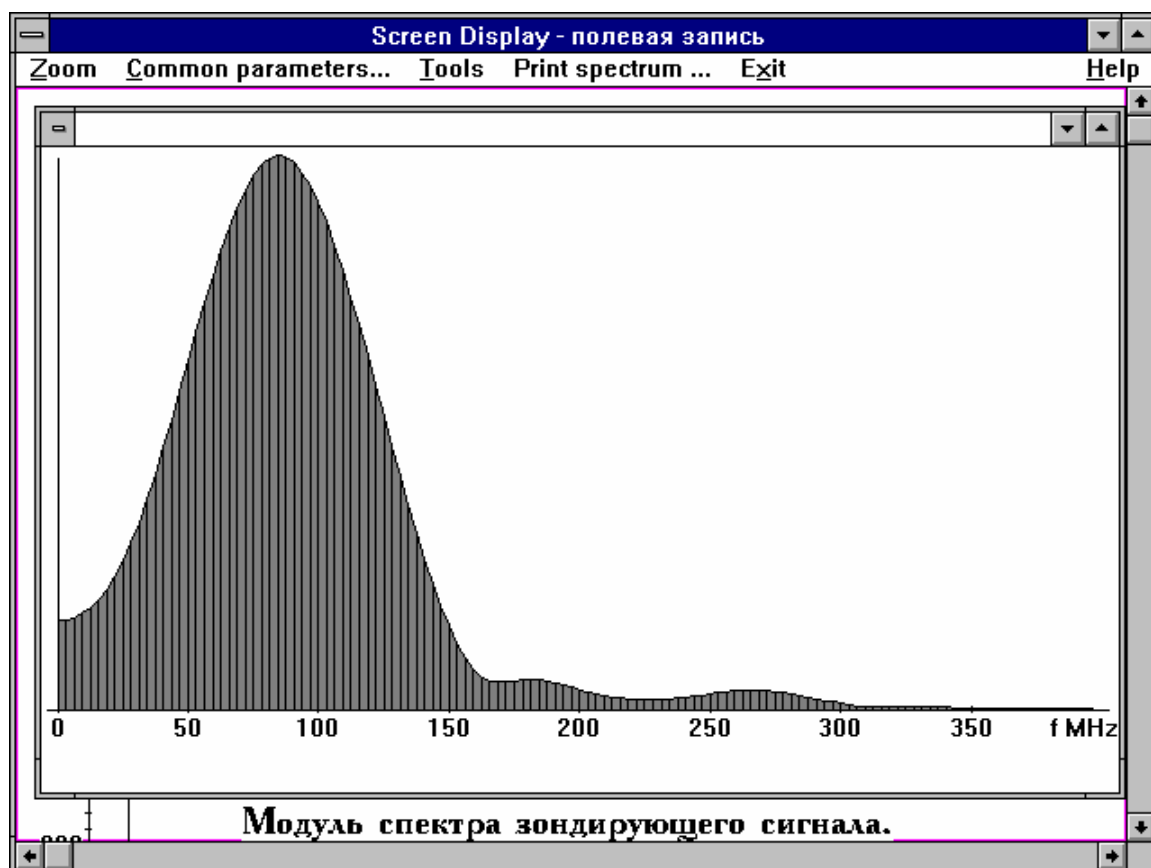


Рис. 1.4

2. Круг задач, решаемых с помощью георадара [1 - 10, 14, 26].

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

2.1 Геологические, инженерно-геологические и гидрогеологические задачи.

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

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

в) определение толщины ледяного покрова;

г) определение мощности водного слоя и картирование поддонных отложений;

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

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

а) трубопроводов;

б) кабелей;

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

г) погребенных отходов и захоронений;

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

е) границ распространения углеводородных загрязнений;

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

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

3. Аппаратура для георадиолокационных исследований [7, 9, 10, 17, 24].

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

Блок-схема комплекса аппаратуры георадиолокационного зондирования приведена на рисунке 2.1.

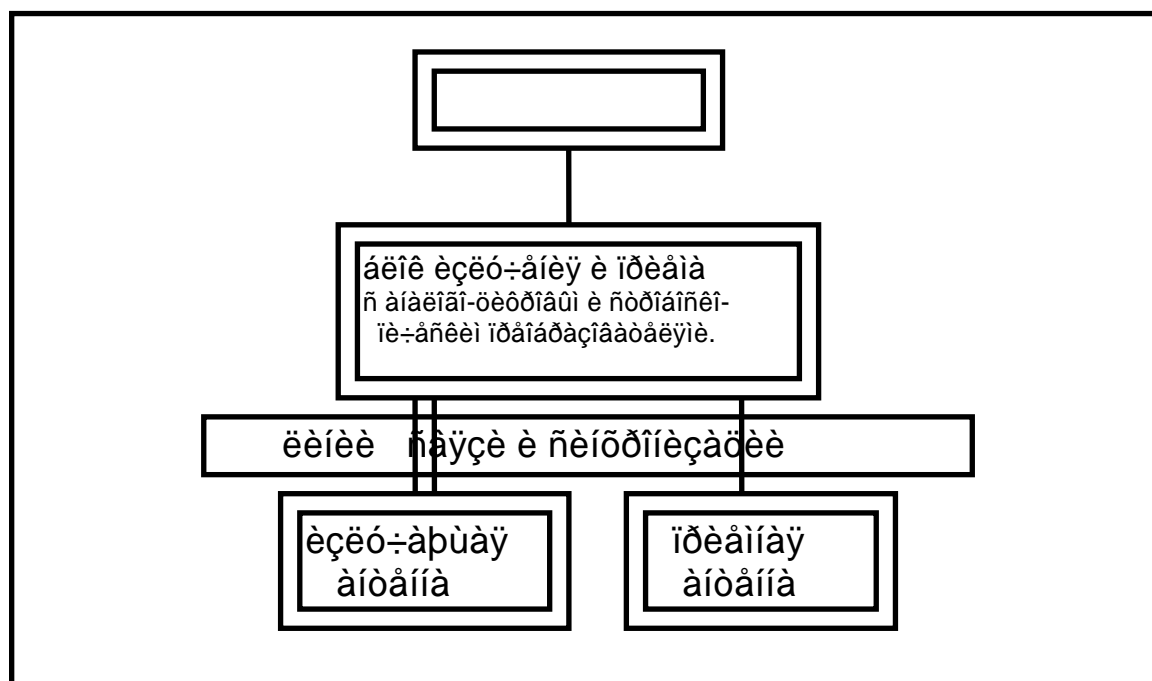
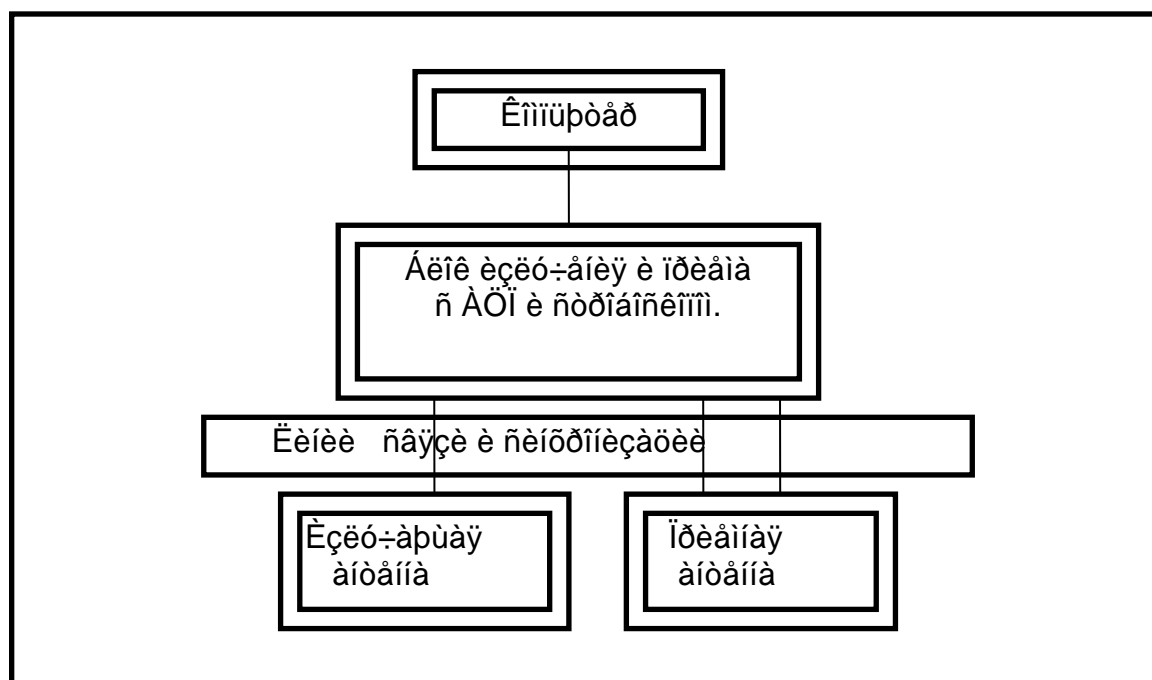


Рис. 2.1



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

В георадиолокационном приборостроении в настоящее время существуют две тенденции - построение многоцелевых приборов с набором антенн для исследований в общем диапазоне частот от 50 до 2500 МГц и создание узкоспециализированных аппаратов для решения конкретных задач, зато в больших объемах, более технологично и с большим успехом.

Ниже, в качестве примера приводятся характеристики многоцелевого прибора Зонд-12 (Фирма "Radar Inc." г.Рига, республика Латвия). При работе с прибором используется компьютер типа "notebook", математическое обеспечение сбора информации производства фирмы "Radar Inc." и система обработки производства "GSD Production" (кафедра сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета МГУ).

Технические характеристики прибора следующие:

- динамический диапазон 120 дБ;
- программируемое окно записи 50 - 2000 наносекунд;
- скорость сбора информации 14 трасс в секунду;
- рабочая температура от 0 до +40 градусов;
- размеры прибора 35х30х5.5 см.;
- масса прибора с батареями 3 кг.

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

25 - 150 МГц линейный размер от 2 до 6 м и вес от 2 до 7кГ в зависимости от настройки на конкретную центральную частоту;

300 МГц размером 98 х 52 х 4 см и весом 10 кГ;

500 МГц размером 69 х 32 х 4 см и весом 4 кГ;

900 МГц размером 43 х 22 х 4 см и весом 2 кГ;

1000 МГц размером 16 х 32 х 16 см и весом 1,2 кГ;

4.Методика работ [3, 5, 7, 9, 10, 12].

Под параметрами методики работ понимают:

1. Режим работы аппаратуры:

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

2.Способ перемещения источника и приемника по профилю:

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

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

4.1.Глубинность, разрешающая способность и детальность георадарных исследований.

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

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

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

Глубинность исследований тем больше, чем ниже центральная частота возбуждаемых электромагнитных колебаний, выше удельное сопротивление разреза и ниже удельное затухание, но при понижении частоты падает разрешающая способность - минимальная определяемая мощность слоя. В средних условиях (150 - 300 Ом.м) при частоте 50 - 100 МГц глубинность составляет в среднем 12 - 15 метров, а разрешающая способность при этом будет от 0,5 до 1 метра-это типичный вариант исследований для решения инженерно-геологических задач. Другой вариант - высокоразрешающие исследования при поиске неглубоко залегающих объектов или дефектоскопии сооружений. В этом случае используются частоты в 1000 МГц и выше для обеспечения разрешающей способности в первые

сантиметры, хотя при этом глубинность уменьшается до 0,5 - 2,0 метров.

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

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

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

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

4.2 Наблюдения на постоянной и переменной базах.

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

Второй способ состоит в последовательном увеличении разнуса между антеннами от десятков сантиметров до 5 - 10 метров. Цель таких наблюдений состоит в получении графика зависимости време-

ни прихода отраженных волн от расстояния (годографа) и получения с помощью последующей обработки сведений о скоростях распространения волн в среде. В случае специально подобранной серии таких профилей с перекрытием, результаты могут быть обработаны по известному в сейсморазведке методу общей глубинной точки (МОГТ), позволяющему определить скорости волн и пересчитать разрез из масштаба времен в масштаб глубин без привлечения априорной информации. Однако, из-за огромных затрат времени и средств на производство работ, такая методика применяется весьма редко в сравнении с профилированием на постоянной базе.

4.3. Проектирование методики наблюдений.

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

Сюда входят:

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

Далее, исходя из требуемой по условиям технического задания разрешающей способности или размеров обследуемого объекта, вы-

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

На основе этих расчетов производится выбор центральной частоты исследований и соответствующая антенная система для конкретного георадара, которая должна обеспечить запись полезного сигнала (соответствующей дифрагированной или отраженной волны) по крайней мере в пределах указанного в паспорте прибора динамического диапазона записи. Например, если расчеты показывают суммарное ослабление полезного сигнала в 100 децибел для данной центральной частоты сигнала, а паспортный динамический диапазон записи 80 Дб, то выбранная антенная система непригодна для решения задачи, хотя бы и обеспечивала требуемую разрешающую способность. В ряде случаев приходится жертвовать высокой разрешающей способностью георадиолокационных исследований для достижения требуемой глубинности и применять антенную систему с меньшей центральной частотой зондирующего сигнала и, соответственно, большей длиной волны.

Следующим этапом проектирования методики наблюдений является прокладка профилей и выбор скорости перемещения по профилю или шаг между точками наблюдений. При картировании протяженных границ профили прокладываются (если позволяет рельеф, застройка, другие препятствия) от скважины или шурфа в направлении другой скважины или шурфа или иных опорных пунктов определения параметров разреза. Нередко длина и положение профилей указаны в техзадании. При поиске и картировании протяженных объектов, длина которых много больше поперечных размеров, профили располагаются перпендикулярно объекту, например, трубопроводу. При поиске и картировании примерно изометричных в плане локальных объектов проектируется ряд параллельных профилей, покрывающий обследуемую площадь. Интервал между профилями при этом выбирается исходя из соображений частичного (например, до 50%) перекрытия зон Френеля (см. выше) для отражающих объектов.

Скорость движения по профилю или интервал между точками возбуждения и приема сигналов для обеспечения пространственного накопления сигналов выбираются исходя из 80-90% перекрытия зон Френеля. Например, при длине волны 1 метр, глубине целевой границы 4 метра радиус зоны Френеля равен 2 метрам. Перекрытие в

90% даст шаг наблюдений в 20 сантиметров вдоль профиля. При повторяемости актов “возбуждение-прием” 14 раз в секунду (Зонд 12) такую плотность наблюдений обеспечит скорость перемещения 2.8 метра в секунду. Если ввести суммирование, например по 4 трассы при записи для двукратного улучшения соотношения сигнал/шум, то скорость перемещения станет примерно равной медленному прогулочному шагу.

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

Временной интервал записи (развертка) должен по крайней мере превышать двойное время пробега до самого глубокого объекта исследований. Основанием для выбора интервала записи служат сведения о глубинах и предполагаемые или заранее известные значения скоростей распространения электромагнитных волн в среде.

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

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

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

Волновая картина (радарограмма) представляет собой ансамбль записей сигналов (трасс), пришедших к приемной антенне в интервал времени от 0 -момента посылки зондирующего импульса до конца интервала записи (развертки), выставленного оператором. Горизонтальная ось радарограммы - ось X, ось профиля в метрах. Начальные точки трасс располагаются на этой оси с тем шагом, с кото-

рым они были записаны на профиле. Вертикальная ось волновой картины - ось времени с началом $t=0$ - моментом посылки зондирующего импульса и концом t_{max} , соответствующим концу интервала записи (развертки). Различия в способах изображения волновой картины состоят в различном изображении амплитуды сигнала в каждый момент времени.

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

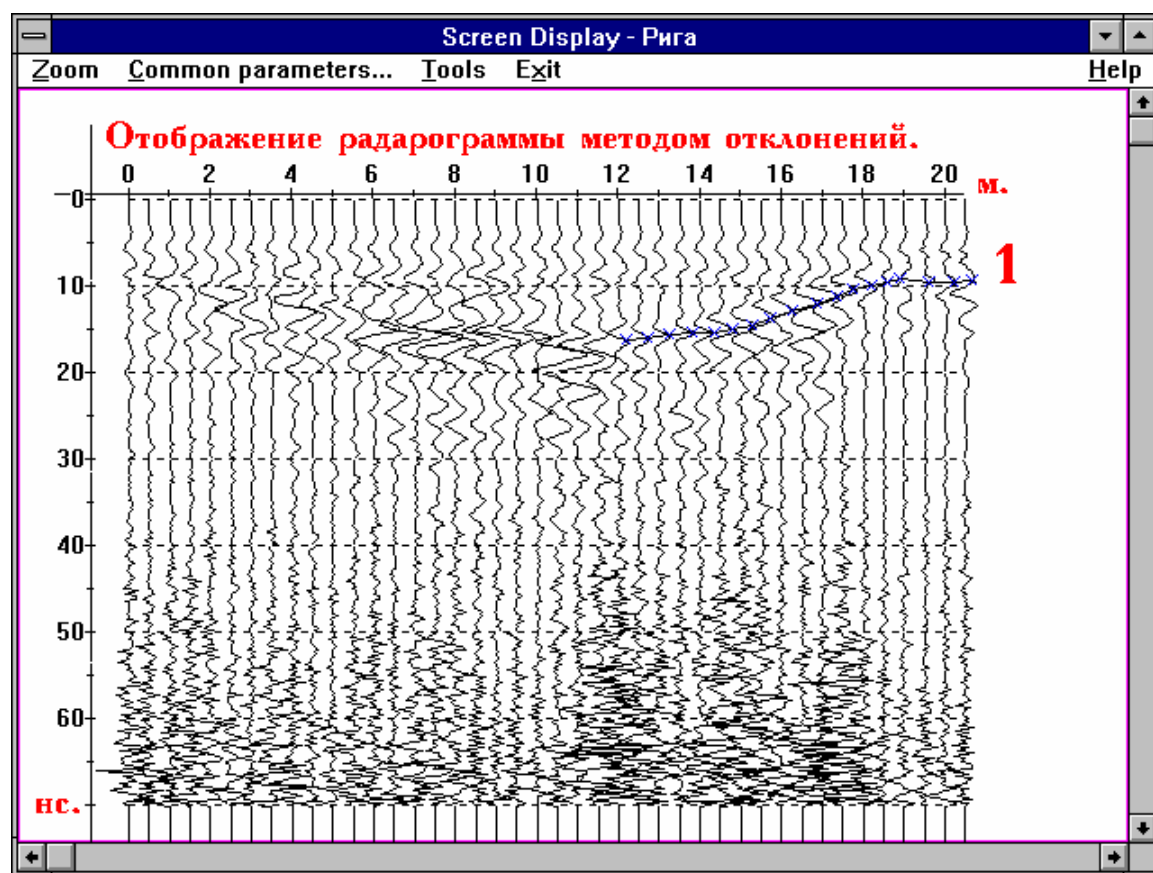


Рис.4.1 1 - пример прокоррелированной оси синфазности отраженной волны.

Второй способ- представление трассы методом отклонений с зачернением положительных амплитуд (отклонений вправо). Этот способ помогает выделять на соседних трассах одноименные фазы, например, положительные или отрицательные фазы импульсов, отразившихся от соседних участков границы (рис. 4.2).

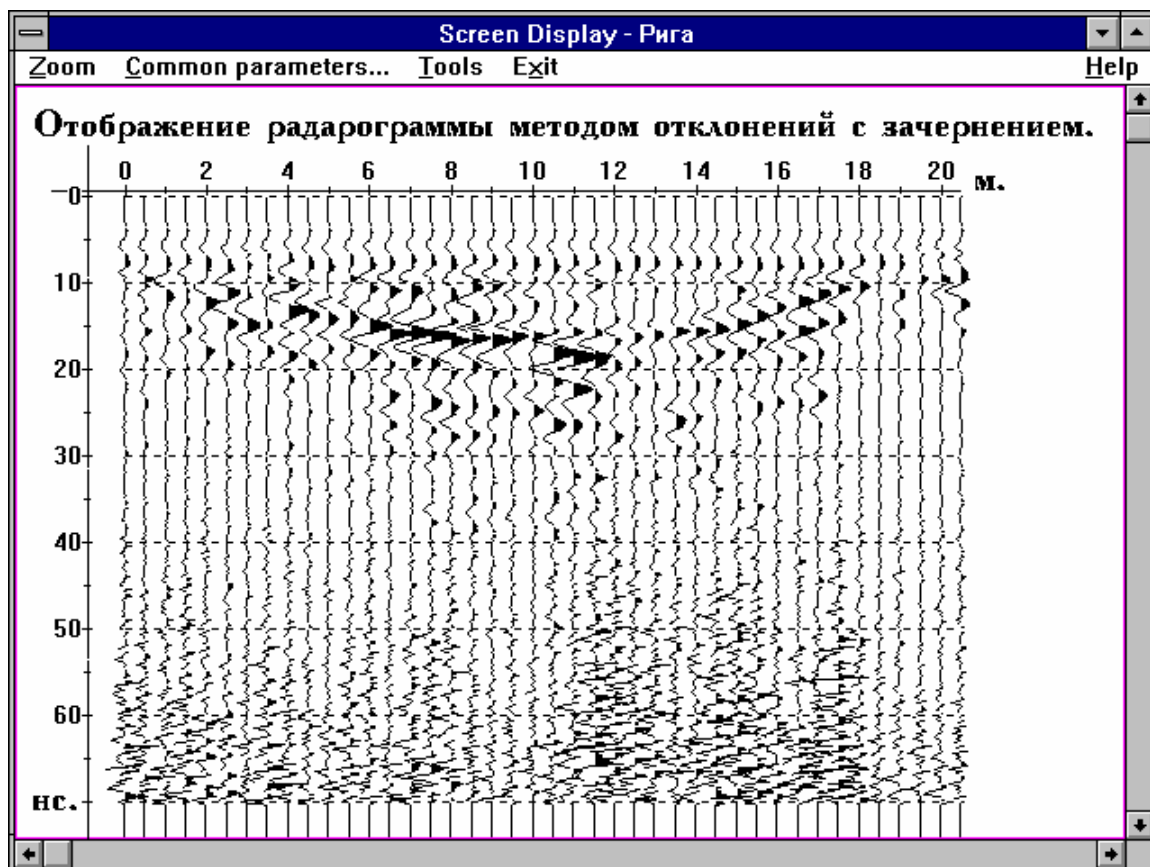


Рис. 4.2

Третий способ - изображение методом переменной плотности, то есть когда нулю амплитуды сигнала соответствует серый фон, положительным амплитудам соответствуют все более темные тона вплоть до черного, а отрицательным амплитудам сигнала соответствуют все более светлые тона вплоть до белого. В этом случае трасса на экране дисплея занимает вертикальную полосу шириной в одну точку и на экране (в зависимости от его типа) может быть размещено до 640 трасс (рис. 4.3).

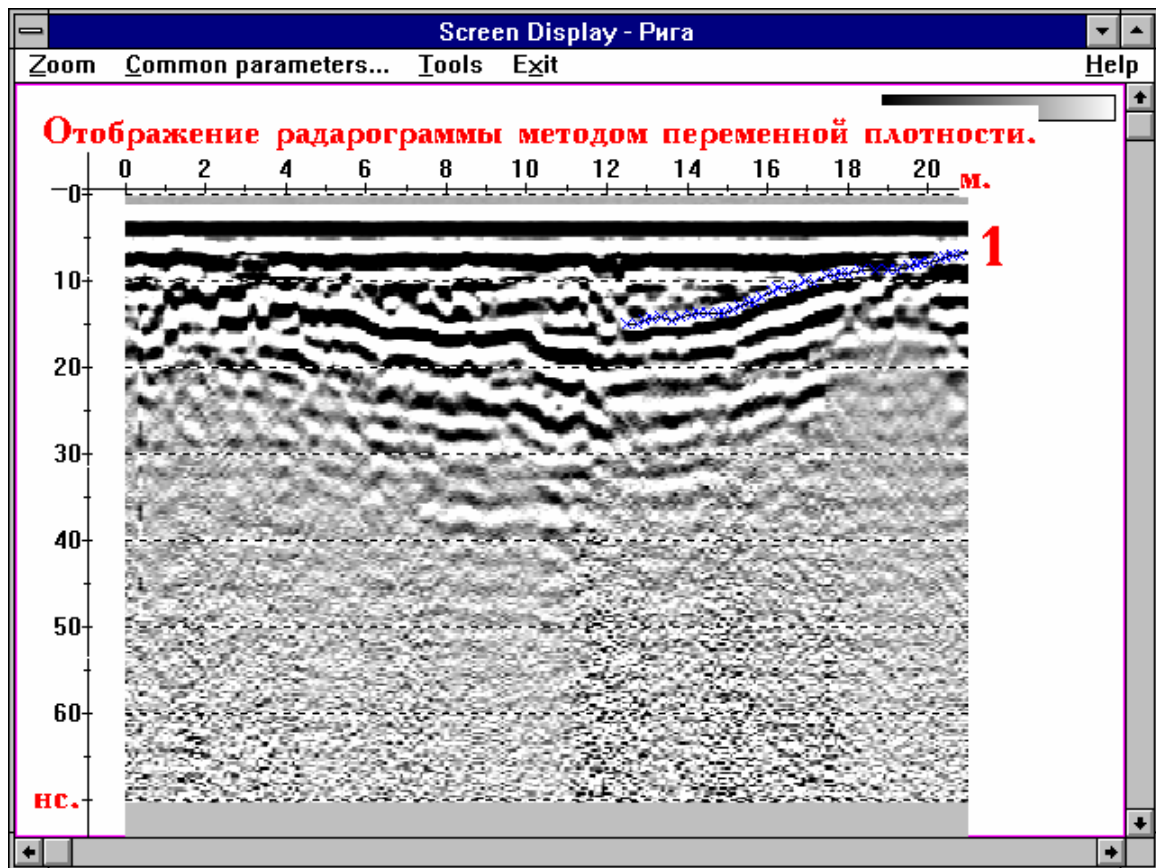


Рис. 4.3 1 - подчеркнута ось синфазности отраженной волны.

Ось синфазности - линия равных фаз одинаковых сигналов на соседних трассах. Например, линия, соединяющая максимумы отраженной от границы раздела волны, линия, соединяющая максимумы (минимумы) волны дифракции от трубопровода и т.д. (рис. 4.1 и 4.3).

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

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

В случае дифракции от локального объекта, например, трубопровода, ось синфазности имеет форму гиперболы, с помощью которой можно определить глубину до дифрагирующего объекта и скорость распространения волн в толще пород над объектом (см. ниже). Пример приведен на рисунке 4.4.

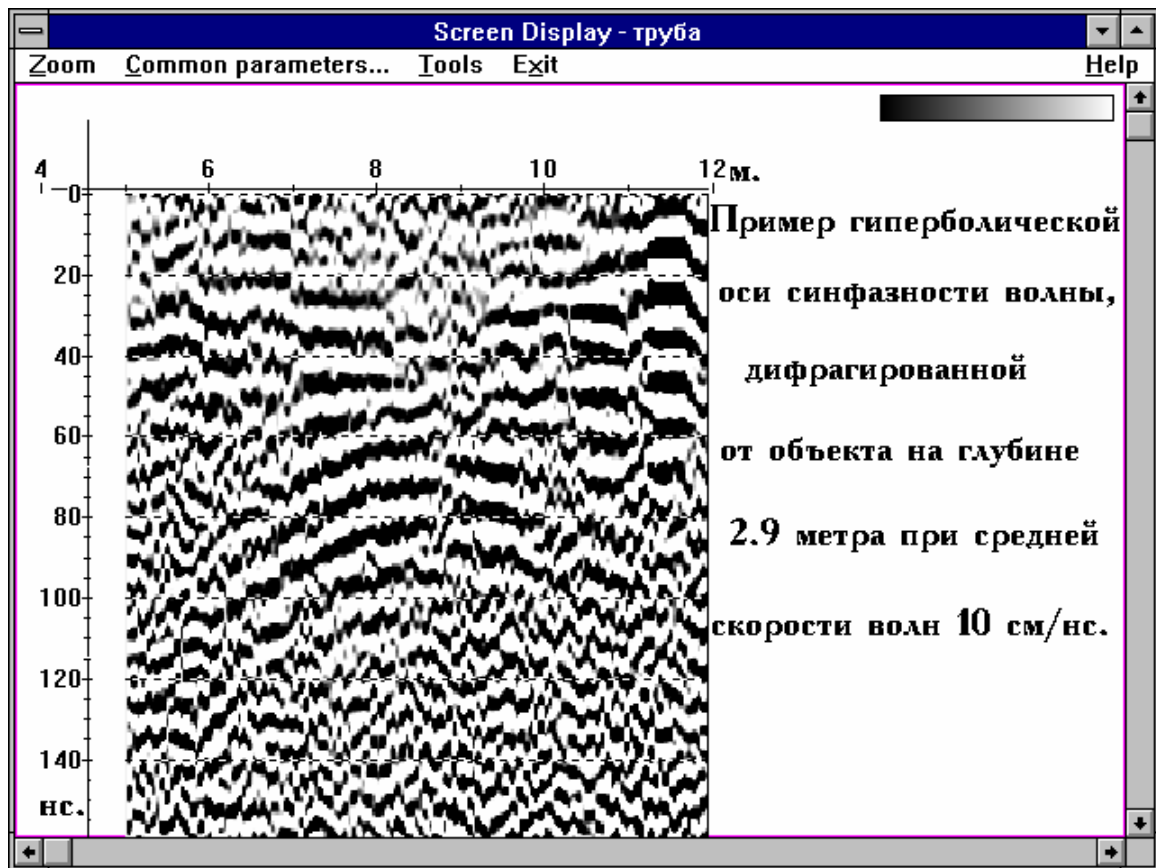


Рис. 4.4.

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

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

Уравнение годографа отраженной волны:

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

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

Уравнение годографа дифрагированной волны:

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

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

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

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

Волны-помехи. Это волны, не представляющие интереса с точки зрения задачи исследований, но присутствующие на записи, образующие интерференционную картину с полезными волнами и затрудняющие выделение полезных волн. Сюда относятся аппаратные помехи типа прямого проникновения сигнала из источника в приемник, многократные отражения от неглубоких границ, множество дифрагированных волн от трещин, валунов и т.д., затрудняющих расшифровку волновой картины, распространяющиеся по воздуху отраженные и дифрагированные волны от стен и углов зданий, объектов на поверхности земли и над ней (рис. 4.5).

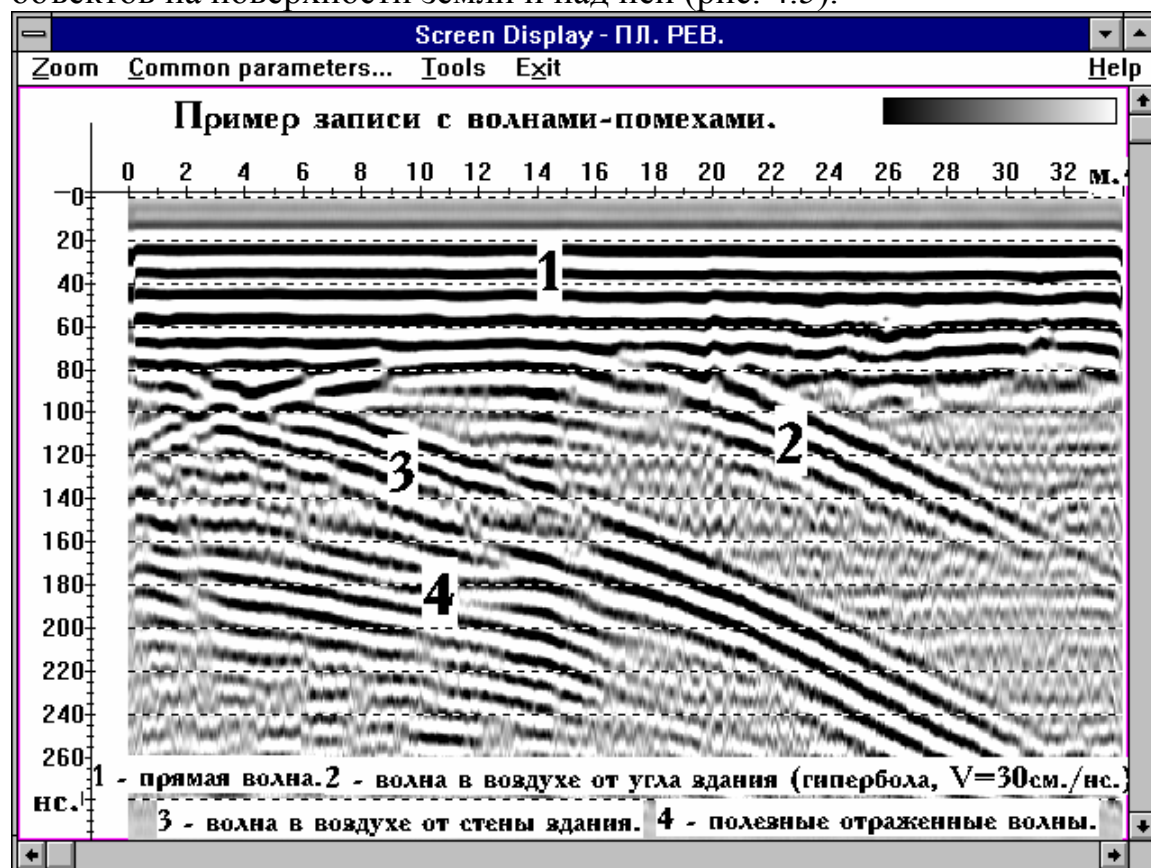


Рис. 4.5.

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

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

5. Обработка данных [11 - 13, 20, 21].

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

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

5.1 Ввод-вывод данных. Формат записи.

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

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

Внешняя характеристика формата состоит из четырех позиций:

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

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

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

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

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

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

Пример характеристики "user format" :

256,0,512,I2

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

5.2 Просмотр и редактирование данных.

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

- наличие участков записи, не подлежащих включению в процесс дальнейшей обработки - записи калибровочных сигналов, пропуски на записи, бракованные в результате аппаратных сбоев участки записи;

- выбирается интервал времени для последующей обработки, который может быть равен или меньше интервала времени при записи в поле;

- выбирается количество трасс на единицу длины профиля исходя из условий задачи исследований;

- выбирается количество трасс на экране для будущей печати результатов обработки - печати в заданном горизонтальном масштабе.

На основании просмотра и при необходимости производится редакция данных :

- удаление отдельных трасс или групп трасс;
- уменьшение интервала времени для обработки;

- прореживание или интерполяция в соответствие с новым шагом по профилю;
- выделяются в самостоятельные объекты обработки части файлов полевых записей или производится объединение нескольких файлов полевых записей в единый файл.

5.3. Коррекция амплитуд.

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

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

Автоматическая регулировка усиления (АРУ) также служит для выравнивания или сжатия динамического диапазона записи. Выполняется она следующим образом: в выбранном скользящем окне высокоамплитудные сигналы ослабляются, а низкоамплитудные усиливаются. В результате на выровненной записи могут быть прокоррелированы оси синфазности слабых отражений. Параметрами автоматической регулировки усиления являются ширина окна выравнивания амплитуд, степень выравнивания в окне, шаг скольжения окна вдоль трассы и величина интервала времени, где действует АРУ. Эти параметры процедуры также устанавливаются пользователем.

Примеры регулировок амплитуд приведены на рисунках 5.1 - 5.3.

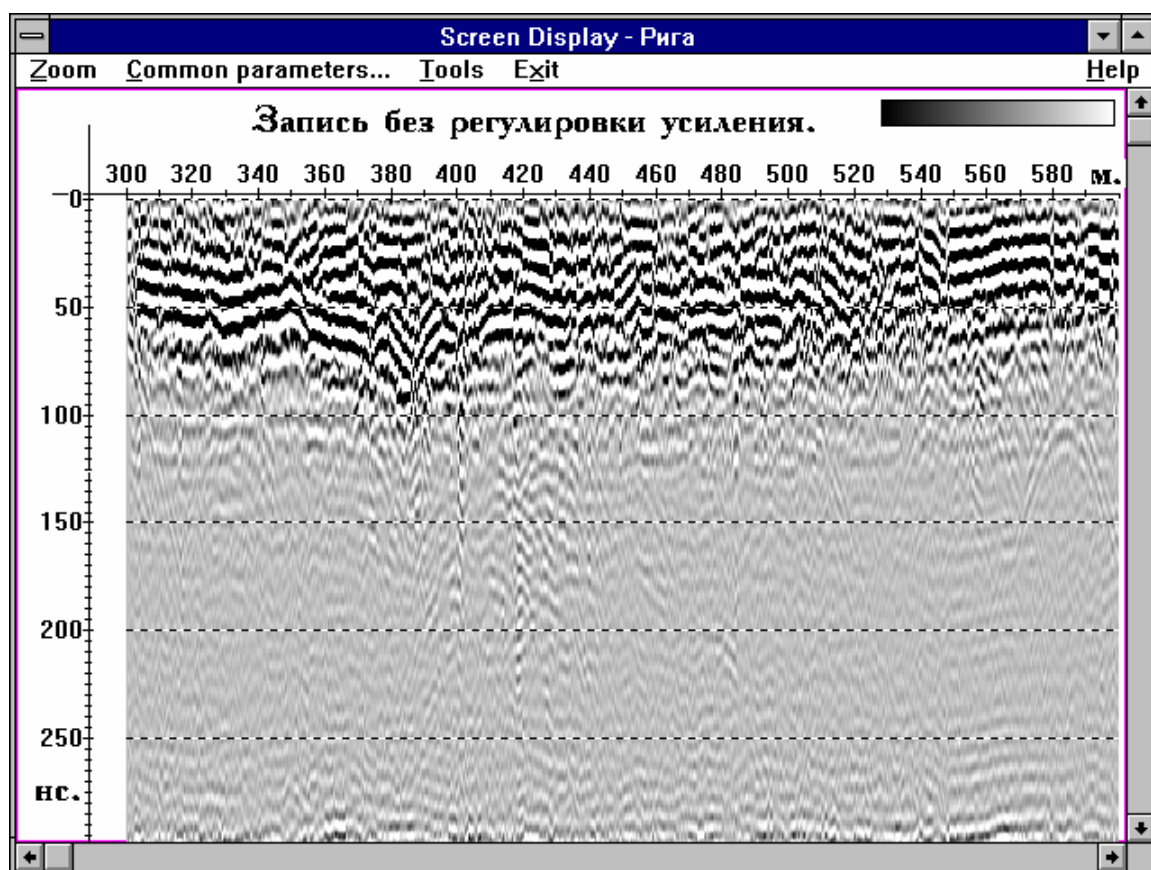


Рис. 5.1.

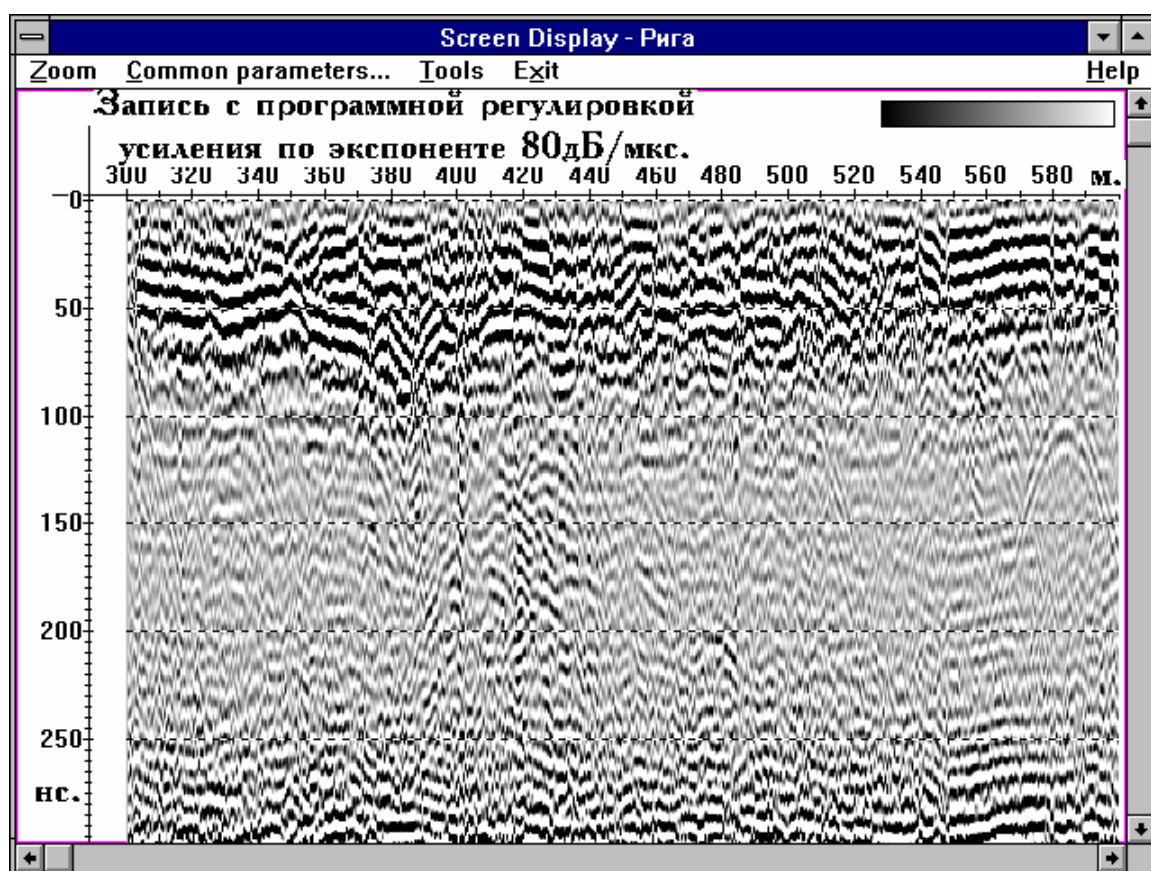


Рис. 5.2.

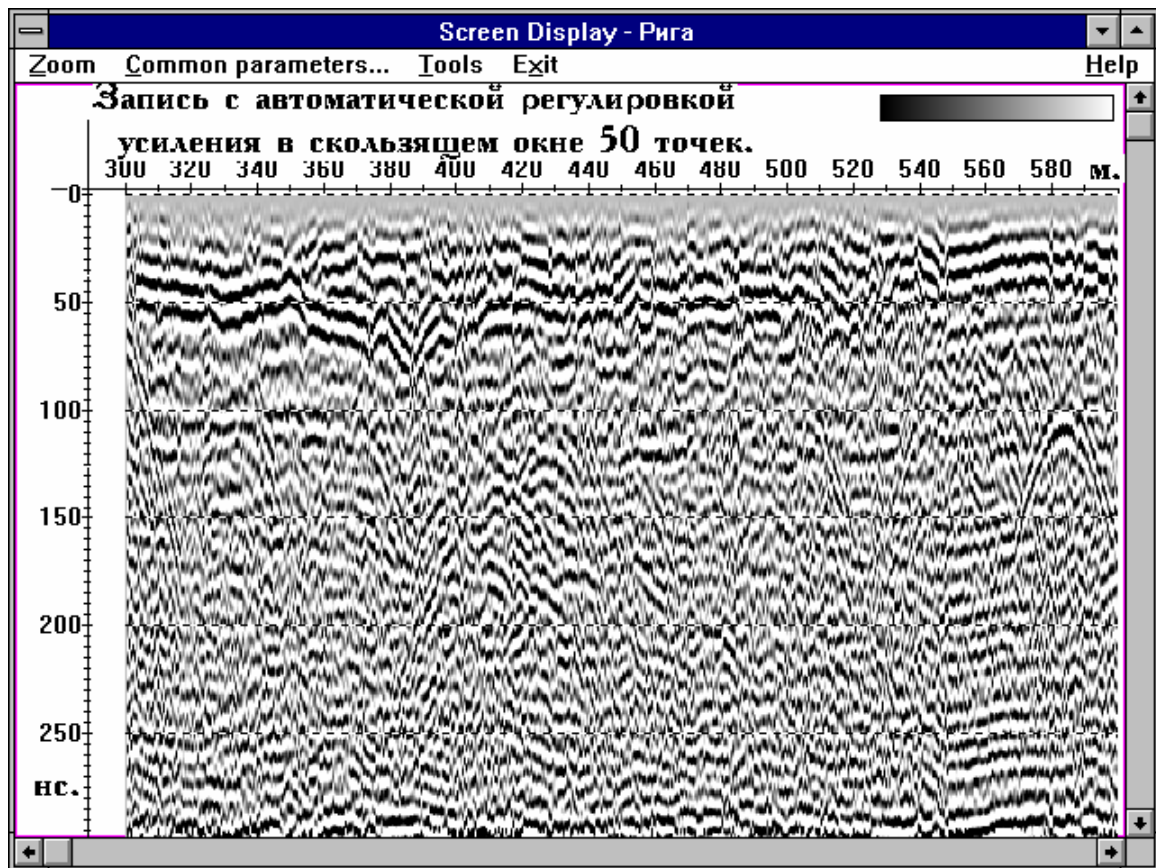


Рис 5.3.

5.4 Линейная обработка сигналов (фильтрация).

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

Результат процедуры - весь набор трасс, составляющих радарограмму, каждая из которых подвергнута вышеописанной процедуре. Параметрами процедуры фильтрации являются вид фильтра (например, полосовой с трапецеидальными срезами, Баттерворта, Ормсби

и т.д.), полоса частот фильтра, крутизны срезов частотной характеристики фильтра. Все параметры задаются пользователем в соответствии с инструкцией к соответствующей системе или программе обработки. Пример полосовой фильтрации приведен на рисунках 5.4 и 5.5.

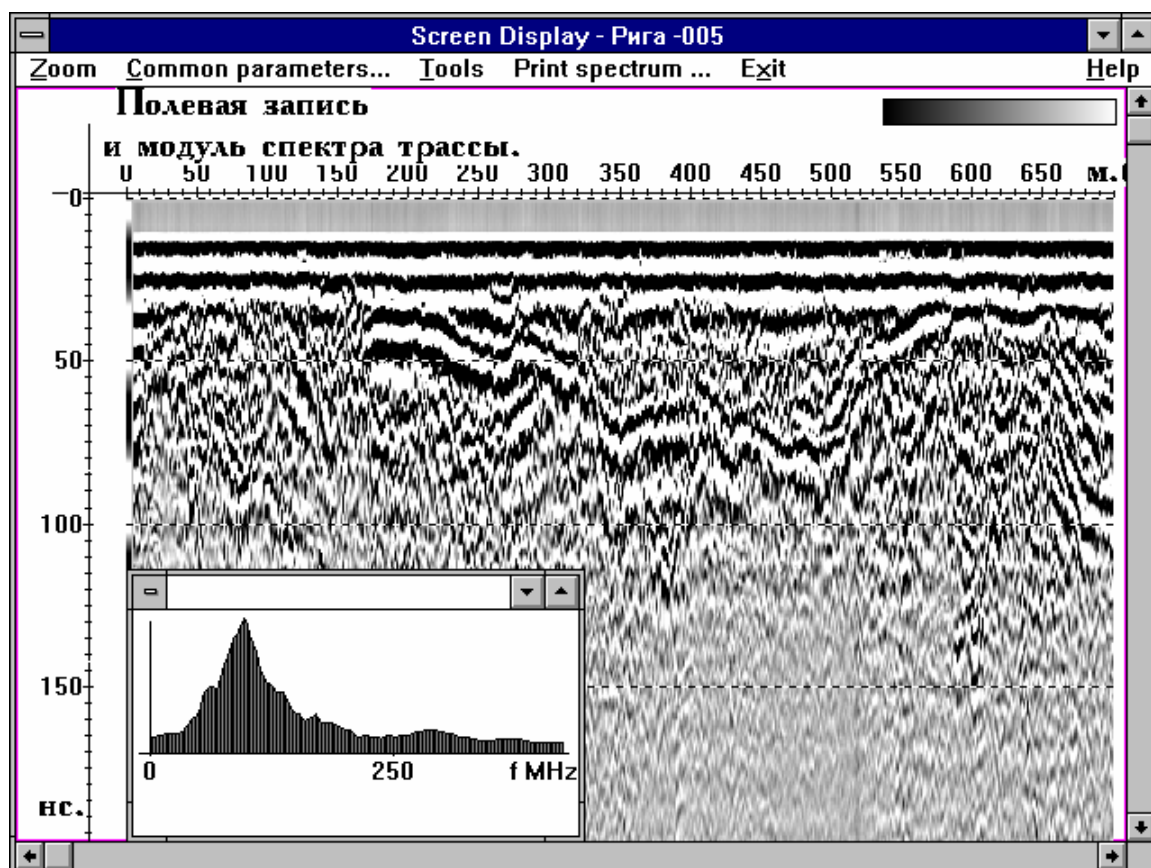


Рис. 5.4.

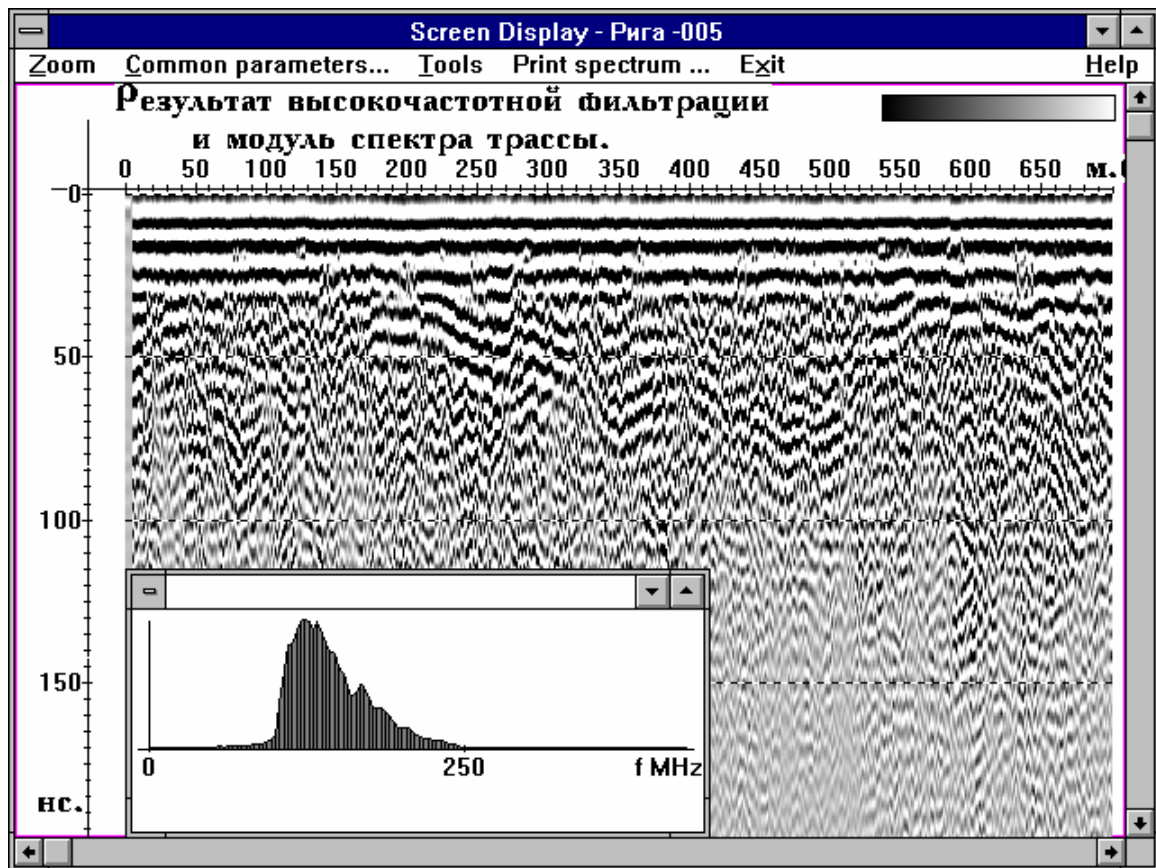


Рис. 5.5.

5.5 Повышение разрешающей способности (деконволюция).

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

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

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

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

Пример применения деконволюции приведен на рисунках 5.6 и 5.7.

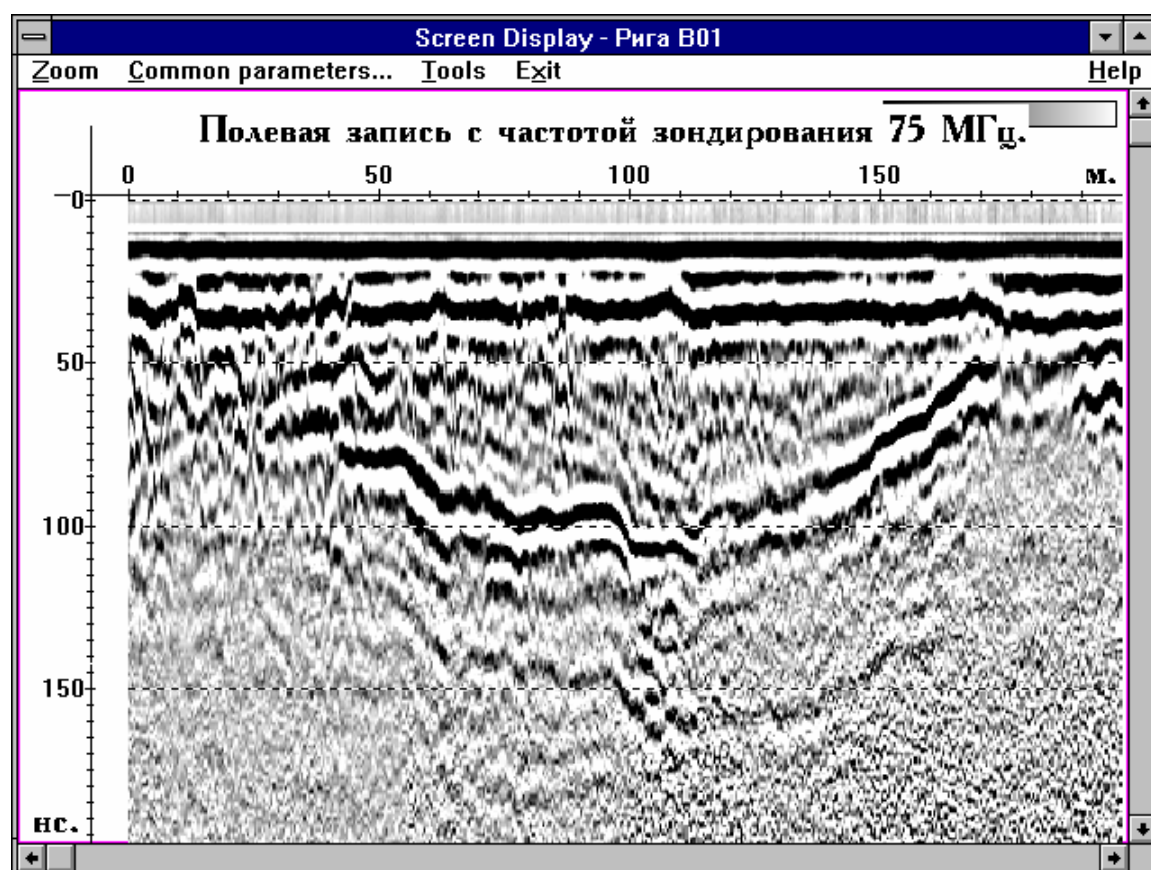


Рис. 5.6.

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

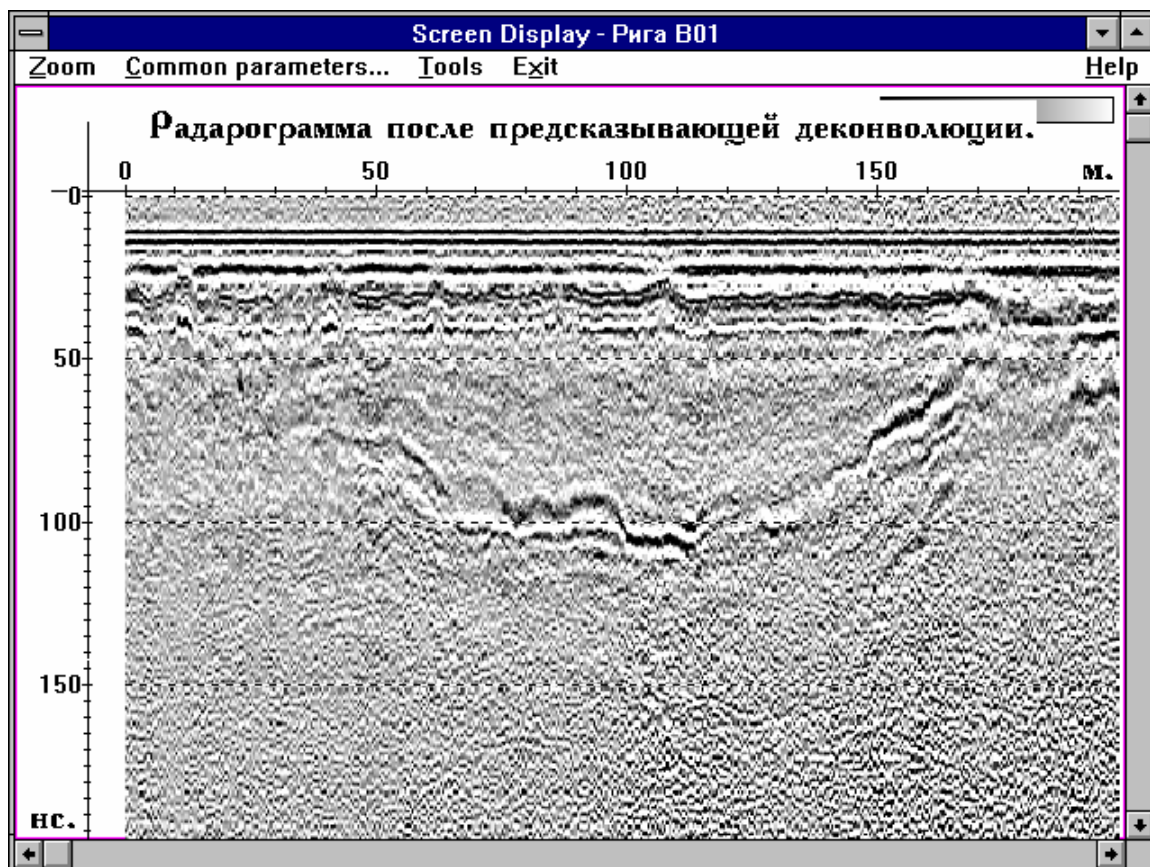


Рис. 5.7.

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

5.6 Восстановление местоположения и формы локальных объектов (миграция).

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

- ось синфазности отражений от границы является огибающей вершин гиперболических осей синфазности порожденных вторичными источниками - элементами границы;
- каждая трасса является суммой восходящих к приемнику волн, пришедших не только вертикально снизу, но и под разными углами с боков от других элементов границы;
- положение и наклон элементов оси синфазности волн, отразившихся от криволинейной границы может не точно соответствовать положению и наклону элементов границы в вертикальном сечении профиля.

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

При этом, истинные отражающие элементы границы займут свое настоящее местоположение в плоскости разреза “расстояние по профилю - глубина”. Очевидно, что для выполнения этой процедуры необходимо задать скорость распространения волн в среде для правильного задания формы гипербол суммирования сигналов с соседних трасс. В случае неправильного задания значения скорости полученный результат будет еще дальше от истинного разреза, чем исходный (“перемигрированные” разрезы, если скорость завышена и “недомигрированные” разрезы, если скорость занижена). Если на радарограмме имеют место ярко выраженные гиперболические оси синфазности дифрагированных волн от локальных объектов - трубопроводов, углов фундаментов или подземных сооружений, то применение миграции позволит “стянуть” гиперболу в небольшую область с интенсивным сигналом, соответствующую местоположению верхней точки трубопровода или угла сооружения и освободить оставшуюся запись от дифрагированных волн.

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

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

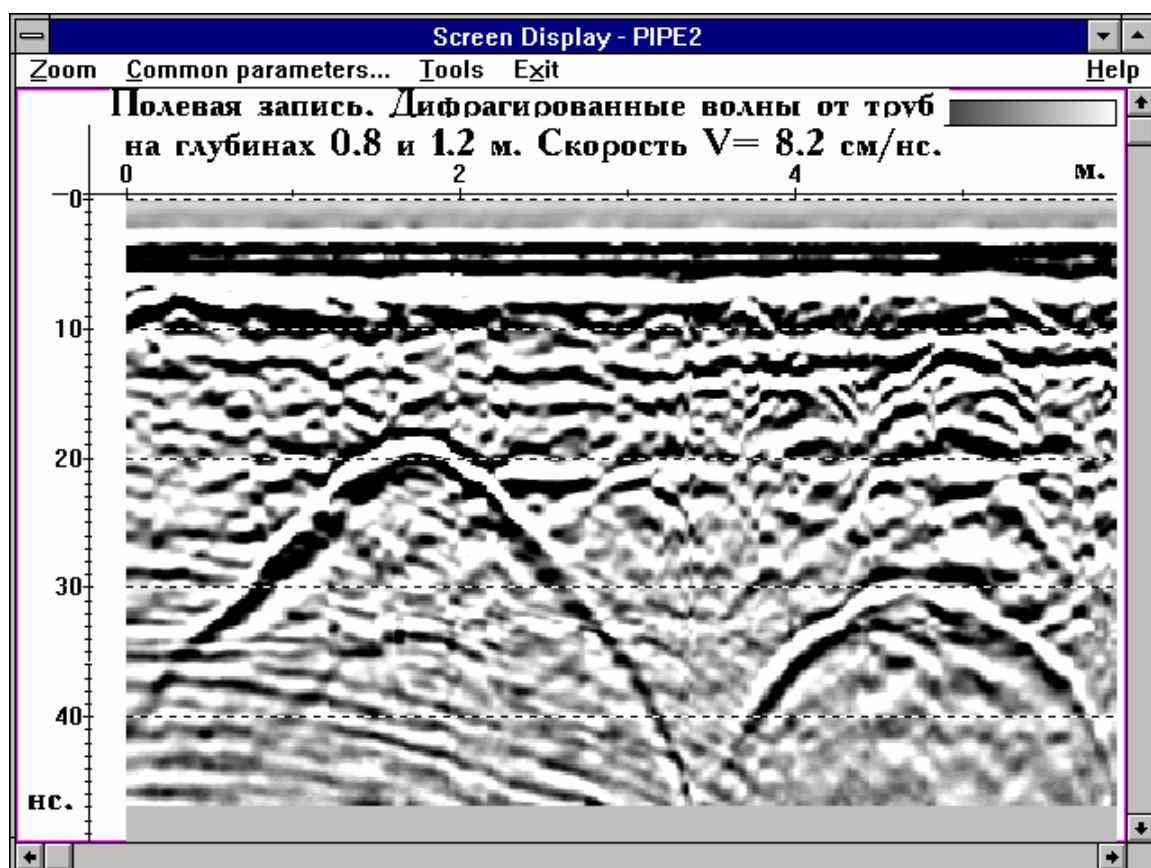


Рис. 5.8.

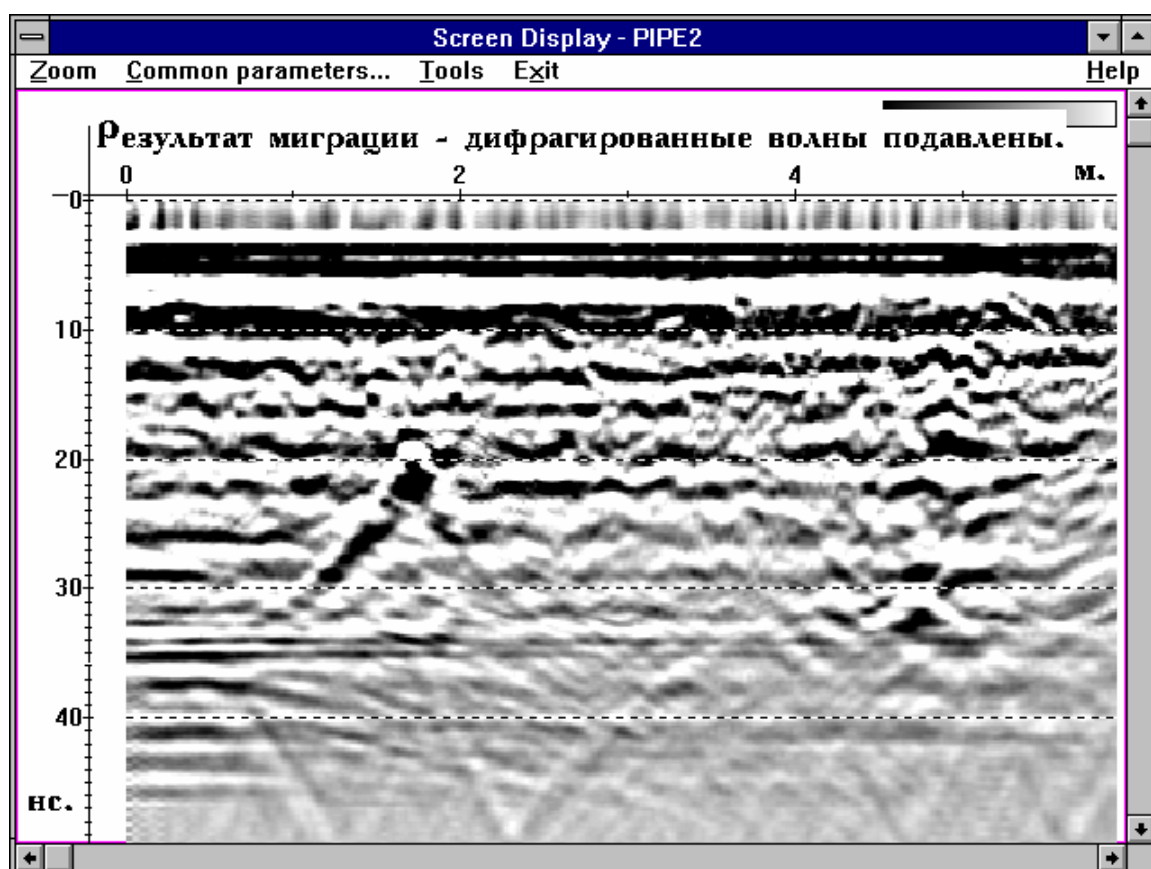


Рис. 5.9.

5.7 Определение скорости распространения волн.

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

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

5.8 Ввод статических поправок.

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

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

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

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

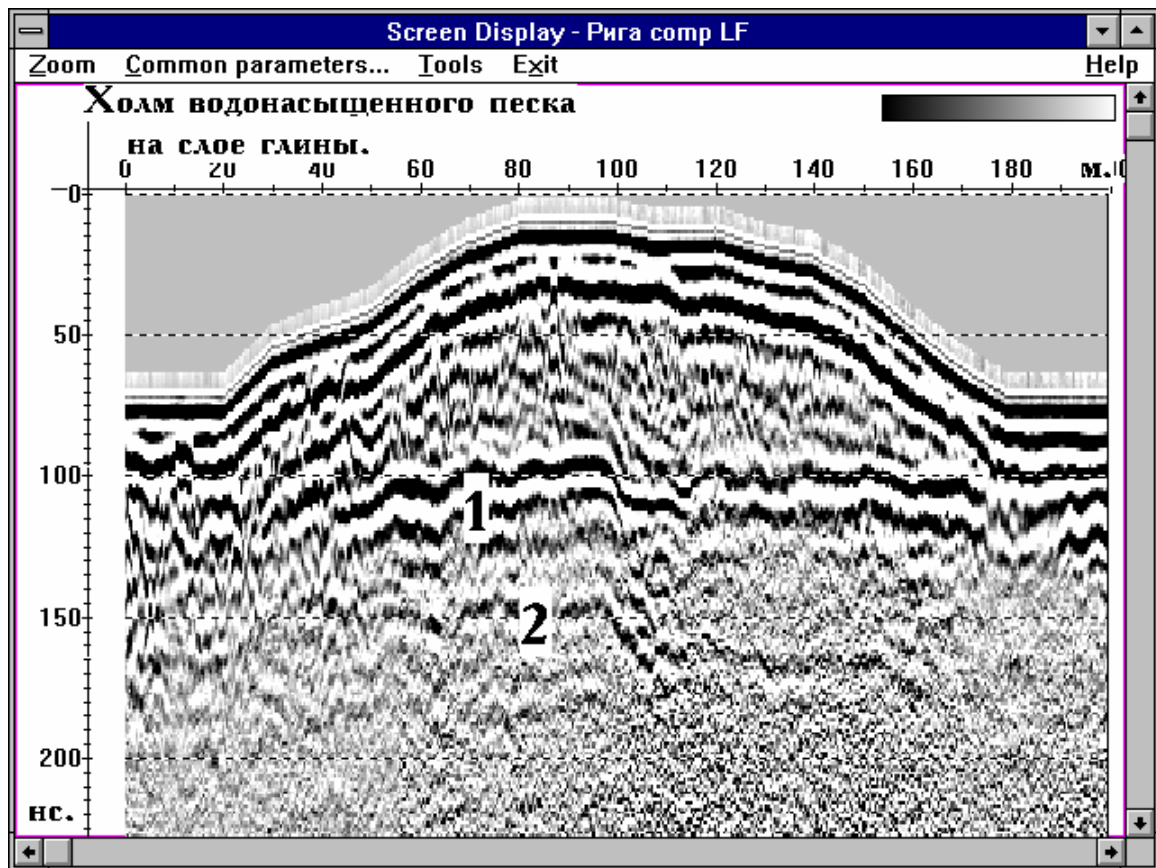


Рис. 5.10 1 - отражение от поверхности глины;
2 - кратная волна - результат вторичных
отражений от поверхности водонасыщенного
песка и поверхности глины.

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

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

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

Смысл этого преобразования состоит в следующем. Мгновенная амплитуда (амплитуда Гильберт-преобразования) соответствует огibaющей исходного сигнала. Такое представление бывает полезным при необходимости выделить или подчеркнуть на радарограмме области с характерным типом записи, отличающимся от соседних областей радарограммы более высокой или более низкой энергией сигнала, например, участки повышенной влажности, не имеющие четких отражающих границ, участки неровных и плохо отражающих

границ, где трудно проследить ось синфазности из-за того, что отражения на соседних трассах имеют разную форму и т.д. Пример мгновенных амплитуд Гильберт-преобразования приведен на рисунке 5.11 (исходная радарограмма на рисунке 5.10).

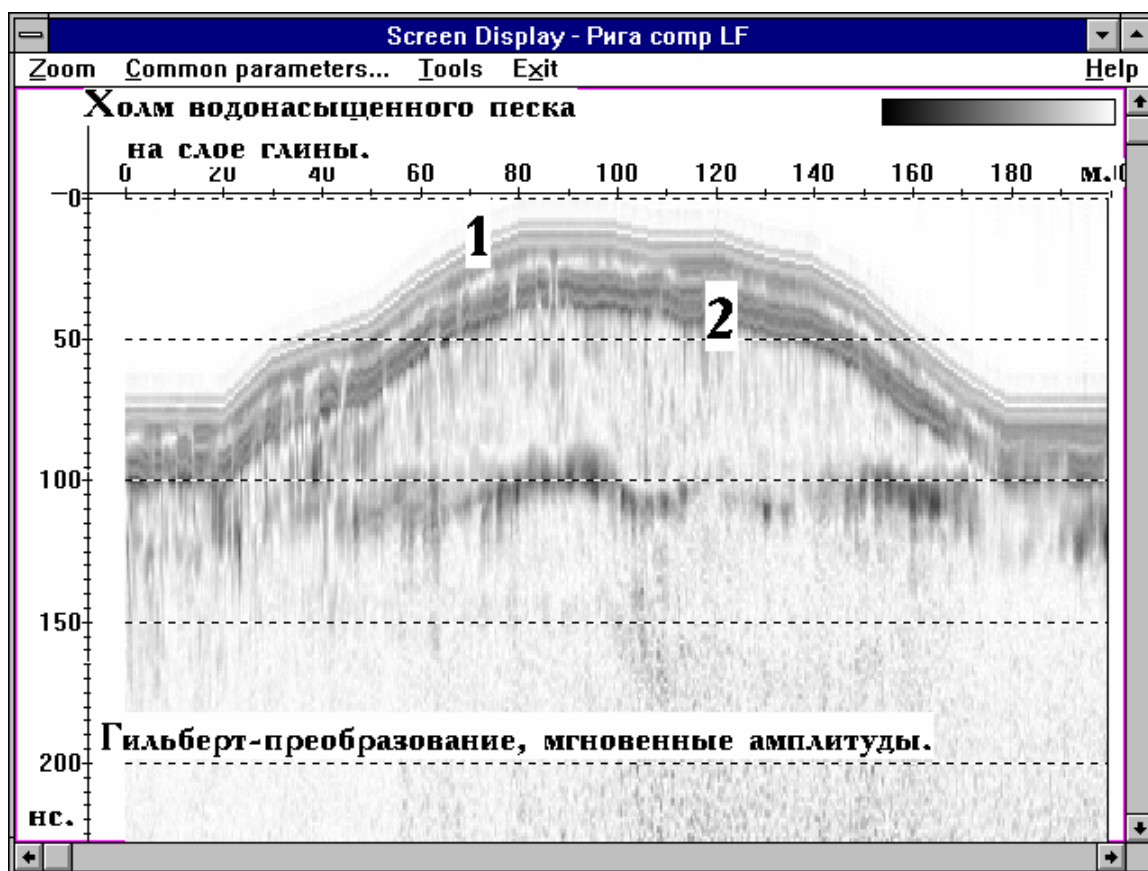


Рис. 5.11 1 - прямая волна; 2 - отражения от поверхности водонасыщения.

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

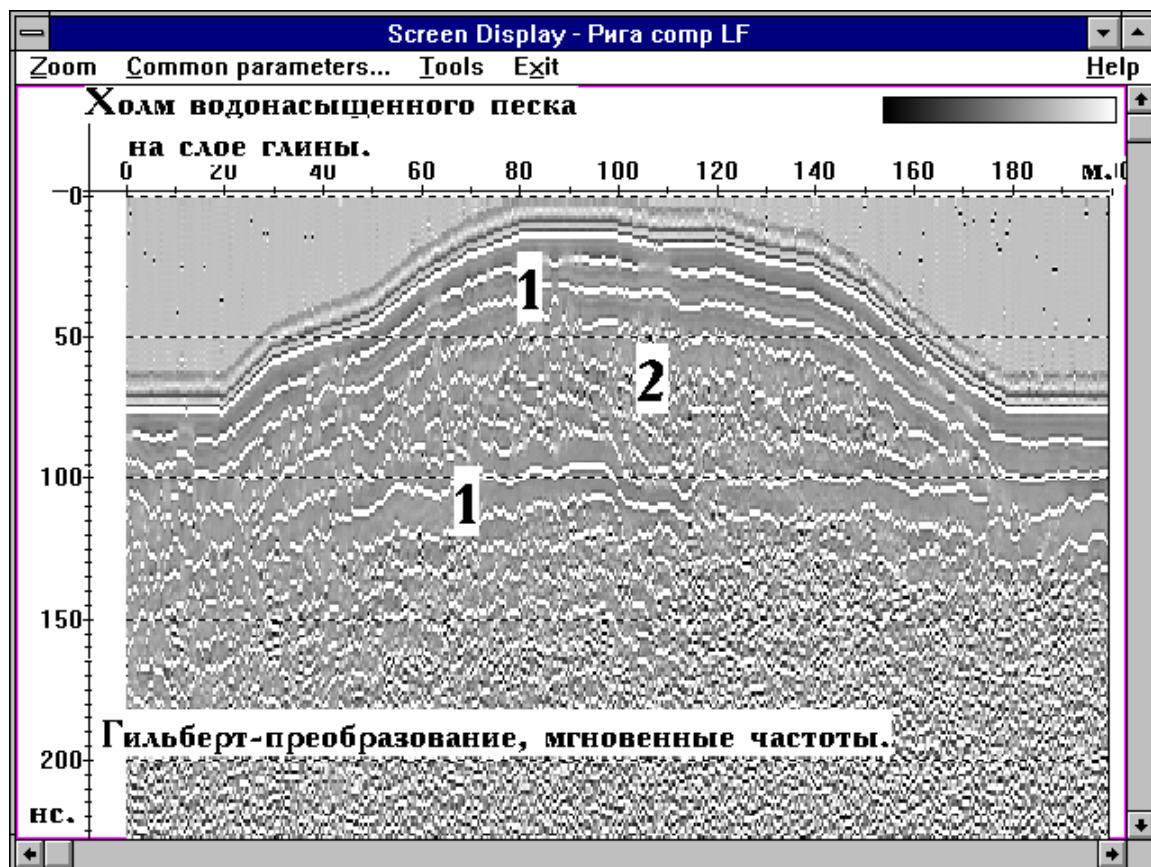


Рис. 5.12 1 - области регулярных отражений;
2 - область отражений с хаотическими фазами.

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

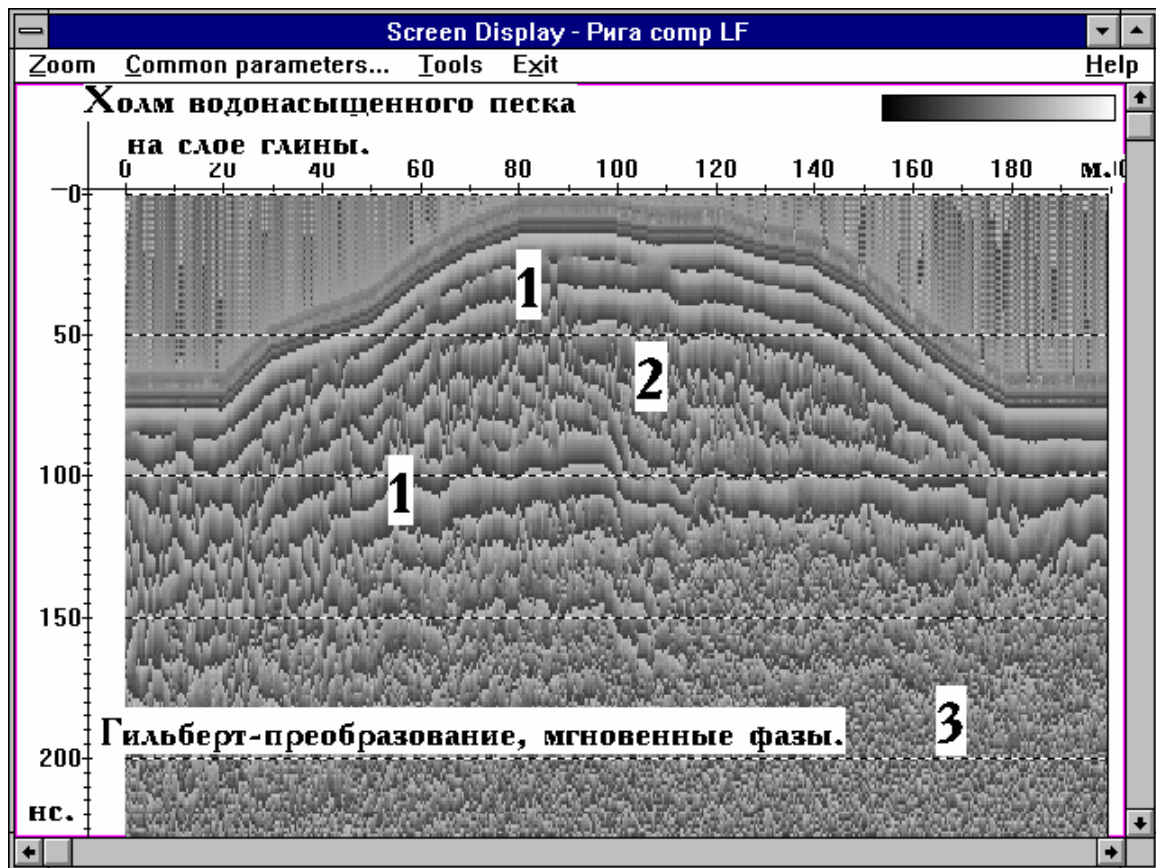


Рис. 5.13 1 - области регулярных отражений;
2 - область отражений с хаотическими фазами;
3 - область некоррелированного шума.

В большинстве случаев это преобразование может помочь при анализе радарограммы по типу сейсмостратиграфического (см. ниже). Параметром процедуры является конкретный вид Гильберт-преобразования.

5.10 Пикирование границ и объектов.

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

крапа, отражающего природу выделенных объектов и дополнительных сведений типа данных по геологическим скважинам и результатам других видов исследований.

5.11 Печать радарограмм.

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

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

5.12. Примерные последовательности обработки при решении некоторых задач.

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

1. Ввод данных.
2. Анализ спектров прямой волны, отражений в области искомым отражений и шума (частей записи на больших временах).
3. Скользящее суммирование для удаления синфазной помехи (если необходимо) с панелью суммирования порядка 10% от общего числа трасс на экране.
4. Частотная фильтрация.
5. Регулировка амплитуд.
6. Введение статических поправок на основании данных о рельефе профиля и задержке сигнала при записи.
7. Интерполяция записей вдоль профиля в соответствии с масштабом съемки.
8. Пикирование выделенных осей синфазности.
9. Преобразование временной оси в ось глубин на основании сведений о средней скорости распространения волн в разрезе или сведений о глубине залегания границы по скважинным данным.
10. Вывод результата обработки в цифровом виде и на печать.

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

1. Ввод данных.
2. Анализ спектров прямой волны, отражений в области искомым отражений и шума (частей записи на больших временах).
3. Скользящее суммирование для удаления синфазной помехи (если необходимо) с панелью суммирования порядка 10% от общего числа трасс на экране.
4. Предсказывающая деконволюция.
5. Частотная фильтрация.
6. Регулировка амплитуд.
7. Введение статических поправок на основании данных о рельефе профиля и задержке сигнала при записи.
8. Интерполяция записей вдоль профиля в соответствии с масштабом съемки.
10. Пикирование выделенных осей синфазности.
11. Преобразование временной оси в ось глубин на основании сведений о средней скорости распространения волн в разрезе или сведений о глубине залегания границы по скважинным данным.
12. Вывод результата обработки в цифровом виде и на печать.

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

1. Ввод данных.
2. Анализ спектров прямой волны, отражений в области искомых отражений и шума (частей записи на больших временах).
3. Скользящее суммирование для удаления синфазной помехи (если необходимо) с панелью суммирования порядка 10% от общего числа трасс на экране.
4. Частотная фильтрация.
5. Регулировка амплитуд.
6. Преобразование Гильберта.
7. Введение статических поправок на основании данных о рельефе профиля и задержке сигнала при записи.
8. Интерполяция записей вдоль профиля в соответствии с масштабом съемки.
9. Пикирование выделенных осей синфазности.
10. Преобразование временной оси в ось глубин на основании сведений о средней скорости распространения волн в разрезе или сведений о глубине залегания границы по скважинным данным.
11. Вывод результата обработки в цифровом виде и на печать.

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

1. Ввод данных.
2. Анализ спектров прямой волны, отражений в области гиперболических волн и шума (частей записи на больших временах).
3. Скользящее суммирование для удаления синфазной помехи (если необходимо) с панелью суммирования порядка 10% от общего числа трасс на экране.
4. Частотная фильтрация.
5. Регулировка амплитуд.
6. Введение статических поправок на основании данных о рельефе профиля и задержке сигнала при записи.
7. Интерполяция записей вдоль профиля в соответствии с масштабом съемки.
8. Скоростной анализ выделенных гиперболических осей синфазности.
9. Миграция с определенной по гиперболам скоростью (контроль определения скорости, анализ осей синфазности, ранее “закрытых” дифрагированными волнами).
10. Преобразование временной оси в ось глубин на основании определений средней скорости распространения волн в разрезе.
11. Вывод результата обработки в цифровом виде и на печать.

6. Интерпретация георадиолокационных данных [6,11,12].

Математическая обработка результатов георадарной съемки проводится, как правило, совместно с интерпретатором. На этом этапе подбирается такая последовательность операций, которая позволит наиболее эффективно решить поставленную задачу. Георадиолокационные исследования могут использоваться как для решения чисто геологических (инженерно-геологических, гидрогеологических) задач, так и при поиске или обнаружении разнообразных объектов техногенного происхождения (фундаментов, путепроводов и т.д.). В некоторых случаях, таких например, как изучение зон загрязнения нефтепродуктами, задача становится комплексной.

При геологической интерпретации используются основные положения методики, разработанной в сейсморазведке для поисков ловушек углеводородов неструктурного типа и получившей название сейсмостратиграфии.

Интерпретация проводится в два этапа. На первом этапе анализируются основные особенности волновой картины, т.е. на радарограммах выделяются участки с характерным типом записи, разделенные отражающими горизонтами, на которых наблюдается прекращение прослеживания отражений. В тех случаях, когда такие рефлекторы на профиле отсутствуют, выделяются наиболее интенсивные отражающие горизонты. На этом этапе рассматриваются только особенности волнового поля, геологическая информация, как правило, не привлекается.

На втором этапе анализируются тонкие особенности волновой картины на участках между выделенными ранее отражающими горизонтами. На этой стадии используется вся доступная геологическая и гидрогеологическая информация (скважины, шурфы, прямые и косвенные данные об уровне грунтовых вод и т.д.). При наличии сведений о строении изучаемого разреза и изменениях влагонасыщенности отложений производится оценка электрофизических свойств пород (скорости распространения электромагнитных волн и диэлектрической проницаемости). Полученные значения скорости и диэлектрической проницаемости (если они не противоречат опубликованным данным натурных измерений), используются затем при преобразовании временного разреза в глубинный.

При поиске и выделении локальных объектов геологической природы и техногенного происхождения (крупных включений, таких как валуны; бочки; трубопроводы; фундаменты и т.д.) основным признаком служит, как правило, наличие на радарограмме дифрагированных волн. Они указывают либо на сам объект, либо на отдельные особенности его строения (например, на края фундамента или путепровода). По годографам дифрагированных волн представляет-

ся возможным определить скорость в вышележащих отложениях и, таким образом, рассчитать глубину до изучаемого объекта или неоднородности (см. раздел 1.2).

При отсутствии геологических данных о разрезе интерпретация радарограмм может проводиться только на качественном уровне.

Перед началом интерпретации необходимо убедиться в том, что отражающие горизонты на радарограмме являются однократными отражениями. Особый интерес в этом отношении представляют участки записи, на которых наблюдаются пересекающиеся оси синфазности. Очевидно, что в этом случае с большой долей вероятности можно утверждать, что одна из систем осей синфазности не связана со строением изучаемого участка и является волной-помехой.

6.1. Выделение однократных отражений.

При наличии на радарограмме интенсивных отражающих горизонтов, связанных большей частью с уровнем грунтовых вод (УГВ) или с значительным увеличением влагонасыщенности в какой либо части разреза, могут возникать многократные отражения, которые являются волнами-помехами и должны быть исключены из анализа волнового поля. Основным признаком многократных отражений (2-х, 3-х кратных и т.д.) является кратное увеличение времени прихода отраженной волны. При горизонтальном или субгоризонтальном расположении отражающих горизонтов, 2-х, 3-х и т.д.-кратные отражения также будут расположены субгоризонтально. В случае наклона рефлектора с номером кратности будет увеличиваться и наклон многократных отражений. На рисунке 6.1 приведено схематическое изображение осей синфазности многократно отраженных волн для горизонтально-слоистого разреза (А) и косослоистого разреза (В), где 0-поверхность наблюдения, 1- оси однократных отражений, 2,3,4- оси многократных отражений. В реальных условиях интенсивные многократные отражения встречаются довольно редко и обусловлены в значительной степени резким увеличением влагонасыщенности в отдельных слоях (рис. 5.10).

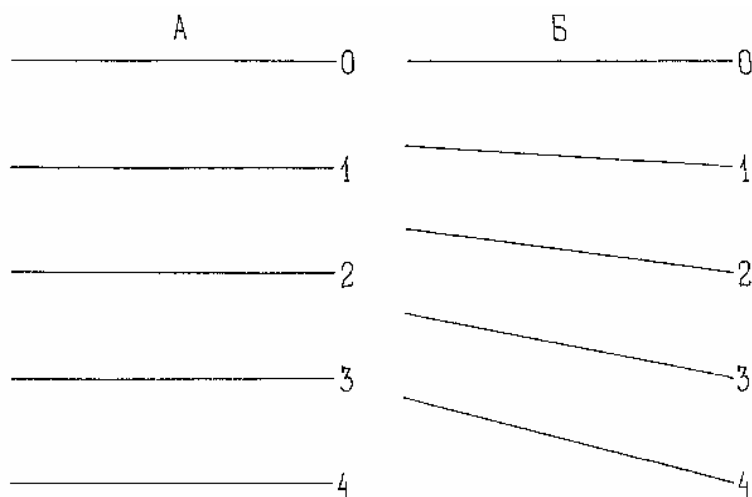


Рис. 6.1

При проведении георадарных исследований с ненаправленными антеннами в городских условиях в непосредственной близости от зданий и наличии подвешенных электрических кабелей, на радарограммах фиксируются интенсивные воздушные отражения, зачастую практически полностью “забивающие” полезные рефлекторы.

При наличии подозрений на воздушные отражения необходимо оценить расстояние до объекта, используя скорость распространения электромагнитных волн в воздухе (30 см/нс) и сравнить полученные значения с расположением объектов на изучаемой площади. При совпадении полученных данных воздушные отражения также необходимо исключить из рассмотрения (рис. 4.5). Очевидно, что наличие кратных и воздушных волн-помех проверяется по всей системе профилей.

6.2. Выделение комплексов отложений. Несогласия.

Анализ волновой картины на радарограмме заключается в расчленении разреза на ряд участков или областей, которые отличаются друг от друга характером рисунка и разделяются либо поверхностями угловых несогласий, либо интенсивными отражающими горизонтами, которые, как правило, также являются несогласиями. Поверхности несогласия - это эрозионные поверхности и поверхности, на которых осадки не накапливались длительное время; они отделяют более молодые отложения от более древних. Поверхности углового несогласия определяются на радарограммах по прекращению прослеживания отражений. Пример углового несогласия с прекращением прослеживания осей синфазности у кровли толщи приведен на рисунке 6.2.

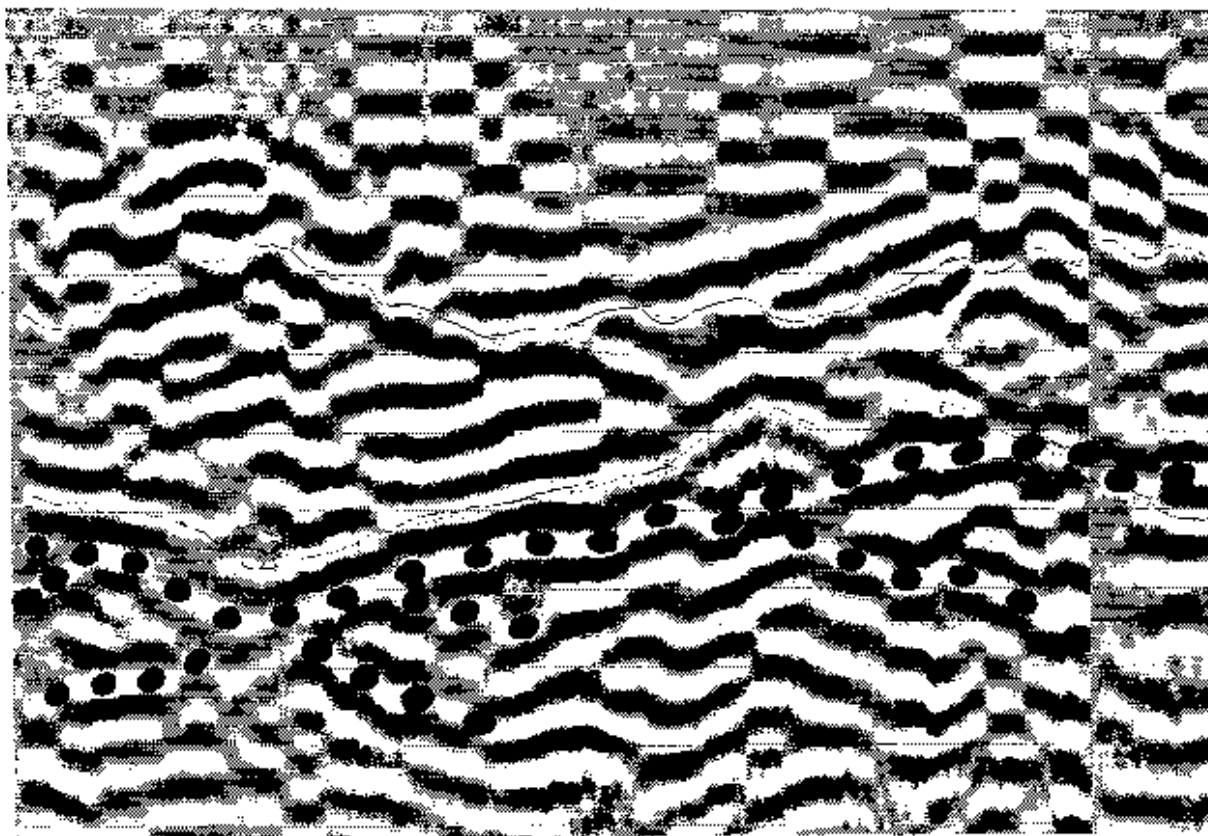


Рис. 6.2

Иными словами, угловые несогласия отображают перерыв между двумя комплексами слоев, имеющих различный угол наклона. При нормальном согласном залегании могут отсутствовать некоторые слои, поэтому поверхности несогласия иногда параллельны слоистости. Этот тип несогласия, называемый параллельным, отображается на георадиолокационных профилях, как правило, интенсивным отражающим горизонтом (рис. 6.3).

В сейсморазведке участки с различным типом волновой картины, разделенные несогласными границами, получили название сейсмических седиментационных комплексов (ССК). По аналогии с сейсморазведкой, такие же участки на георадиолокационных профилях будем называть георадарными седиментационными комплексами (ГСК) или, в дальнейшем, для краткости, просто комплексами. Разделение разреза на отдельные комплексы производится без привлечения геологической информации, используются только физические взаимоотношения между слоями. Предполагается, что формирование комплекса отложений происходило в течение определенного интервала времени и что он состоит из согласной последовательности слоев.

В литологическом отношении комплекс представлен обычно однотипными образованиями - песками, глинами и т.д., иногда с

линзами или прослоями отложений другого состава (например, прослой суглинков в песчаных грунтах). Мощность комплексов может меняться в широких пределах - от десятков сантиметров до сотен метров и более. Учитывая, что максимальная глубинность при георадарных исследованиях составляет несколько десятков метров, очевидно, что работы часто проводятся в пределах одного комплекса.

Выше уже отмечалось, что значительные изменения влагонасыщенности в отдельных слоях разреза приводят к формированию довольно интенсивных отражающих горизонтов, которые, однако, не являются границами комплексов.

6.3. Понятие фации. Разделение комплексов на фации.

Анализ волнового поля показывает, что в пределах выделяемых комплексов на радарограммах также могут наблюдаться изменения типа записи. Эти изменения отражаются в следующих параметрах:

1 - В конфигурации отражающих горизонтов. Отражающие горизонты могут иметь разнообразную морфологию. Наиболее часто встречаются следующие типы: параллельный, волнистый, хаотический (нерегулярный), линзообразный и т.д. (рис. 6.5, 6.7, 5.12);

2 - В интенсивности отражающих горизонтов;

3 - В протяженности рефлекторов;

4 - В изменениях частотного состава отражающих горизонтов.

В сейсмостратиграфии участки записи, отличающиеся по перечисленным выше параметрам, получили название сейсмофаций. В геологии фацией называются отложения, отличающиеся составом и физико-географическими условиями образования от соседних отложений того же стратиграфического интервала (т.е. того же возраста). При анализе радарограмм подобные участки, по аналогии с сейсморазведкой, будем называть георадарными фациями или, в дальнейшем, просто фациями. На рисунке 6.3 приведен пример выделения сейсмофаций. Здесь А - кровля ГСК, Б - подошва ГСК. В пределах ГСК происходит постепенное изменение волновой картины - от горизонтально-слоистой до хаотической. Как видно из определения, фации являются более дробными подразделениями, чем комплексы, и отличаются от последних тем, что переходы между фациями являются более или менее постепенными, а не обусловлены перерывами в осадконакоплении, которые отображаются в волновом поле интенсивными отражающими горизонтами.

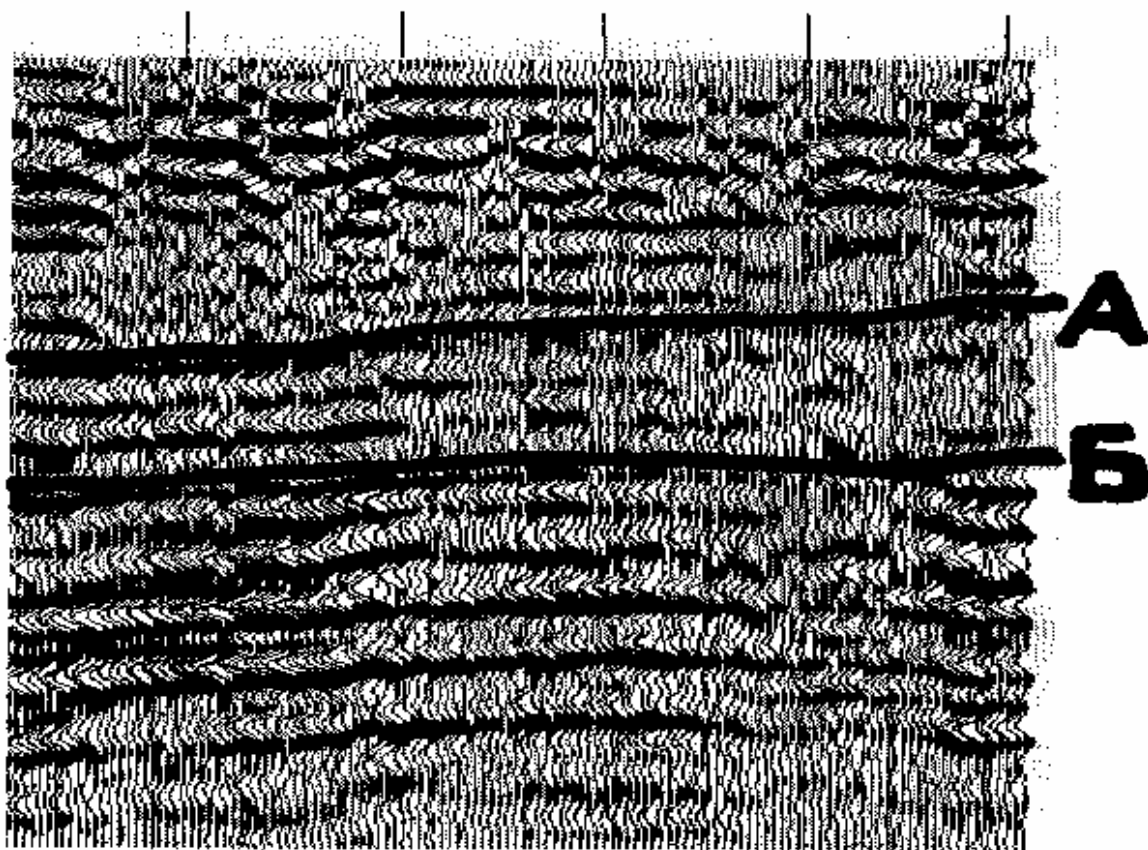


Рис. 6.3

Примером таких постепенных фациальных изменений разреза могут являться, например, увеличение глинистости в песках или изменение гранулометрии в самих песках.

Иными словами, постепенное изменение состава осадков внутри комплекса находит свое отражение и в изменении типа записи. В сейсмостратиграфии достоверность подобного (сейсмофациального) анализа была доказана многочисленными данными бурения. В георадиолокации идет интенсивное накопление подобной информации, тем не менее уже сейчас можно сделать вывод о том, что и здесь подтверждаются выявленные в сейсмостратиграфии закономерности.

Разделение комплексов на фации в значительной степени определяется квалификацией и опытом интерпретатора. На этой стадии используется вся доступная геологическая и гидрогеологическая информация. Однако в реальных условиях не всегда удастся сопоставить изменения волновой картины с какими либо характеристиками или свойствами осадков в разрезе. Это объясняется зачастую недостаточно детально изученными литофациальными особенностями разреза. Тонкий анализ типов волновой картины дает хорошие результаты, как правило, при проведении площадных георадиолокаци-

онных исследований, хотя может быть весьма эффективным и при анализе отдельных профилей.

6.4. Выделение локальных объектов геологической природы и техногенного происхождения.

Среди множества задач, решаемых при георадиолокационной съемке, выделяются задачи по обнаружению или прослеживанию отдельных локальных объектов, которые могут иметь как геологическую природу, так и техногенное происхождение. К ним, во-первых, можно отнести поиск разнообразных включений в отложениях, таких как крупные глыбы, предметы или обломки различного происхождения (бочки и т.д.). Во-вторых, георадар часто используется при поиске линейных и площадных объектов - старых фундаментов, кабелей, трубопроводов и т.д. Одним из основных признаков, а для некоторых объектов и единственным, является появление на радарограмме характерных дифрагированных волн, которые образуются, если размеры тела сопоставимы, либо меньше длины волны излучаемого сигнала (см. раздел 1.2 и рис. 5.8). В некоторых случаях дифрагированные волны образуются на отдельных частях изучаемого объекта, например, на уступах фундамента или перекрытия. Пример образования дифрагированных волн от уступов коллектора р. Неглинной (показан черными линиями) приведен на рисунке 6.4. В левом нижнем углу рисунка видны помехи - воздушные отражения.

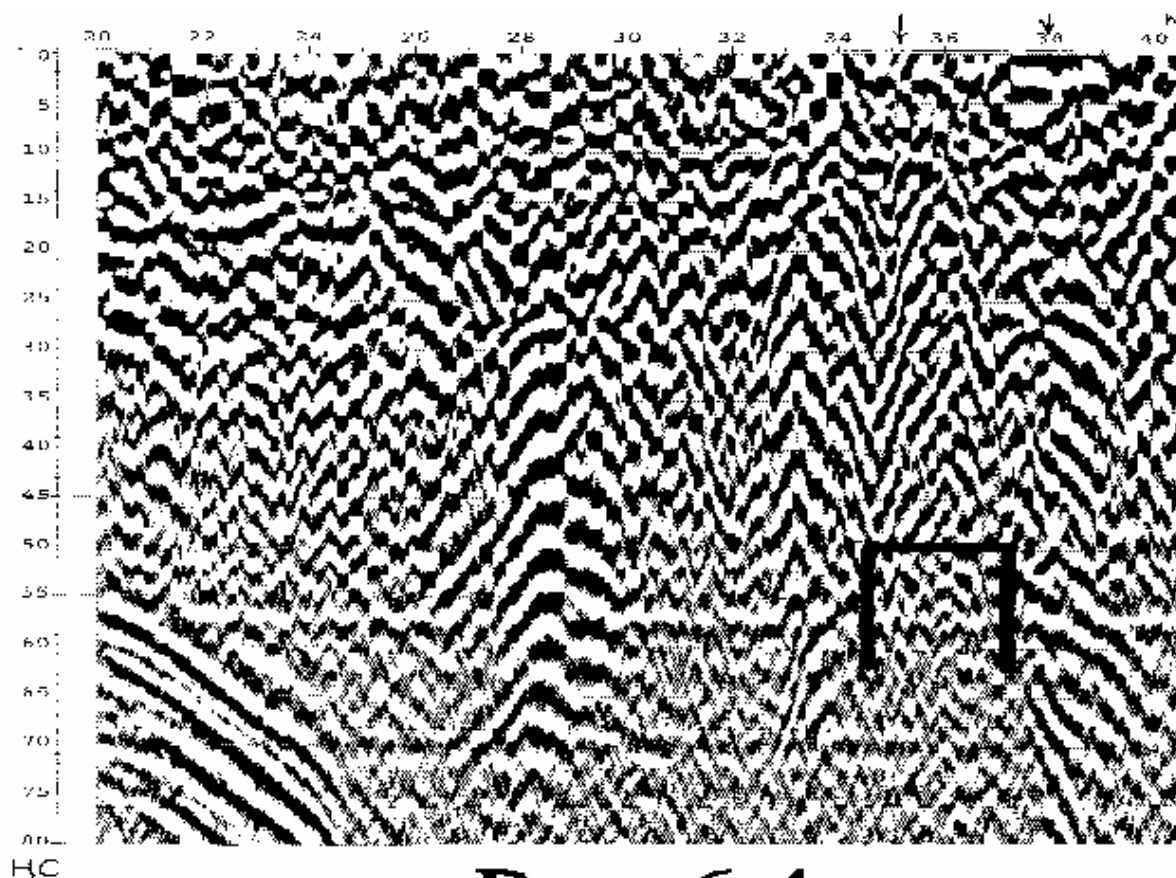


Рис. 6.4

При поиске линейных объектов достоверность их выделения проверяется по системе поперечных профилей. Используя годографы дифрагированных волн можно определить глубину залегания объекта (см. раздел 5.7).

6.5. Геологическая интерпретация радарограмм.

Целью комплексной геологической интерпретации радарограмм является построение глубинного разреза, на котором должны быть отражены литология выделяемых толщ, показаны отдельные объекты, если они имеются, и отражены элементы гидрогеологии (УГВ или изменения водонасыщенности слоев).

6.5.1. Начальный этап интерпретации.

На предварительной стадии геологической интерпретации георадиолокационных данных работы проводятся в следующей последовательности. На первом этапе производится отбраковка многократных и воздушных волн-помех, затем выделяются комплексы осадков, разделенные различного типа несогласиями. Если разрез представлен однотипными по составу отложениями, то граница между комплексами может проводиться по резкой смене волновой картины. Подобная ситуация часто встречается в районах, где слой поверхностных техногенных осадков, представленных обычно песча-

ми, супесями и суглинками, подстилается четвертичными отложениями сходного литологического состава. Если исследования проводились на площади, то в первую очередь анализируются профили, на которых взаимоотношения между разновозрастными толщами наиболее простые и очевидные. Затем по системе пересекающихся профилей выделенные границы комплексов передаются по всей площади.

На втором этапе в пределах комплексов (если это представляется возможным) выделяют фации, т.е. участки с плавными изменениями волновой картины, которые, как предполагается, свидетельствуют о постепенных изменениях состава отдельных толщ. Если для выделения комплексов используются физические соотношения между различными слоями, то достоверность фациального анализа определяется качеством исходного материала и квалификацией интерпретатора. Очевидно, что на этой стадии большое значение имеет геолого-гидрогеологическая информация. Выше уже отмечалось (см. раздел 1.1), что влагонасыщенность играет существенную роль при образовании отражающих границ. Уровень грунтовых вод является, как правило, одним из самых интенсивных рефлекторов (рис. 5.7). Вместе с тем, по-видимому, могут существовать отражающие горизонты, обусловленные изменениями влажности в зоне аэрации (влагонасыщенной зоне). В первую очередь это относится к водам капиллярной каймы. Она образуется в условиях связи с грунтовыми водами зоны насыщения за счет капиллярного поднятия подземных вод. Примером подобного рода может служить рисунок 5.11.

Ниже приводятся средние значения высоты капиллярного поднятия (Нк) в различных породах.

Горные породы	Нк в метрах
Песок крупнозернистый	0,02 - 0,04
Песок среднезернистый	0,12 - 0,35
Песок мелкозернистый	0,35 - 1,2
Супесь	1,2 - 3,5
Суглинок	3,5 - 6,5
Глина легкая	6,5 - 12,0
Лессы	до 4,0 м за 2 года.

В некоторых, по-видимому, довольно редких случаях отражающая граница может образоваться, когда более влажные отложения залегают на сухих (в случае так называемой “подвешенной” воды).

Опыт проведения георадиолокационных исследований в условиях вечной мерзлоты показывает, что основные принципы интерпретации действуют и в этих условиях, следует только отметить,

что, при прочих равных условиях, глубинность изучения разреза несколько увеличивается. Это обусловлено низкими значениями диэлектрической проницаемости в мерзлых породах (3-4 в песчано-глинистых отложениях).

6.5.2. Сопоставление скважинных и георадарных данных.

Оценка электрофизических свойств пород (скорости распространения электромагнитных волн и диэлектрической проницаемости).

Георадиолокационное профилирование, как и любой другой геофизический метод, нуждается в подтверждении данными бурения. После анализа волновой картины и при наличии сведений о разрезе и его гидрогеологических особенностях можно оценить электрофизические параметры выделенных слоев. Имея времена прихода волн от основных отражающих горизонтов и отождествляя их с определенными границами в разрезе, по известным формулам (см. раздел 1.2) можно рассчитать значения скорости, а затем и диэлектрической проницаемости. Если нет натурных измерений этих параметров, то полученные данные сопоставляются с известными опубликованными значениями. При несоответствии литологических и гидрогеологических особенностей разреза с полученными значениями скорости и диэлектрической проницаемости, операция повторяется. Интерпретация считается достоверной, если все параметры хорошо согласуются друг с другом. Оценку электрофизических параметров следует начинать с профилей, на которых имеются скважины, затем, по возможности, распространить на другие участки изучаемой площади.

6.5.3. Преобразование временного разреза в глубинный.

Для дальнейшего применения результатов георадиолокационного профилирования на заключительном этапе интерпретации временной разрез необходимо перестроить в глубинный. Для этого наиболее часто используются значения скоростей, полученные при определении электрофизических свойств осадков (см. предыдущий раздел). Однако, если на разрезе имеются объекты, дающие дифрагированные волны, то рассчитанные по ним скорости также используются. Пересчет производится сверху вниз по разрезу. Затем выделенные комплексы и (или) фации насыщаются литологией с элементами гидрогеологии. На рисунке 6.5 представлен пример временного георадиолокационного разреза, где линии 1,2 и 3 обозначают границы ГСК.

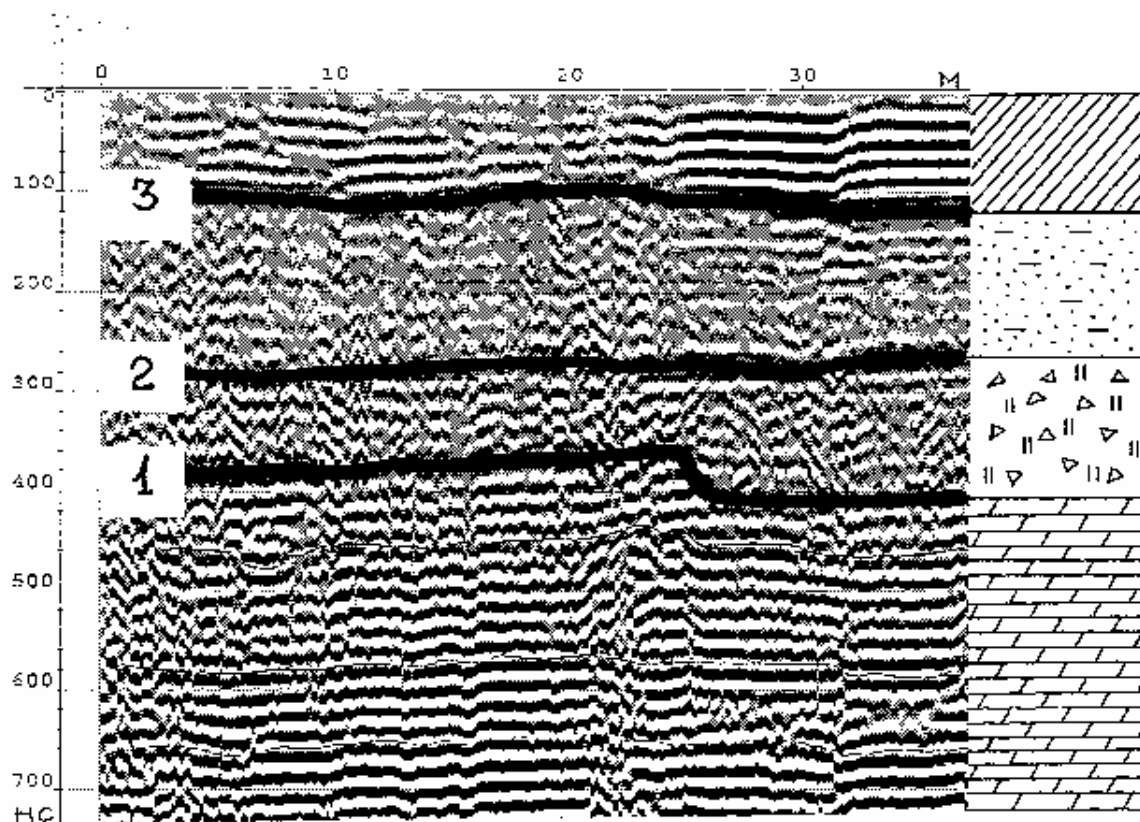


Рис. 6.5

На рисунке 6.6 показан пример глубинного разреза, в который преобразован временной разрез с рисунка 6.5, с литологической характеристикой отложений: 1 - доломиты с прослоями гипса; 2 - сильно разрушенный доломит; 3 - супеси; 4 - суглинки.

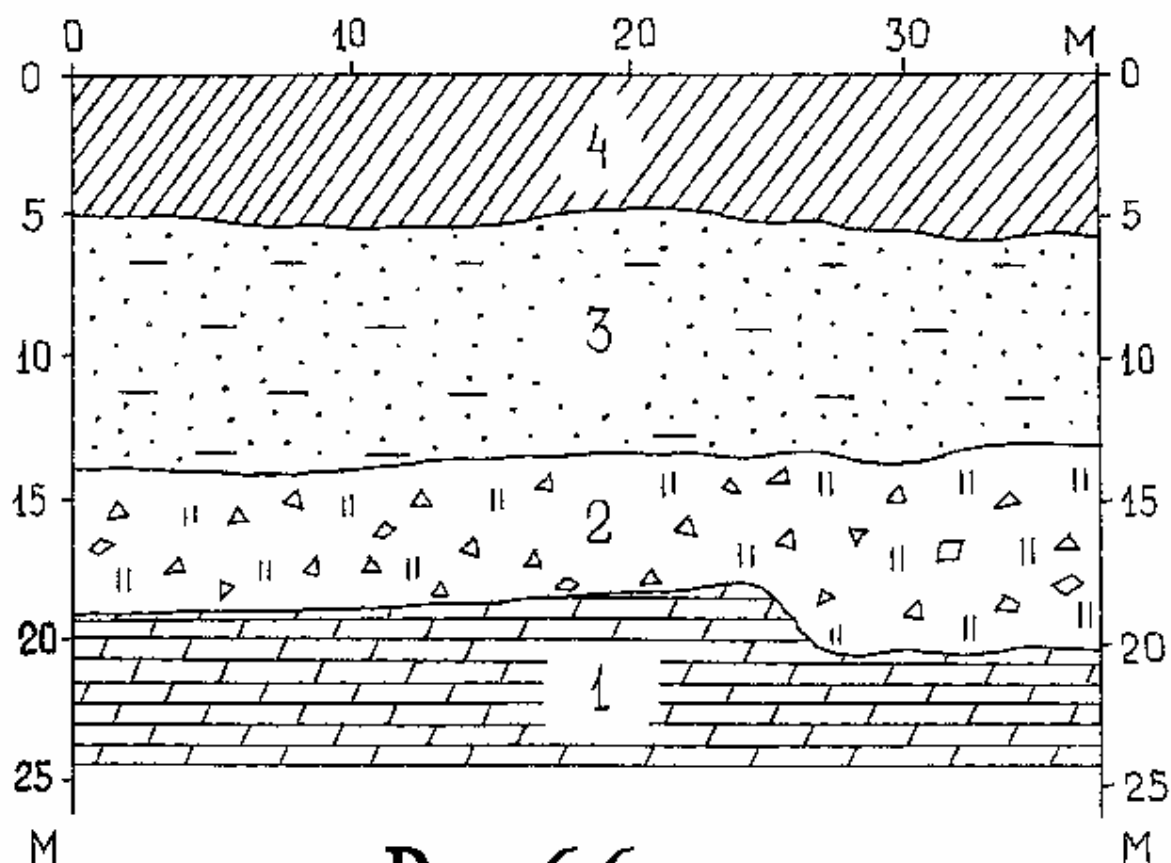


Рис. 6.6

6.5.4. Интерпретация радарограмм при отсутствии геологических данных.

В реальных условиях георадиолокационные наблюдения иногда приходится проводить при отсутствии геологических и гидрогеологических сведений о строении разреза. Если эти работы направлены на поиск или обнаружение локальных объектов, то указанные данные зачастую не нужны. При инженерно-геологических исследованиях начальная последовательность операций сохраняется. На первом этапе отбраковываются многократные и воздушные волны-помехи, затем выделяются комплексы и (или) фации. Однозначного соответствия типов волновой картины и литологического состава осадков нет, тем не менее накопленный к настоящему времени опыт георадиолокационных работ показывает, что определенные соотношения иногда отмечаются. Для песчаных разностей и техногенного грунта характерен линзовидный тип записи (рис. 6.7), хотя может встречаться и хаотический.

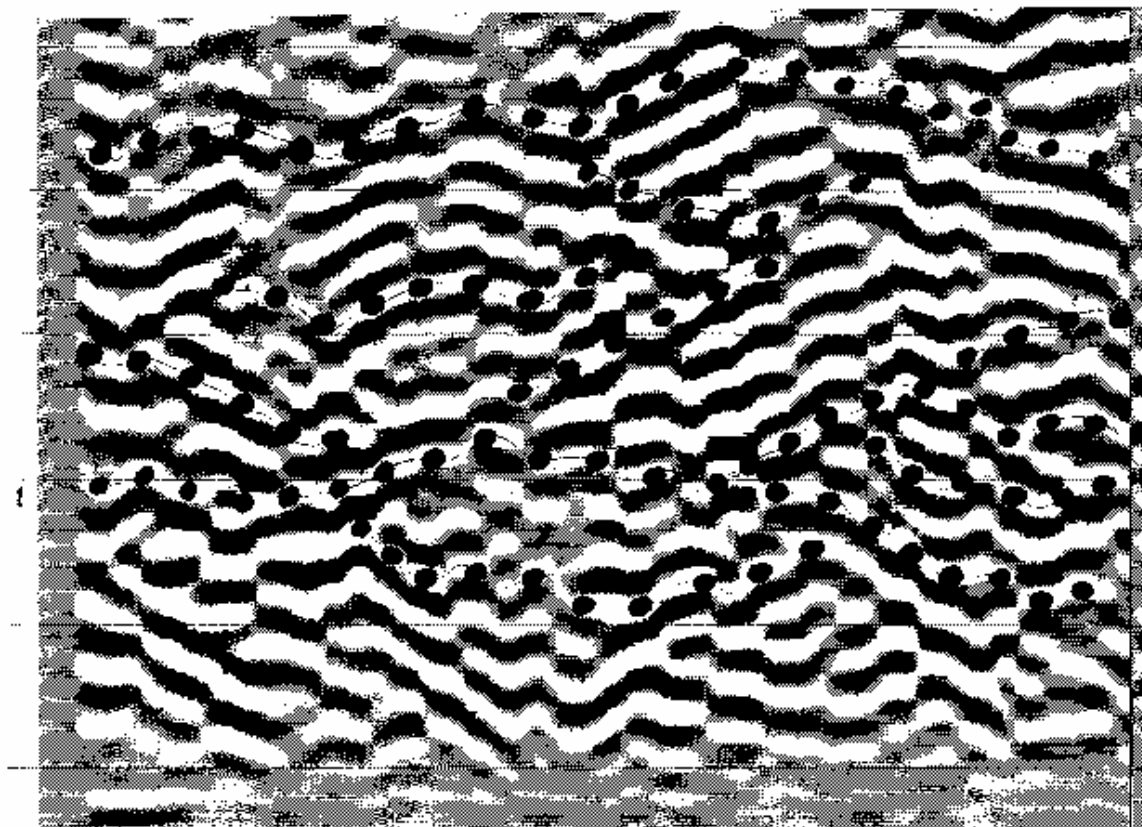


Рис. 6.7

Известняки, доломиты имеют регулярную волновую картину с хорошо выдержанными протяженными субгоризонтальными осями синфазности (нижняя часть разреза на рисунке 6.5).

Выделение отражающих горизонтов, обусловленных изменением влагонасыщенности или связанных с УГВ без дополнительной информации крайне затруднительно. При отсутствии данных бурения необходимо привлекать косвенную информацию о гидрогеологической ситуации либо на самой изучаемой площади, либо на соседней: наличие заболоченных участков, ручьев, прудов и т.д.

Оценка электрофизических параметров слоев в этом случае, необходимая для заверки правильности интерпретации и для пересчета временного разреза в глубинный, может производиться только приблизительно и исходя из средних значений скорости и диэлектрической проницаемости, определенных для аналогичных разрезов. Некоторым критерием проверки правильности подбора электрофизических параметров может служить глубинность исследований. Например, при радарных работах с центральной частотой 75-100 МГц, средняя глубинность исследований в песчано-глинистых отложениях составляет в среднем 8-12 метров. При изучении разрезов в условиях вечной мерзлоты глубинность повышается до 2-2,5 раз при той же методике работ.

Заключение.

Авторы данного руководства выражают надежду, что оно будет полезным для тех, кто приступает впервые к георадиолокационным исследованиям верхней части разреза, а также и для тех, кто уже имеет некоторый опыт такого рода исследований.

Авторы будут признательны всем, кто прочтя руководство возьмет на себя труд прислать отзывы, пожелания, дополнения или критические замечания в фирму “ГСД Продакшен”:

Факс: (095) 939 - 43 - 70.

Тел.: (095) 939 - 33 - 42. Кульницкий Л.М.

(095) 939 - 49 - 10. Владов М.Л., Старовойтов А.В.

Список литературы .

1. Афанасьев И.И., Золотарев В.П., Кофман Л.М. Решение обратной задачи подповерхностного радиолокационного зондирования на основе годографов электромагнитных волн. В сборнике: "Теория и техника радиолокации, радионавигации и радиосвязи в гражданской авиации", Рига, РКИИГА, 1988, стр. 38 – 46.
2. Баев Ю.В., Золотарев В.П., Кофман Л.М. К оценке затухания зондирующего сигнала и глубинных возможностей аппаратуры радиолокационного профилирования торфяных месторождений. В сборнике: "Теория и техника радиолокации, радионавигации и радиосвязи в гражданской авиации", Рига, РКИИГА, 1988, стр. 46 - 50.
3. Золотарев В.П., Кофман Л.М., Сычев Г.Н., Финкельштейн М.И. Измерение глубины залегания уровня грунтовых вод в песчаных отложениях методом радиолокационного зондирования. Водные ресурсы, 1982 г., N 4, стр. 176 - 179.
4. Золотарев В.П., Кофман Л.М. Экспериментальные исследования практических возможностей импульсного радиолокационного метода для изучения тонкослоистой структуры земных недр. В сборнике: "Теория и техника радиолокации, радионавигации и радиосвязи в гражданской авиации", Рига, РКИИГА, 1985, стр. 64 - 69.
5. Кофман Л.М. Экспериментальное определение электрических характеристик сред с большим водосодержанием по результатам радиолокационного зондирования торфяных месторождений. В сборнике: "Теория и техника радиолокации, радионавигации и радиосвязи в гражданской авиации", Рига, РКИИГА, 1984, стр. 42 - 45.
6. Сейсмическая стратиграфия 1 и 2 том под ред. Ч. Пейтона. М, Мир, 1986.
7. Теория, техника и методика подповерхностных радиолокационных исследований - руководство к приборам серии "Зонд". НПО РАДАР, Рига, 1993.
8. Финкельштейн М.И., Мендельсон В.А., Кутев В.А. Радиолокация слоистых земных покровов. М, Сов. Радио, 1977, 176 с.
9. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. М, Недра, 1986, 128 с.
10. Финкельштейн М.И., Карпухин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н. Подповерхностная радиолокация. М, Радио и Связь, 1994, 216 с.
11. Хаттон и др. Обработка сейсмических данных. М, Мир, 1990.
12. Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка. 1 и 2 том. М, Мир, 1987.
13. Al-Chalabi M. An analysis of stacking, RMS, average, and internal velocities over a horizontally-layered ground. Geophysical Prospecting, v.22, N3, 1974, pp.458-475.

14. Annan A.P., Davis J.L. Impuls radar sounding in permafrost. *Radio Science*, v.11, N4, pp. 383-394.
15. Cook J.C. Radar transparencies of mine and tunnel rocks. *Geophysics*, 1975, v. 40, N5, pp. 865-885.
16. 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.
17. Davis J.T., Annan A.P. Ground-pentrating Radar for High-resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. *Gtophysical Prospecting*, 1989, v. 37, pp. 531-552.
18. Hoekstra P., Deloney A. Dielectric properties of soil at UHF and microwave frequencies. *Journal of Geophysical Research*, v.79, N11, 1974, pp.1699-1708.
19. Houck R.T. Measuring Moisture Content Profiles Using Ground-Penetrating Radar. NWWA/EPA conf. 1984, San-Antonio, Texas, Feb.7-9, pp.637-653.
20. Liang Zie Hu. Imaging Pipelines in 3-D by Ground-Penetrating Radar. SEG, 62 Meeting, October 25-29, 1992, pp.352-355.
21. Stoffa P.L., Fokkema J.T., de Luna Freire R.M., Keissinger W.P. Split-step Fourier migration. *Geophysics*, v. 55, 1990, pp. 410-421.
22. Tillard S., Hollender F., Jullien F. Dispersion of GPR waves. M018, EAGE 58-th Conference and Technical Exhibition, 3-7 June, Amsterdam, 1996.
23. Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P. Electromagnetic determination of soil water content. Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, v. 16, N3, 1980, pp. 574-582.
24. Van Overmeeren R.A. Georadar for hydrogeology. EAEG 55 Meeting, Stavanger, Norway, 7-10 June 1993.
25. Van Overmeeren R.A. Monitoring of a water well field by Georadar. EAEG 56 Meeting, Vienna, Austria, 6-10 June 1994.
26. Wynn J.C. Archaeological prospection: an introduction to the spesial issue. *Geophysics*, v. 51, 1986, pp. 533-537.