

УДК 550.834

ББК 26.21

Т31

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. *Г. А. Пшеничный* (Гос. федеральное унитарное науч.-произв. предпр. по морским и геологоразведочным работам), д-р физ.-мат. наук, проф. *Л. А. Молотков* (С.-Петерб. отд. Математического ин-та им. В. А. Стеклова РАН)

*Рекомендован к изданию Ученым советом  
Государственного федерального унитарного  
научно-производственного предприятия  
по морским и геологоразведочным работам*

Телегин А. Н.

**Т31 Сейсморазведка методом преломленных волн. —**

СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2004. — 187 с.

ISBN 5-288-03683-7

Изложен новый подход к проведению сейсмических работ методом преломленных волн (МПВ). Он аналогичен существующему в настоящее время в методе отраженных волн и особенно касается методики проведения полевых работ и обработки материалов МПВ. Показано, что выбор методики работ определяется оптимальной регистрацией преломленных волн и возможностью их выделения (ослабления помех) в процессе обработки, а обработка материалов МПВ должна выполняться на основе миграции исходных записей, только в этом случае ее результаты содержат всю зарегистрированную информацию об упругих свойствах, определяемую по кинематическим и динамическим свойствам волн. Такой подход позволил пересмотреть соответственно технологию получения данных, последовательность обработки материалов и возможности применения МПВ при решении различных геологических задач.

Книга рассчитана на геофизиков и геологов, занимающихся проведением сейсмических работ МПВ, кроме того, она будет полезна всем специалистам, связанным с выполнением геофизических работ, и студентам геофизической специальности.

Библиогр. 39 назв. Табл. 5. Ил. 72.

ББК 26.21

© А. Н. Телегин, 2004

© Издательство  
С.-Петербургского  
университета, 2004

ISBN 5-288-03683-7

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
<b>Глава 1. Физические основы сейсмического метода преломленных волн .....</b>	<b>9</b>
1.1. Упругость вещества и методы ее изучения .....	—
1.2. Образование и распространение упругих волн .....	14
1.3. Основные сейсмические волны и методы сейсморазведки .....	15
1.4. Полезные сейсмические волны и помехи в МПВ .....	24
<b>Глава 2. Кинематика преломленных волн .....</b>	<b>33</b>
2.1. Кинематика головных волн .....	—
2.1.1. Годографы волн на сейсмограммах ОТВ и ОТП .....	34
2.1.2. Годографы волн на сейсмограммах ОСТ .....	38
2.1.3. Кинематика головных волн на наборах записей $L=\text{const}$ ...	40
2.1.4. Годографы головных волн в слоисто-однородной среде .....	41
2.2. Кинематика преломленных волн с прониканием .....	—
2.2.1. Годографы преломленных волн от криволинейной преломляющей границы .....	42
2.2.2. Годографы преломленно-дифрагированных волн .....	—
<b>Глава 3. Геологические основы метода преломленных волн .....</b>	<b>47</b>
3.1. Геологическая и акустическая слоистость разреза .....	—
3.2. Скоростные модели, используемые в МПВ .....	51
<b>Глава 4. Методика полевых работ МПВ .....</b>	<b>57</b>
4.1. Общие принципы выбора оптимальной методики сейсмических работ .....	58
4.2. Выбор размера бина (или шага изучения разреза) .....	61
4.3. Определение набора записей в бине .....	64
4.3.1. Возможности разделения регулярных волн .....	66
4.3.2. Требования к параметрам сейсмограмм ОТП (ОТВ) .....	71
4.4. Практические системы наблюдений МПВ .....	75
<b>Глава 5. Аппаратура и технические средства сейсморазведки МПВ .....</b>	<b>81</b>
5.1. Физическая характеристика сейсмических записей .....	—
5.2. Источники упругих колебаний для сейсморазведки МПВ .....	84
5.3. Приемные устройства .....	87

<b>Глава 6. Технология сейсмических работ МПВ</b> .....	89
6.1. Наземные сейсмические работы МПВ.....	90
6.2. Сейсмические работы МПВ на акваториях.....	93
6.2.1. Использование многоканальных буксируемых приемных устройств.....	95
6.2.2. Системы наблюдений при использовании одноканальных приемных устройств.....	97
6.3. Комбинированные системы наблюдений МОВ и МПВ.....	98
<b>Глава 7. Обработка сейсмических материалов</b> .....	100
7.1. Общая схема обработки сейсмических материалов.....	102
7.2. Использование различных преобразований сейсмических записей в процессе обработки.....	105
7.3. Операции обработки сейсмических записей преломленных волн.....	108
7.3.1. Изучение скоростей распространения преломленных волн.....	115
7.3.2. Учет сейсмического сноса преломленных волн (построение преломляющих границ).....	124
7.3.3. Выделение полезных волн.....	135
7.3.4. Повышение разрешенности сейсмических записей и расчет акустического разреза.....	140
7.4. Практический граф обработки материалов МПВ.....	144
<b>Глава 8. Геологическая интерпретация сейсмических результатов МПВ</b> .....	148
8.1. Требования к исходным материалам для геологической интерпретации.....	—
8.2. Соотношение между скоростями распространения упругих волн и акустической жесткостью.....	151
8.3. Связь упругих (акустических) и геологических свойств.....	152
8.4. Общая схема геологической интерпретации.....	153
8.5. Особенности технологии геологической интерпретации.....	155
<b>Глава 9. Применение сейсморазведки МПВ</b> .....	158
9.1. Основные задачи сейсмических исследований МПВ.....	159
9.2. Сейсмические работы в транзитной зоне суша-море.....	162
9.2.1. Каспийское море.....	164
9.2.2. Азовское море.....	170
9.3. Изучение земной коры на опорных профилях.....	171
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	181
<b>УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	184

Факт, не приведенный в схему, есть смутное представление, из которого нельзя сделать научного употребления.

В. О. Ключевский.  
«Терминология русской истории»

## ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования сейсморазведки является геологическая среда, целью изучения — ее акустические свойства, а в качестве метода используется распространение упругих волн. Поэтому сейсморазведку можно определить как самостоятельную научную дисциплину: геофизический метод изучения упругих (акустических) свойств геологической среды с помощью распространения сейсмических волн для прогнозирования ее строения и месторождений полезных ископаемых.

Результатом сейсмических работ должно быть получение детальных сведений об упругих (акустических) свойствах изучаемого геологического разреза. Акустические свойства, в свою очередь, связаны с составом и условиями осадконакопления отложений и образования пород, что используется при геологической интерпретации сейсмических результатов для прогнозирования геологического строения изучаемой территории и месторождений полезных ископаемых (нефти, газа, угля, руды и т. п.), определения прочностных свойств пород и насыщения водой при инженерно-гидрогеологических изысканиях.

В основе проведения сейсмических работ (полевых наблюдений, обработки получаемых материалов и интерпретации результатов) лежит физическое представление о волновой картине, возникающей в некоторой геологической среде при возбуждении в ней упругих волн. Хотя геологическая среда по упругим свойствам, как правило, очень сложная — неоднородная и анизотропная, ее можно

с разной степенью приближения представить в виде упрощенных упругих (акустических) моделей, в которых распространение волн можно описать простыми физическими законами.

При распространении упругих колебаний в геологических средах образуется большое число волн. В разведочных целях используются в основном три вида, обусловленных различными физическими явлениями на границах пластов: отраженные, преломленные (головные и с прониканием) и преломленные проходящие. По типу колебаний все эти волны могут быть продольными или поперечными, а при изменении типа колебаний на акустических границах — также обменными.

Три физических явления на границах акустических сред и два типа колебаний, включая смену типа волны, определяют возможности сейсморазведки при изучении упругих свойств геологических сред. Соответственно существует три основных сейсмических метода: метод отраженных волн (МОВ), метод преломленных волн (МПВ) и метод прямых (проходящих преломленных) волн — сейсмическая томография (СТ).

Метод преломленных волн широко применяется при изучении верхней части геологического разреза (ВЧР) для определения глубины залегания, рельефа и разрывных нарушений фундамента, обнаружения соляных куполов, а также для оценки мощности и упругих свойств земной коры и др.

Сейсморазведка методом преломленных волн начала применяться в геологии с 20-х годов прошлого столетия. К началу 50-х годов были разработаны основы методики работ и кинематической обработки получаемых материалов, которые используются до настоящего времени. Результаты работ МПВ обычно представляются в виде толстослойной модели упругих свойств: сейсмических разрезов, на которых изображаются преломляющие границы и приводятся значения граничных (пластовых) скоростей. Хотя неоднократно предпринимались попытки получения волновых изображений геологического разреза по преломленным волнам, результаты обработки пока представляются с использованием только кинематических параметров волн.

Применение метода отраженных волн началось значительно позднее МПВ, и в обработке материалов также длительное время использовалась только кинематика волн. Быстрое развитие метода привело к использованию в обработке кинематических и динамических свойств отраженных волн и резкому повышению его эффек-

тивности. В настоящее время объемы работ МОВ в десятки раз превышают объемы работ МПВ.

В книге представлен новый подход к проведению работ МПВ. Этот подход обусловлен возможностями обработки материалов МПВ на основе миграции записей с использованием динамики и кинематики волн и геологической интерпретации получаемых результатов. Результаты работ любого метода сейсморазведки должны представляться с использованием кинематических и динамических свойств записей. При этом по кинематике волн определяют толстослойное приближение упругих свойств среды, а динамика позволяет найти детали их изменения. С этих позиций и изложено применение сейсморазведки МПВ. В процессе обработки на основе миграции записей на результирующем разрезе представлена вся зарегистрированная информация о преломленных волнах — кинематическая и динамическая. Обработка материалов МПВ во многом аналогична обработке материалов МОВ, и результат обработки представляется также в виде акустического или динамического разреза (волнового изображения геологического разреза). Получение однотипных результатов МОВ и МПВ упрощает комбинированное применение методов и хорошо вписывается в концепцию многоволновой сейсморазведки.

Большое внимание уделено выбору методики работ в зависимости от сейсмогеологических условий изучаемых площадей, проведена систематизация применяемых систем наблюдений и обоснована общая схема выбора оптимальной методики сейсмических работ МПВ.

Дано описание регистрируемой волновой картины в МПВ, изложены кинематические и динамические особенности полезных волн и помех. Обоснована общая схема и последовательность обработки сейсмических материалов; отмечена специфика обработки сейсмических записей преломленных волн, приведены результаты сейсмических работ МПВ.

По ряду причин многие вопросы методики работ и обработки материалов МПВ изложены в сравнении с МОВ. Во-первых, существует большая аналогия между методами, а в МОВ эти вопросы хорошо разработаны, во-вторых, объемы работ МОВ и соответственно число специалистов, занятых его применением, несравнимо больше, чем использующих МПВ. В-третьих, специалистам МПВ труднее выйти за рамки привычной кинематической обработки материалов, чем занимающимся динамической обработкой МОВ, а

последним приводимые аналогии помогут быстрее освоить методику работ и обработку материалов МПВ.

Большинство приведенных в книге иллюстраций подготовлено по материалам ГНПП «Севморгео», руководству которого автор выражает свою признательность.

Автор выражает также благодарность своим коллегам: И. М. Тихоновой, Т. С. Сакулиной и Ю. В. Рослову за помощь в проведении исследований и обсуждении полученных результатов.

## Глава 1

# ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО МЕТОДА ПРЕЛОМЛЕННЫХ ВОЛН

Рассмотрены принципы распространения упругих колебаний, даны общие представления о физических основах сейсмического метода преломленных волн и приведены основные понятия и определения, необходимые для дальнейшего изложения.

### 1.1. УПРУГОСТЬ ВЕЩЕСТВА И МЕТОДЫ ЕЕ ИЗУЧЕНИЯ

Сейморазведка изучает упругие свойства горных пород методами, основанными на распространении упругих волн в земной коре, поэтому необходимо определить понятие упругости вещества.

Если к некоторому объему вещества приложить силу, то, во-первых, оно будет противодействовать этой силе, во-вторых, изменит объем и (или) форму, т. е. произойдет его относительная деформация. После прекращения такого воздействия силы различные вещества могут вести себя по-разному.

Способность вещества восстанавливать объем и форму (твердые вещества) или только объем (жидкости и газы) после прекращения воздействия внешних сил называется упругостью, а деформации — упругими. Среду называют абсолютно упругой, если она находится в естественном состоянии (когда напряжения и деформации равны нулю) и в которое возвращается, если устранить приложенные силы. Вещество называют пластичным, а происходящие в нем деформации неупругими, если после прекращения действия

силы оно сохраняет новую форму или объем. Упругость — это физическое свойство горных пород, которое определяется взаимодействием между атомами и молекулами и зависит от состава вещества. Упругие свойства могут изменяться в объеме вещества и в зависимости от направления измерения.

По характеру изменения упругих свойств геологические породы можно разделить на однородные и неоднородные, изотропные и анизотропные. Однородность среды означает, что в любой ее точке свойства одинаковы. Применительно к сейсморазведке однородность можно определить следующим образом: если при измерениях на малых и больших интервалах свойства среды одинаковы, то ее можно считать однородной.

Изотропность вещества свидетельствует о независимости его свойств от направления измерения, и наоборот, если свойства вещества зависят от направления измерения, оно обладает анизотропией. В анизотропной среде свойства могут изменяться в различных направлениях, но в реальных средах имеют определенную закономерность, например, изменение упругих свойств происходит только в двух или трех направлениях, что связано с геологическими особенностями осадконакопления и образования пород.

Конечно, однородное, изотропное и идеально упругое вещество — это математическая и физическая идеализация, которая позволяет относительно просто описать особенности распространения упругих волн и определить их связь с упругими параметрами среды. Реальные среды неоднородны и анизотропны, анизотропия пород является их дополнительным параметром и может использоваться при геологической интерпретации полученных результатов.

Изучать упругие свойства вещества (в том числе горных пород) можно различными методами: под действием статических нагрузок, резонансным методом (по определению собственной частоты колебаний образца — стержня) и, наконец, по распространению упругих волн. Статические и резонансные методы определения упругих свойств горных пород широко используются в инженерной геологии (при промышленном и гражданском строительстве), когда можно непосредственно отобрать образцы исследуемых пород. При решении задач изучения глубинного строения геологических сред в связи с поисками месторождений полезных ископаемых статические методы просто не применимы, и упругие свойства геологических сред можно определять, изучая распространение в них упругих колебаний (сейсмических волн).

Для задач сейсморазведки представляет интерес изучение акустических свойств геологической среды по распространению упругой деформации в результате кратковременного воздействия силы в некоторой точке среды на поверхности или внутри нее. С этой целью необходимо аналитически выразить связь между кинематическими и динамическими параметрами сейсмических волн (упругих деформаций, распространяющихся в среде) и упругими свойствами пород.

В качестве примера рассмотрим очень простой случай распространения упругих колебаний в стержне из однородного упругого изотропного вещества [33]. Несмотря на идеализированность условий примера он позволяет понять смысл происходящих процессов и, пользуясь методом аналогий, перейти к изучению распространения волн в реальных условиях.

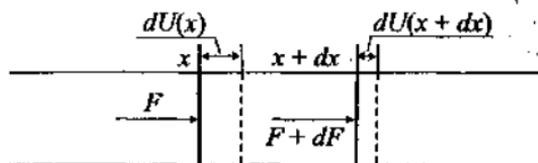


Рис. 1.1. К выводу уравнения распространения плоской упругой волны.

Вырежем (условно) из сплошной среды цилиндр (стержень) бесконечной длины, а в нем выберем малый элемент  $dx$  и к сечению его поверхности приложим на некоторый момент времени силу  $F$  (рис. 1.1). Рассмотрим деформацию от приложенной силы. По закону Гука деформация грани  $x$  под действием возникшего напряжения

$$F/S = K \frac{\partial U}{\partial x},$$

где  $K$  — упругий параметр (в данном случае). На грань  $x + dx$  будет действовать уже сила

$$F + dF = F + \frac{dx \partial F}{\partial x},$$

которая вызовет ее деформацию, также пропорциональную напряжению:

$$(F + dx \partial F / \partial x) / S = K \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{K dx \partial^2 U}{\partial x^2}.$$

Нас интересует деформация самого элемента без учета его абсолютного перемещения, т. е. изменение его размеров. Деформация за счет изменения силы  $dF$  (относительное перемещение одной грани относительно другой) пропорциональна изменению силы:

$$S \frac{K dx \partial^2 U}{\partial x^2} = dF.$$

Вместе с тем под действием силы  $dF$  смещение одной грани относительно другой происходит по второму закону Ньютона с ускорением  $a$  и пропорционально массе вещества  $m$ :

$$dF = ma = \rho S dx \partial^2 U / \partial t^2,$$

где  $\rho$  — плотность вещества, поэтому мы можем приравнять эти две силы и получим уравнение движения упругой волны вдоль стержня со скоростью  $V_p = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$ :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \left( \frac{1}{V_p^2} \right) \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}.$$

При этих простых условиях мы получили динамическое уравнение распространения упругих волн, в частности, волн сжатия–растяжения. Аналогично можно вывести уравнение распространения деформаций сдвига вдоль стержня со скоростью  $V_s = \sqrt{\frac{N}{\rho}}$ :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \left( \frac{1}{V_s^2} \right) \frac{\partial^2 U}{\partial t^2},$$

где  $N$  — упругий параметр.

Очевидно, что рассмотренный случай описывает распространение плоских волн в однородной среде, так как уравнение не изменится, если мы будем увеличивать диаметр стержня до бесконечности.

Полученные результаты, пользуясь методом аналогий, можно распространить и на геологические среды. Если на некоторой площади поверхности Земли перпендикулярно (или касательно) к ее поверхности приложить силу, вызывающую деформацию растяжения–сжатия и сдвига, то эти деформации будут распространяться в среде независимо друг от друга с разными скоростями:  $V_p$

и  $V_s$  соответственно. Тогда динамические уравнения распространения плоских упругих волн будут иметь одинаковый вид для продольных и поперечных волн соответственно:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \left( \frac{1}{V_p^2} \right) \frac{\partial^2 U}{\partial t^2},$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \left( \frac{1}{V_s^2} \right) \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}.$$

По аналогии с плоским случаем можно записать уравнения для упругой однородной изотропной среды при возбуждении продольных и поперечных волн в некоторой точке ее поверхности — так называемые однородные волновые уравнения [10, 36]:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \left( \frac{1}{V_p^2} \right) \frac{\partial^2 U}{\partial t^2},$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \left( \frac{1}{V_s^2} \right) \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}.$$

Эти уравнения имеют большое значение при изучении распространения упругих волн в геологических средах несмотря на то, что получены для идеальных условий. Они могут использоваться не только для однородных, но и в случае слоисто-однородных, а также и для непрерывных сред, когда их неоднородность (например, градиент скорости) мала, и среду можно считать однородной с малой погрешностью.

К упругим свойствам горных пород относятся скорость распространения волн (продольных  $V_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$  и поперечных  $V_s = \sqrt{\mu/\rho}$ ) и акустическая жесткость (импеданс — сопротивление, волновое сопротивление) — произведение скорости на плотность пород ( $\rho V_p$  и  $\rho V_s$ ), где  $\lambda$  и  $\mu$  — упругие константы Ламе. Упругие (акустические свойства) геологической среды входят в качестве параметров в волновые уравнения и поэтому их можно определить по распространению волн (по временам и амплитудам) в процессе проведения сейсмических работ.

Решение однородных волновых уравнений может быть выполнено различным образом, в аналитическом виде оно выражается формулой (интегралом) Кирхгофа [2, 10, 28], которая позволяет

найти амплитуду волны в любой точке среды по известному распределению акустических свойств среды и положению источников на ее поверхности в нулевой момент времени:

$$U(M, t) = \frac{1}{4\pi} \iint_s \left( \frac{1}{r} \frac{dU}{dn} + \frac{1}{r^2} U + \frac{1}{Vr} \frac{dU}{dt} \right) \cos(n, r) dS,$$

где  $M(x, y, z)$  — координаты точки в среде;  $r$  — путь, пройденный волной;  $\mathbf{n}$  — нормаль к дневной поверхности;  $V$  — скорость распространения волн. Интеграл вычисляется по поверхности распределения источников.

Физический смысл интеграла Кирхгофа заключается в возможности определить волновую картину в среде для любого начального расположения источников, т. е. он является аналитическим выражением принципа Гюйгенса—Френеля с учетом динамики волн. С его помощью можно решать прямые и обратные задачи распространения упругих волн в среде.

## 1.2. ОБРАЗОВАНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ УПРУГИХ ВОЛН

При распространении упругих волн рассматривается линейная связь между напряжением и деформациями, нелинейность учитывается только в виде явлений поглощения и рассеяния волн. Основные нелинейные процессы в сейсморазведке происходят в некоторой области вблизи источника, где напряжения приводят к разрушению пород.

Для описания особенностей распространения упругих волн в акустических средах вводятся некоторые параметры: изохрона, фронт, луч, период и частота колебаний, длина волны, кажущаяся скорость и др.

Изохрона волны — поверхность в пространстве, соединяющая точки среды с одинаковым временем ее распространения. Изохрону вступления называют передним фронтом волны. Линии, исходящие из источника и ортогональные изохронам, называют лучами распространения волны.

Колебательный процесс в среде  $A(x, t)$  при распространении упругих волн можно рассматривать в зависимости от времени  $A(t)$  для некоторой точки (при  $x = \text{const}$ ) и в некоторой области среды  $A(x)$  для постоянного времени ( $t = \text{const}$ ).

В первом случае колебательный процесс можно охарактеризовать такими параметрами (рис. 1.2), как видимый (преобладающий) период колебаний  $T_n$ , преобладающая частота колебаний  $f_n = 1/T_n$ , или определить амплитудную и фазовую характеристики колебательного процесса в зависимости от частоты.

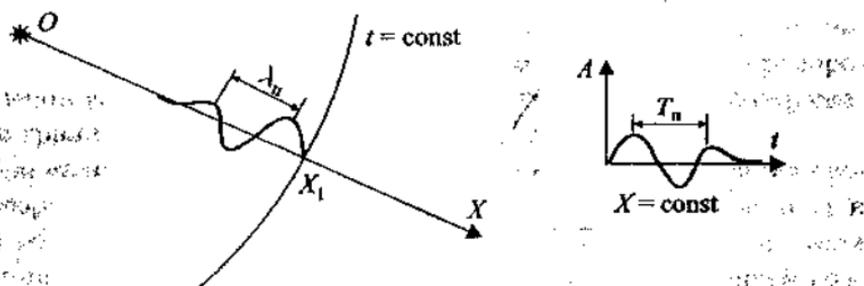


Рис. 1.2. Профиль и график колебаний упругой волны.

Во втором случае рассматривается профиль волны и вводятся аналогичные параметры: видимая (преобладающая) длина волны  $\lambda_n$ , или волновое число (пространственная частота)  $K_n = 1/\lambda_n$ .

Связь между временными и пространственными параметрами осуществляется через скорость распространения волн: длина волны  $\lambda = VT$ , или волновое число  $K = 1/\lambda = f/V$ . Скорость, измеренная вдоль направления, отличного от луча распространения волны, например, по линии наблюдений на дневной поверхности, называется кажущейся скоростью вдоль этого направления, соответственно вводится параметр — кажущаяся длина волны  $\lambda_k = V_k T$ , или  $K = f/V_k$ .

### 1.3. ОСНОВНЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ И МЕТОДЫ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Рассмотрим распространение упругих волн в слоистых изотропных геологических средах, в частности, в случае границы между двумя однородными пластами — пласт на полупространстве.

При падении продольной ( $P$ ) или поперечной ( $S$ ) волн на границу упругих сред под некоторым углом (рис. 1.3) происходит несколько физических явлений: отражение монотипной волны, возможно, с изменением ее типа, а также преломление — прохождение в нижележащую среду — как монотипной волны, так и с изменением

ем типа колебаний. Все лучи — падающий, отраженный и преломленный (проходящий), включая и лучи обменных волн, — лежат в одной плоскости, в этой же плоскости расположена и нормаль к поверхности раздела в точке падения луча.

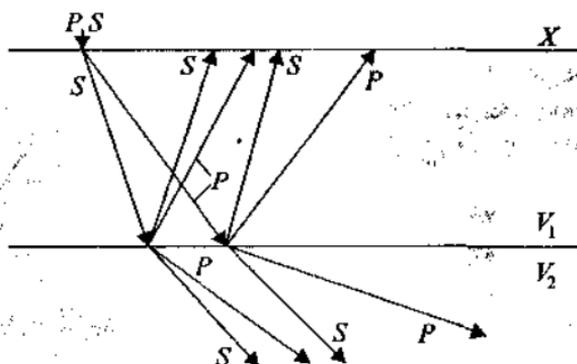


Рис. 1.3. Образование отраженных и проходящих волн в двухслойной среде со скоростями распространения упругих волн  $V_1$  и  $V_2$  соответственно.

С геометрических позиций эти явления можно рассматривать, используя принцип Гюйгенса—Френеля. Углы падения, отражения и преломления связаны между собой соотношением Снеллиуса—Декарта:

$$\frac{\sin \alpha}{V_1} = \frac{\sin \beta}{V_2},$$

Для образования отраженной волны необходимо изменение акустической жесткости (произведение плотности на скорость) на границе сред. Коэффициент отражения сложным образом зависит от перепада акустической жесткости на границе и угла падения волны.

При нормальном падении волны на границу коэффициент отражения определяется простой формулой

$$K_n = \frac{\rho_n V_n - \rho_{n-1} V_{n-1}}{\rho_n V_n + \rho_{n-1} V_{n-1}},$$

где  $\rho V$  — акустическая жесткость соответственно нижнего и верхнего пластов.

На основании этой формулы определяется изменение акустических свойств геологического разреза по отраженным волнам. При известном коэффициенте отражения и акустических свойствах верхнего слоя можно вычислить акустическую жесткость нижнего слоя, т. е. последовательно определить изменение акустических свойств с глубиной.

Если отраженные волны зарегистрированы, в частности, на поверхности верхнего слоя, то по ним можно найти скорости распространения упругих волн в покрывающей среде, глубину до отражающей границы и изменение акустических свойств на ней.

При наличии в среде неоднородностей (зоны выклинивания слоев, ребра разорванных пластов, локальные геологические тела и т. д.) образуются также дифрагированные волны. В соответствии с принципом Гюйгенса—Френеля каждая точка отражающей границы является точкой дифракции, поэтому явления отражения и дифракции связаны между собой. При переходе от плоской отражающей границы к выпуклой с постепенным уменьшением ее радиуса кривизны происходит сближение голографов отраженной и дифрагированной волн. Все касающееся изучения акустических свойств по отраженным волнам справедливо и для дифрагированных волн, поэтому при исследовании акустических свойств геологических сред гладкие границы изучаются по отраженным волнам, неоднородности — по дифрагированным.

Для двухслойной среды с большим значением скорости в нижнем слое (рис. 1.4) угол преломления  $\beta$  проходящей волны будет больше угла падения  $\alpha$ . С увеличением угла падения наступает момент, когда проходящая преломленная волна будет распространяться под углом  $90^\circ$ , т. е. скользить вдоль кровли слоя. Это яв-

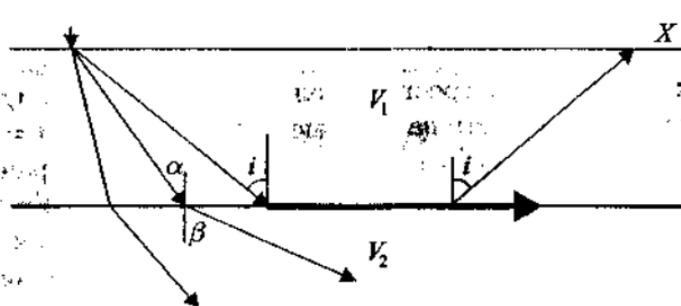


Рис. 1.4. Образование преломленной (головной) волны.

ление известно в физике как полное внутреннее отражение. Угол подхода падающего луча называется углом полного внутреннего отражения, или критическим углом  $i$ .

При скольжении по кровле высокоскоростного слоя энергия волны распространяется в верхнее полупространство и может быть зарегистрирована на поверхности среды. Эту преломленную волну называют головной и используют для изучения акустических свойств геологических сред. В случае криволинейных границ в соответствии с принципом Ферма происходит явление проницания волн, а при нарастании скорости в преломляющем пласте еще и их рефракция (рис. 1.5). В реальных геологических средах редко существуют условия для образования головных волн, так что практически регистрируемые преломленные волны почти всегда подвержены проницанию и рефракции. С помощью преломленных (головных и с проницанием) волн изучаются глубина и рельеф преломляющих границ, скорости их распространения в преломляющих пластах, а также перепад акустической жесткости на преломляющей границе.

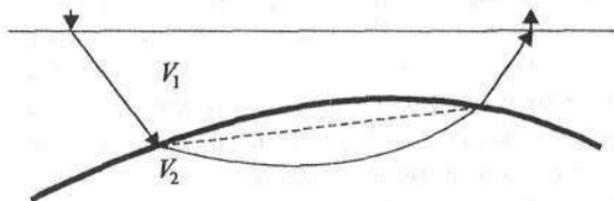


Рис. 1.5. Проницание и рефракция преломленных волн.

Коэффициенты прохождения преломленных волн определяется следующими выражениями [2]:

$$K_n^p = 1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta\rho}{\rho} + \left( \frac{1}{2 \cos i} - 1 \right) \frac{\Delta\alpha}{\alpha}, \quad K_n^s = 1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta\rho}{\rho} + \left( \frac{1}{2 \cos j} - 1 \right) \frac{\Delta\beta}{\beta},$$

для продольных и поперечных волн соответственно, где  $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$  — скачок плотности на границе;  $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$ ,  $\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1$  — скачки скорости продольных и поперечных волн на границе;  $\rho = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$ ,  $\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$ ,  $\beta = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2}$ ,  $i = \frac{i_1 + i_2}{2}$ ,  $j = \frac{j_1 + j_2}{2}$  — средние значения параметров для двух полупространств;  $i_1$  — угол падения продольной волны;  $i_2$  — угол ее преломления;  $j_1$  — угол падения поперечной волны;  $j_2$  — угол преломления той же волны.

Общие выражения для коэффициентов прохождения волн можно несколько упростить:

$$K_n^p = 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right) + \frac{\Delta\alpha}{2\alpha} \operatorname{tg}^2 i, \quad \text{или} \quad K_n^p = K_{n0}^p + \frac{\Delta\alpha}{2\alpha} \operatorname{tg}^2 i,$$

где  $K_{n0}^p$  — коэффициент прохождения при падении продольной волны перпендикулярно к границе ( $i_1 = i_2 = 0$ ).

Аналогично для поперечных волн

$$K_n^s = K_{n0}^s + \frac{\Delta\beta}{2\beta} \operatorname{tg}^2 j,$$

где  $K_{n0}^s$  — коэффициент прохождения при падении поперечной волны перпендикулярно к границе ( $j_1 = j_2 = 0$ ).

При падении волны перпендикулярно к границе  $K_{n0}^p = 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right)$  и  $K_{n0}^s = 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta\beta}{\beta} \right)$  — коэффициенты ее прохождения для продольной и поперечной волн соответственно, где  $\frac{1}{2} \left( \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right)$  и  $\frac{1}{2} \left( \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta\beta}{\beta} \right)$  — коэффициенты отражения по нормали к границе продольных и поперечных волн соответственно.

Преломленные проходящие волны используются для изучения упругих свойств геологической среды (см. рис. 1.3) также в сейсмической томографии. Если размещать источники и приемники упругих колебаний в разных точках среды, то для каждой пары источник–приемник по известному расстоянию между ними и временам прихода волн можно определить скорость распространения волн (интервальную скорость) или по изменению амплитуд оценить поглощение энергии. Совместная обработка кинематических и динамических параметров сейсмических волн позволяет изучить изменение упругих свойств в исследуемом объеме среды.

В однородной упругой изотропной среде плоские волны распространяются без геометрического расхождения энергии. Для таких волн решение динамического уравнения представляется в следующем виде:

$$A = A_0 f(t - R/V),$$

где  $A_0$  — начальная амплитуда волны;  $t$  — время ее распространения;  $R$  — путь волны;  $V$  — скорость ее распространения. Конечно, создать пространственную плоскую волну нереально; на практике используются сферические волны от точечного источника, которые затухают по мере их распространения.

Волны с цилиндрическим фронтом уже испытывают геометрическое расхождение по мере распространения от источника. В качестве примера рассмотрим распространение волн от источника в виде бесконечной нити. На некотором расстоянии  $R_0$  от источника, где связь между напряжением и деформацией можно считать линейной, энергия упругих волн сосредоточена в объеме между цилиндрами с длиной внешней окружности  $2\pi R_0$  и расстоянием между ними  $dR$ :  $V_0 = 2\pi R_0 dR$ ; на расстоянии  $R$  от источника та же энергия заключена в объеме между цилиндрами с длиной внешней окружности  $2\pi R$  и той же толщиной  $dR$ :  $V = 2\pi R dR$ . Плотность энергии упругих волн в кольце обратно пропорциональна его объему и убывает с увеличением расстояния от источника:  $P = P_0/R$ . Так как энергия пропорциональна квадрату амплитуд колебаний, можно определить уменьшение амплитуд колебаний с удалением от источника:  $A = A_0 / \sqrt{R}$  (все константы введены в  $A_0$ ).

При распространении волн от точечного источника в упругой однородной и изотропной среде энергия их сосредоточена в сферическом кольце с поверхностью  $4\pi R^2$  и толщиной  $dR$ . Плотность ее будет убывать обратно пропорционально квадрату расстояния от источника  $P = P_0 R_0^2 / R^2$ , а амплитуда  $A = A_0 / R$ .

Преломленные волны при распространении испытывают более резкое затухание по сравнению со сферическими волнами. При расстояниях приемника от источника  $L \geq h_0 + h$  (рис.1.6) и малых углах наклона границы затухание амплитуды преломленной (головной) волны можно приближенно выразить следующей формулой [2]:

$$A = A_0 / \sqrt{R} \sqrt{L^3} \approx A_0 / L^2 .$$

Это затухание существенно сильнее, чем у отраженных (сферических) волн, в частности, у закритических отраженных волн, которые по кинематическим свойствам близки к преломленным волнам.

Вследствие геометрического расхождения энергии происходит уменьшение амплитуд колебаний без изменения их формы. Для плоской волны нет геометрического расхождения энергии, для цилиндрических волн затухание обратно пропорционально корню квадратному от расстояния, для сферических волн затухание амплитуд обратно пропорционально пройденному пути, а для головных — обратно пропорционально квадрату этого пути.

Идеально упругих сред в природе не существует, в реальных

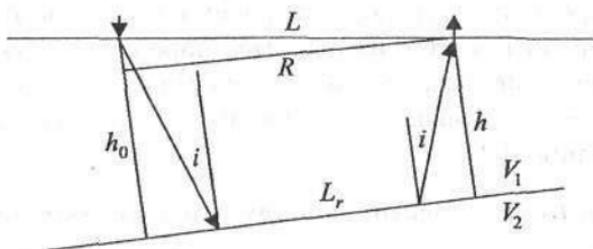


Рис. 1.6. К затуханию преломленной (головной) волны.

средах энергия колебаний расходуется на трение и переходит в теплоту. Это явление называют поглощением упругих волн, коэффициент поглощения определяется как доля энергии, затраченная при распространении их на расстояние, равное длине волны. На одинаковом пути поглощение зависит от того, сколько длин волн укладывается в нем, поэтому высокие частоты поглощаются сильнее, и волны относительно обогащаются низкими частотами.

В реальных средах существует также эффект рассеяния энергии упругих волн на неоднородностях среды, при этом большему рассеянию подвергаются также высокочастотные колебания. Явления поглощения и рассеяния энергии трудно разделить практически, и они часто описываются общим коэффициентом.

В общем виде изменение амплитуд проходящих волн в слоисто-однородных средах выражается следующей формулой:

$$A = \frac{A_0(t - L/V)}{L^2} e^{-\frac{(\alpha+\beta)L}{\lambda}} \prod_{i=1}^n K_i,$$

где множитель  $1/L^2$  определяет геометрическое расхождение энергии преломленных волн с расстоянием:  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты поглощения и рассеяния энергии соответственно;  $\lambda$  — длина волны, а  $\prod K_i$  — произведение коэффициентов прохождения энергии на акустических границах.

В однородно-слоистых средах с перепадом акустической жесткости на границах слоев образуются отраженные волны от кровли каждого слоя, которые используются для их изучения. Условием образования преломленных (головных) волн является существование слоев с повышенными скоростями, по сравнению с вышележащими пластами. При увеличении скорости в каждом нижележащем слое образуются головные волны по их кровле, в общем случае с проницанием и рефракцией.

Для однородных сред скорости распространения продольных и поперечных волн вместе с плотностью пород полностью описывают их упругие свойства, по ним можно определить любые другие упругие константы. Связь между разными упругими параметрами приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Соотношение между упругими константами

$\lambda, \mu$	$E, \sigma$	$K, \mu$	$V_p, V_s$	$\gamma, V_s$
$\lambda$	$\frac{\sigma E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}$	$K - \frac{2}{3}\mu$	$\rho(V_p^2 - 2V_s^2)$	$\rho(\gamma^2 - 2)V_s^2$
$\mu$	$\frac{E}{2(1+\sigma)}$	$\mu$	$\rho V_s^2$	$\rho V_s^2$
$\frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{\lambda+\mu}$	$E$	$\frac{3K\mu}{K+\frac{2}{3}\mu}$	$\frac{\rho V_p^2(3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}$	$\frac{\rho V_s^2(3\gamma^2 - 4)}{\gamma^2 - 1}$
$\frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)}$	$\sigma$	$\frac{3K-2\mu}{2(3K+\mu)}$	$\frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2(V_p/V_s)^2 - 2}$	$\frac{\gamma^2 - 2}{2(\gamma^2 - 1)}$
$\lambda + \frac{2}{3}\mu$	$\frac{1}{3} \frac{E}{1-2\sigma}$	$K$	$\rho(V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2)$	$\rho V_s^2(\gamma^2 - \frac{4}{3})$
$\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}}$	$\sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\sigma)}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$	$\sqrt{\frac{K+\frac{4}{3}\mu}{\rho}}$	$V_p$	$\gamma V_s$
$\sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$	$\sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\sigma)}}$	$\sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$	$V_s$	$V_s$
$\sqrt{\frac{\lambda}{\mu} + 2}$	$\sqrt{\frac{2(1-\sigma)}{1-2\sigma}}$	$\sqrt{\frac{K}{\mu} + \frac{4}{3}}$	$\frac{V_p}{V_s}$	$\gamma$

Примечание:  $\lambda$  и  $\mu$  — постоянные Ламе;  $E$  — модуль Юнга;  $\sigma$  — коэффициент Пуассона;  $K$  — модуль всестороннего сжатия;  $V_p$  и  $V_s$  — скорости распространения продольных и поперечных волн;  $\rho$  — плотность пород;  $\gamma$  — отношение скоростей распространения продольных и поперечных волн.

Для многих упругих сред  $\sigma \approx 0,25$  ( $\lambda \approx \mu$ ) и  $\gamma \approx \sqrt{3} = 1,73$ , в жидкостях и газах поперечные волны не распространяются ( $V_s = 0$ ), при этом  $\mu = 0$  и  $E = 0$ , а  $\sigma = 0,5$ . Поэтому коэффициент Пуассона чувствителен к заполнению пористых отложений жидкостью и газом.

В случае неоднородных и анизотропных сред число параметров для описания упругих свойств среды резко увеличивается [10, 36].

При распространении упругих колебаний в геологических средах образуется большое число волн. В разведочных целях используются в основном три вида волн, обусловленных различными физическими явлениями на границах пластов: отраженные волны, пре-

ломленные (головные и с проницанием) волны и преломленные — проходящие волны. Три физических явления на границах акустических сред и два типа колебаний, включая и смену типа волны, определяют возможности сейсморазведки при изучении упругих свойств геологических сред. По типу колебаний все эти волны могут быть продольными или поперечными, а при изменении типа колебаний на акустических границах — также обменными. Соответственно используются три основных сейсмических метода: на основе отражения — метод отраженных волн (МОВ), на явлении полного внутреннего отражения (и с проницанием) — метод преломленных волн (МПВ), на основе прямых (преломленных проходящих) волнах — сейсмическая томография (СТ).

Существует множество методов изучения упругих (акустических) свойств, основанных на измерении времени распространения прямых проходящих волн. Все они объединяются под общим названием — сейсмическая томография (от греч. *tomos* — слой, «ломать»), т. е. послойное изучение геологического разреза. Приемы сейсмической томографии могут использоваться для обработки отраженных, преломленных или рефрагированных волн, наблюдаемых на дневной поверхности, при решении обратных кинематических задач.

Возможно также комплексирование различных методов. Технологически наиболее доступны для возбуждения и регистрации сейсмических волн поверхность Земли (или ее верхняя часть) при наземных работах или водный слой при морских.

Применения каждого сейсмического метода предполагает определенное изменение акустических свойств геологической среды (или предъявляет некоторые требования к модели акустической среды). Возможности методов зависят, в первую очередь, от соответствия реального изменения акустических свойств изучаемой среды требованиям модели, используемой в данном методе.

Большинству реальных сред, и, в первую очередь, осадочные отложения, по характеру изменения упругих свойств с глубиной и по площади более всего удовлетворяют требованиям модели, используемой в методе отраженных волн, поэтому сейсморазведка МОВ имеет наибольшие возможности при изучении таких сред и применяется в преобладающих объемах при поисках месторождений нефти и газа.

Характер изменения акустических свойств в изучаемой среде не накладывает ограничений на применение сейсмической томогра-

фии (например, не обязательно существование акустических границ), но возникают специфические требования к методике и технологии проведения работ. В общем случае в сейсмической томографии источники и приемники должны быть расположены по разные стороны от изучаемого объекта, что обуславливает необходимость иметь скважины или шахты и т. п.

Для образования преломленных волн требования к изменению скоростей в геологической среде более жесткие — изменение скоростей должно соответствовать модели слоисто-однородной среды при увеличении скоростей с глубиной. Головные волны образуются только на плоских границах первого рода (скачок скоростей без нарастания в преломляющем пласте). Изменение упругих свойств в реальных средах редко удовлетворяет физическим требованиям образования головных волн. Неучет явлений проницания и рефракции ограничивает эффективность применения сейсмического метода преломленных волн. Поэтому с развитием МОВ использование головных волн резко уменьшилось, и в настоящее время применение МПВ ограничено.

#### **1.4. ПОЛЕЗНЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ И ПОМЕХИ В МПВ**

Для всестороннего изучения упругих свойств геологической среды (скорость продольных и поперечных волн, акустическая жесткость) желательно использовать разные сейсмические методы и исследовать волны разных типов — продольные, поперечные, обменные, т. е. применять многоволновую сейморазведку. Это позволит надежнее прогнозировать геологическое строение изучаемых территорий и возможные месторождения полезных ископаемых. В частности, скорости поперечных волн очень чувствительны к заполнению пористых отложений водой, нефтью или газом, что очень важно для прогнозирования залежей. Однако по ряду технических и технологических причин сейсмические исследования разными методами проводят, как правило, отдельно и осуществляют комплексную интерпретацию полученных результатов. Даже в случае применения комбинированных систем наблюдений МОВ и МПВ обработка полученных с их помощью материалов проводится отдельно. Кроме того, в каждом сейсмическом методе используют пока только определенный класс волн, поэтому происходит деление

регистрируемой волновой картины на полезные волны и помехи. При этом полезные волны в одном методе могут быть помехами в другом.

В методе преломленных волн в качестве полезных чаще всего используют продольные преломленные и преломленно-дифрагированные волны (головные и с прониканием), хотя иногда используют обменные и реже поперечные колебания. Это означает, что методика работ и обработка материалов должны быть направлены на возбуждение, регистрацию и использование только полезных волн. Все прочие сейсмические волны относят к помехам. Особо подчеркнем, что дифрагированные волны относят к полезным волнам как в МОВ, так и в МПВ.

При любых сейсмических работах в реальных условиях регистрируется большое число регулярных и случайных сейсмических волн (полезных и помех) различного происхождения. Регулярные волны прослеживаются на некотором интервале измерений и могут описываться такими параметрами, как длина волны и ее кажущаяся скорость. К случайным помехам относятся сейсмические колебания естественного и промышленного происхождения с радиусом корреляции меньше шага измерений. К случайным колебаниям на море относятся также помехи, вызванные техническими средствами и технологией работ.

Основные сейсмические помехи являются регулярными волнами и обусловлены физическими явлениями при образовании и распространении упругих колебаний в сложной геологической среде, в частности, в ее самой верхней части, а также типом и положением источника возбуждения волн.

При всем многообразии природы и свойств регулярных сейсмических волн-помех их можно условно разделить по основному параметру — значениям кажущихся скоростей на три группы: низко-, средне- и высокоскоростные помехи. За среднескоростные помехи обычно принимают волны, у которых кажущиеся скорости примерно соответствуют минимальным кажущимся скоростям полезных волн, т. е. примерно равны скоростям распространения волн в изучаемой среде. Это условная, но важная граница. Помехи, у которых кажущиеся скорости ниже скоростной характеристики среды, относятся к низкоскоростным, а остальные — к высокоскоростным волнам.

Деление регулярных волн-помех по значениям кажущихся скоростей связано и с физическими особенностями их образования и

распространения. Низкоскоростные помехи обусловлены положением источника относительно зоны малых скоростей (ЗМС) и зоны пониженных скоростей (ЗПС) — это звуковые и в основном поверхностные волны. Помехи с высокими кажущимися скоростями обусловлены акустическими неоднородностями глубинного геологического разреза и близки по свойствам к полезным волнам. К высокоскоростным помехам относятся многократные (в МОВ это полно- и частично-кратные), обменные и другие волны. Среднескоростные помехи занимают промежуточное положение и образуются в глубинной части разреза.

Первая группа помех связана с существованием верхней части разреза (ВЧР) на суше или водного слоя на море. На суше и на море характер и особенности глубинного геологического строения площадей и соответственно задачи исследований одинаковы, но сейсмические работы на море отличаются регистрируемой волновой картиной, используемой техникой и технологией работ. Это связано, прежде всего, с принципиальным различием в строении верхней части разреза на суше и на море. Хотя в том и другом случае в верхней части разреза имеются резкие акустические границы: на суше — дневная поверхность и подошва ЗМС (или ЗПС), на море — поверхность воды и дно, но различие параметров верхней части разреза очень велико. На суше дневная поверхность и подошва ЗМС (или ЗПС) чаще всего имеют сложный рельеф, а породы, составляющие ВЧР, характеризуются низкими значениями скоростей и изменением упругих свойств по глубине и площади. При возбуждении упругих волн на дневной поверхности или в ВЧР всегда возникает сложная волновая картина из продольных и поперечных колебаний. В ВЧР образуется большое число низкоскоростных поверхностных волн, кажущиеся скорости которых значительно меньше скоростей в глубинной среде: поверхностные волны Рэлея, Лява, интерференционные поверхностные волны, интенсивность которых зависит от положения источника в ВЧР.

Верхняя часть разреза играет большую роль в образовании многократных отражений между дневной поверхностью и подошвой ЗМС или ЗПС (явление реверберации — образование волн, сдвучиков). Подошва ВЧР и дневная поверхность являются также дополнительными границами при образовании кратных глубинных отраженных волн, но переменно-строящее ВЧР и сложный рельеф ее поверхности нарушают их регулярность.

Существование низкоскоростных помех (первой группы) зави-

сит от условий возбуждения (глубины погружения и положения источника относительно ЗМС).

При сейсмических работах на мелководье в зависимости от глубины моря регистрируются как помехи, характерные для работ на суше (интенсивные поверхностные волны), так и интенсивная водная волна (рис. 1.7 и рис. 1.8).

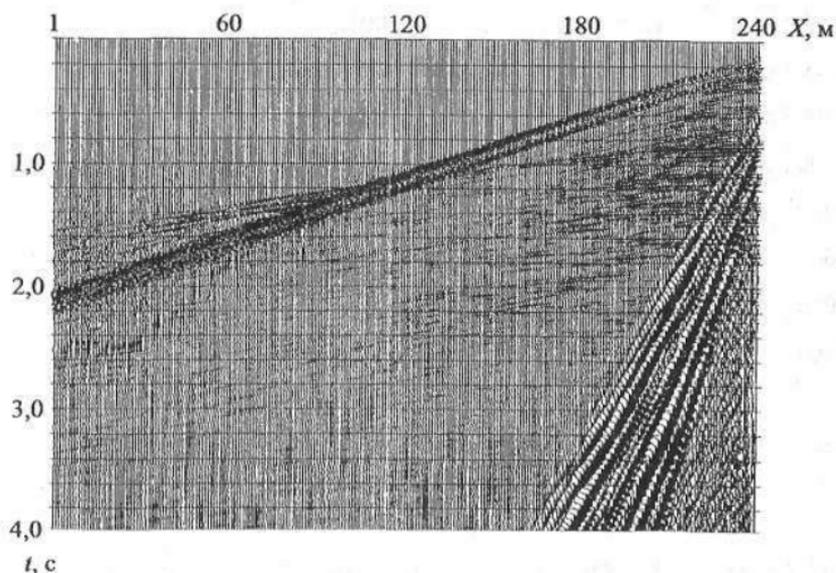


Рис. 1.7. Преломленные волны и низкоскоростные помехи при сейсмических работах на мелководье.

На море толщу воды можно считать однородной, ее поверхность и дно — ровными. В водном слое возбуждаются и распространяются только продольные волны. На море отсутствуют условия для образования низкоскоростных поверхностных волн, регистрируются только средне- и высокоскоростные помехи. Самая низкоскоростная волна-помеха на море — это водная волна со скоростью распространения не менее 1440 м/с, она характеризует свойства водного слоя и может быть использована в гидрологии и гидролокации. В целом условия проведения сейсмических работ на море более благоприятные, чем на суше. Однородность водной толщи и соответственно стабильные условия возбуждения и приема формируют более регулярную и устойчивую картину полезных волн и помех. Все эти особенности в большей степени касаются работ, выполняемых МОВ, и мало влияют на проведение работ МПВ.

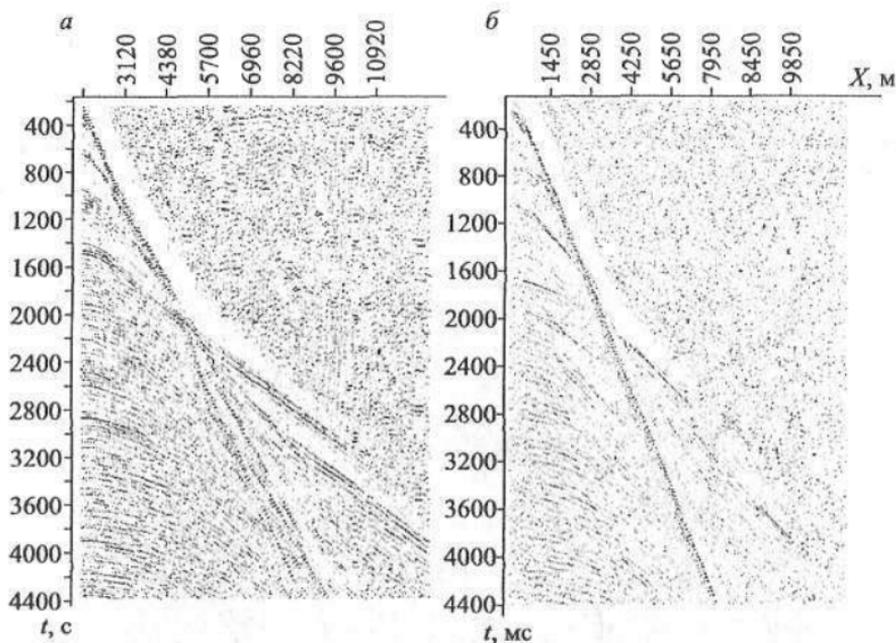


Рис. 1.8. Регистрация преломленных волн при сейсмических работах МОВ на мелководье Каспийского (а) и Азовского (б) морей.

В море с водным слоем связана прямая водная волна, кратные отраженные и отраженно-преломленные волны, а также реверберация. При распространении водной волны часто возникают кратные, преломленные на дне волны, а сопровождают ее кратные отраженные волны. Наиболее характерным осложнением волновой картины при морских работах является реверберация сейсмических волн (особенно в случае «звонкового» дна). Реверберацией называют многократные отражения от поверхности воды и дна, если частота их повторения находится в пределах сейсмической полосы частот, т. е. когда период кратности сопоставим с периодом сейсмических колебаний, происходит непрерывное звучание — синусоидальные колебания («стоячие волны») между дном и поверхностью воды. Период реверберации зависит от глубины моря, и с его увеличением реверберация переходит в многократные отражения от дна, разделенные во времени. Поэтому с водной волной связана очень широкая полоса среднескоростных помех.

На суше хотя и существуют интенсивные волны-спутники и многократные волны, они менее регулярны и не так наглядны, как на

море, где поверхность воды гладкая (если не учитывать волнения моря).

Вторая группа сейсмических помех обусловлена сейсмогеологическими особенностями уже глубинной части геологической среды (изменение упругих свойств с глубиной), это среднескоростные помехи, кажущиеся скорости которых примерно соответствуют значениям скоростей в среде.

В МПВ регулярные волны-помехи относят ко второй группе: это закритические отраженные волны (продольные, обменные и поперечные) и кратные отраженно-преломленные волны. Закритические отражения — наиболее серьезные помехи для МПВ: кинематика их близка к преломленным волнам, а природа определяется неоднозначно, поэтому ранее их часто принимали за преломленные волны.

Кратные отраженно-преломленные волны в МПВ часть пути проходят как преломленные (рис. 1.9). Закритические отражения и кратные волны образуются всегда, но их визуальное выделение на сейсмических записях зависит от соотношения интенсивности

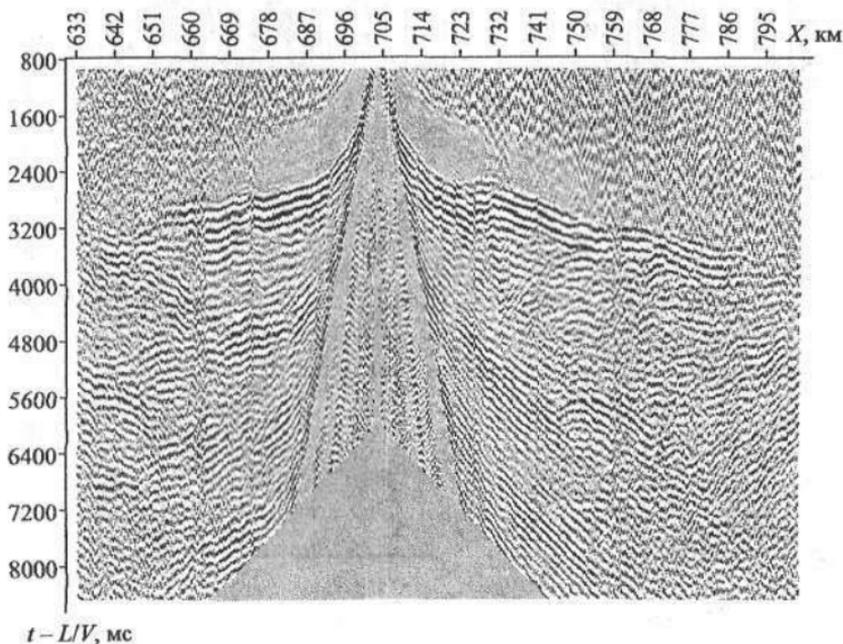


Рис. 1.9. Кратные отраженно-преломленные волны на сейсмическом зондировании по опорному профилю 2-АР в Карском море.

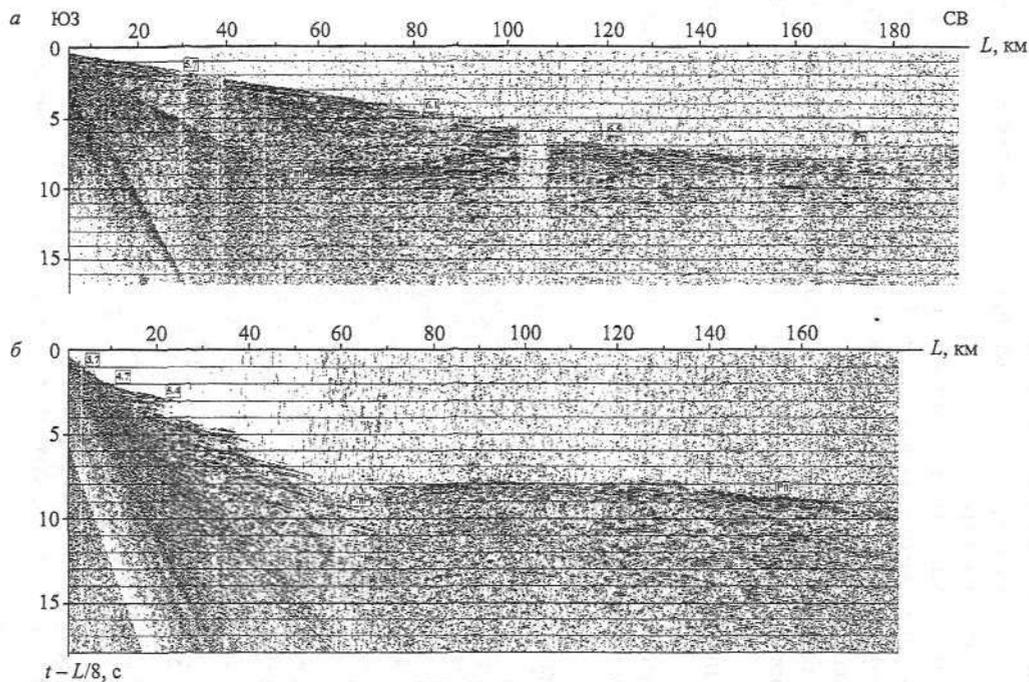


Рис. 1.10. Волновые поля при сейсмических зондированиях на опорном профиле 1-АР в Баренцевом море при малой (а) и большой (б) мощности осадочного чехла.

однократных (полезных) волн и многократных волн-помех. Кроме того, в МПВ происходит интерференция самих преломленных волн.

Особенности волновой картины, регистрируемой при выполнении сейсмических зондирований на море, приведены на рис. 1.10.

При проведении сейсмических работ регистрируются помехи, связанные с условиями проведения и технологией работ. Особенно это относится к морским работам и обусловлено транспортировкой приемной косы (реакция на колебания силы тяги, влияние концевой буй), влиянием судна и шумами моря. К этому же типу помех относятся искажения записи сейсмических волн, вызываемые наклоном косы при ее движении («ласточкин хвост»).

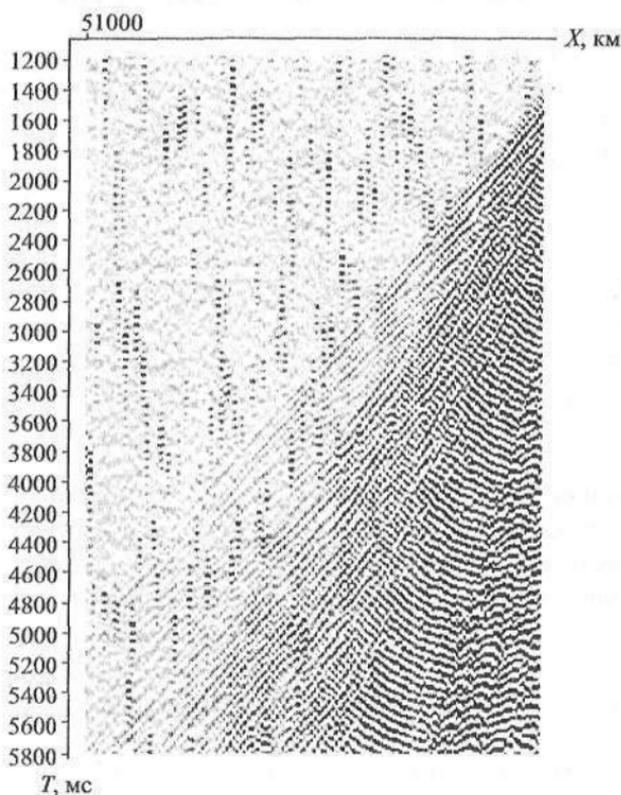


Рис. 1.11. Технологические помехи при проведении работ МПВ на море (волны-помехи, обусловленные волнением моря при использовании буйковых регистраторов).

К технологическим помехам при проведении работ МПВ на море относятся помехи, связанные с волнением моря при использовании буйковых регистраторов на дне и в воде. При расположении поплавка на поверхности воды в результате волнения моря происходит подергивание груза корпуса регистратора в воде или груза на дне, и появляются характерные помехи (рис. 1.11).

## Глава 2

### КИНЕМАТИКА ПРЕЛОМЛЕННЫХ ВОЛН

Времена прихода различных сейсмических волн зависят от их природы, свойств изучаемой среды, в частности, от скоростей распространения волн, конфигурации границ, а также положения источников и приемников. Из сейсмических записей преломленных волн можно составить различные наборы (сейсмограммы): с общей точкой возбуждения (ОТВ), общей точкой приема (ОТП), общей средней точкой (ОСТ) и постоянным удалением ( $L = \text{const}$ ). Кинематика преломленных волн на этих наборах записей несколько различается. Далее рассмотрены некоторые кинематические особенности преломленных волн, которые необходимы для понимания последующего изложения и используются при выборе оптимальной методики сейсмических работ МПВ и обработке полученных данных.

Аналитическое выражение годографов преломленных волн существует только для плоских границ и головных волн (без проникания и рефракции). В случае криволинейных границ и преломленных волн с прониканием нами предложено использовать для расчета годографов преломленно-дифрагированные волны [32].

#### 2.1. КИНЕМАТИКА ГОЛОВНЫХ ВОЛН

Сначала рассмотрим кинематику головных волн на разных наборах записей для плоской наклонной границы, разделяющей пласт с относительно низкой скоростью (рис. 2.1, верхняя часть) и однородное полупространство с высокой скоростью распространения волн (нижняя часть рис. 2.1).

### 2.1.1. Годографы волн на сейсмограммах ОТВ и ОТП

На сейсмограммах ОТВ и ОТП годографы преломленных волн имеют вид простых выражений — уравнений прямой линии.

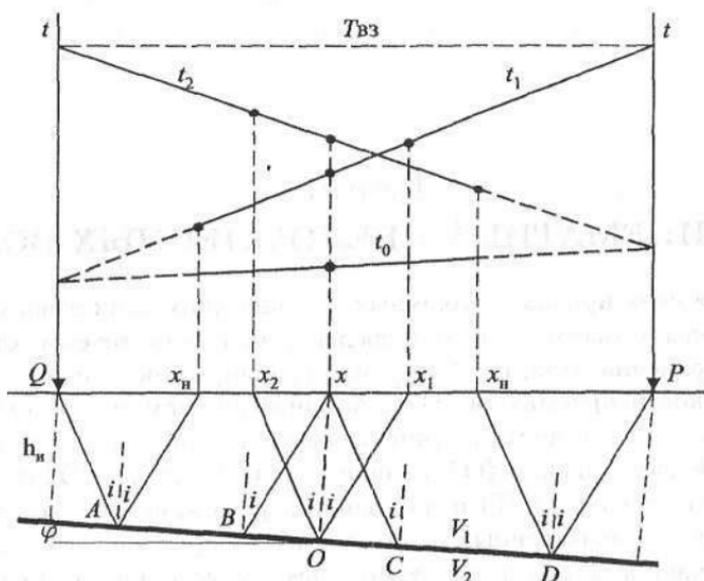


Рис. 2.1. Встречные годографы головной волны и лучевые схемы для наклонной границы.

Уравнение годографа преломленной (головной) волны на сейсмограмме ОТВ в случае плоской наклонной границы двух однородных сред имеет вид (рис. 2.1)

$$t = 2h_n \cos i / V_1 + L \sin(i \pm \varphi) / V_1 = t_{0\text{нр}} + L / V^* ,$$

$$t_{0\text{нр}} = 2h_n \cos i / V_1 , \quad V^* = V_1 / \sin(i \pm \varphi) , \quad (2.1)$$

где  $h_n$  — глубина границы под источником;  $\varphi$  — угол наклона преломляющей границы;  $i = \arcsin(V_1/V_2)$  — критический угол;  $L$  — расстояние источник–приемник;  $V_1$  — скорость в покрывающей среде;  $V_2$  — скорость в подстилающей среде, причем  $V_2 > V_1$ ;  $V^*$  — кажущаяся скорость преломленной волны. Кажущаяся скорость головной волны различна по восстанию и падению границы (по восстанию — знак «-», по падению — знак «+»).

Уравнение годографа головной волны на сейсмограмме ОТП можно определить, используя принцип взаимности сейсмических вишисей. Формула имеет такой же вид (см. (2.1)), но при этом меняется знак угла наклона границы в выражении кажущейся скорости, т.е. годограф преломленной волны на сейсмограмме ОТП по восстанию границы совпадает с годографом ОТВ по падению границы:

$$t = 2h_n \cos i / V_i + L \sin(i \mp \varphi) / V_q = t_{0np} + L / V^* .$$

Эта модель является простейшей для образования головной волны. Годограф головной волны представляет собой два отрезка прямых линий, исходящих из начальных точек, имеющих наклон  $1/V^*$  и располагающихся по обе стороны от этих точек. Координаты начальной точки определяются следующим выражением:

$$X_n = \pm 2h_n \sin i / \cos(i \pm \varphi) .$$

Время прихода волны в этой точке  $t_n = 2h_n \cos \varphi / V_1 \cos(i + \varphi)$ .

В начальной точке времена прихода преломленной и отраженной под критическим углом волн от одной точки границы совпадают.

В области между источником и начальной точкой преломленной волны годограф отсутствует — «мертвая» зона. Для наклонных границ в направлении их падения при стремлении  $(i + \varphi)$  к  $90^\circ$  происходит уменьшение кажущейся скорости преломленной волны (по падению границы) до скорости в покрывающей среде. При значении  $i + \varphi \geq 90^\circ$  «мертвая» зона увеличивается до бесконечности. Поэтому для преломленных волн действует более жесткое (по сравнению с МОВ) ограничение по углам наклона границ.

Однако независимо от наличия «мертвой» зоны вблизи источника можно экстраполировать годограф до его пересечения с осью времен и найти  $t_{0np}$  над источником, по которому можно определить глубину до границы  $h_n$ :

$$h_n = t_{0np} V_1 / (2 \cos i) . \quad (2.2)$$

Если граница горизонтальна, уравнение упрощается:

$$t = 2h_n \cos i / V_1 + L \sin i / V_1 = t_{0np} + L / V_2 .$$

В случае плоской границы ее глубина в пунктах возбуждения и приема связана следующим соотношением (с учетом знака угла наклона границы):

$$h_{\text{п}} = h_{\text{и}} + L \sin \varphi.$$

Так как  $\sin(i + \varphi) = \sin i \cos \varphi + \cos i \sin \varphi$ , из формулы (2.1) можно получить

$$\begin{aligned} t &= h_{\text{и}} \cos i / V_1 + h_{\text{п}} \cos i / V_1 + L \cos \varphi / V_r = \\ &= (t_{0\text{пр}})_{\text{и}} / 2 + (t_{0\text{пр}})_{\text{п}} / 2 + L \cos \varphi / V_r. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Величины  $(t_{0\text{пр}})_{\text{и}} / 2 = h_{\text{и}} \cos i / V_1$  и  $(t_{0\text{пр}})_{\text{п}} / 2 = h_{\text{п}} \cos i / V_1$  называются временами запаздывания, или временными задержками, соответственно в пунктах возбуждения и приема. Представление годографа преломленной волны в виде (2.3) лежит в основе многих кинематических способов обработки данных МПВ, использующих временные задержки [10, 36]. По аналогии с МОВ можно ввести параметр  $V_{\text{ОСТ}} = V_r / \cos \varphi$ . Тогда (2.3) запишем в следующем виде:

$$t = (t_{0\text{пр}})_{\text{и}} / 2 + (t_{0\text{пр}})_{\text{п}} / 2 + L / V_{\text{ОСТ}}. \quad (2.4)$$

Для прямого и встречного годографов головных волн (в пунктах возбуждения и приема) соблюдается принцип взаимности (см. рис. 2.1). Важное свойство годографов головных волн — независимость их формы от расстояния до источника, откуда вытекает подобие нагоняющих годографов.

Рассмотрим характерные точки на встречных годографах и соответственно на преломляющей границе, которые часто используются при обработке сейсмических записей преломленных волн.

1. Наибольший интерес представляют сопряженные точки, их использование в рамках головных волн позволяет наилучшим образом учесть кинематику и динамику преломленных волн. Сопряженные точки  $X_1$  и  $X_2$  соответствуют точкам выхода на линию наблюдения прямого и встречного лучей из общей точки на преломляющей границе (см. рис. 2.1).

Отметим, что точки  $X_1$  и  $X_2$  головной волны являются в то же время сопряженными, или взаимными, точками волны, отраженной от преломляющей границы под критическим углом. Сопряженные

точки соответствуют также начальным точкам преломленной волны при расположении в них источника и приемника.

Суммарное время пробега по лучам  $OX_1$  и  $OX_2$  назовем временем сопряжения  $t_c$ , расстояние  $S = X_1 - X_2$  — базой сопряжения. Размер базы сопряжения и время сопряжения определяются их значениями для начальной точки преломленной волны (см. выше).

Согласно лучевой схеме (см. рис. 2.1)

$$t_c = t_{OX_1} + t_{OX_2} = t_{QAOX_1} + t_{PDOX_2} - t_{QADP} = t_1(x_1) + t_2(x_2) - T_{вз}.$$

Сопряженные точки встречных голографов используются для решения обратной кинематической и динамической задач преломленных (головных) волн [8, 9, 17, 36]. Возможность решения обратной задачи по параметрам сопряженных точек обусловлена наличием между ними и параметрами среды простых функциональных соотношений, вытекающих из лучевой схемы. Если известна база сопряжения  $S(x_2)$ , то решение обратной задачи головных волн для границы произвольной формы (без проникания) может быть получено в явном виде [17].

Между временами  $t_{опр}$  и  $t_c$  (временем сопряжения) существует соотношение

$$t_{опр} / t_c = \cos^2 i.$$

2. Точка  $O$  преломляющей границы, где встречаются фронты головных волн из двух источников (или точка выхода двух встречных лучей), соответствует сопряженным точкам на поверхности наблюдений. Ее положение определяется уравнением

$$t_{QAO} + t_{PDO} = t_{QADP}, \quad \text{т.е.} \quad t_{QAO} + t_{PDSO} = T_{вз},$$

или в терминах встречных полей времен,

$$t_1(x, z) + t_2(x, z) = T_{вз}.$$

Выполнение этого условия лежит в основе построения преломляющей границы способом полей времен по головным волнам.

3. Общая точка приема  $X$  соответствует общей точке выхода прямого и встречного лучей, оторвавшихся из разных точек преломляющей границы. Согласно лучевой схеме и в предположении плоского участка границы  $BC$

$$t_{QABX} + t_{PDCX} - t_{QADP} = t_{BX} + t_{CX} - t_{BC} = 2h \cos i / V_1$$

или

$$t_1(x) + t_2(x) - T_{вз} = t_{0пр}(x). \quad (2.5)$$

Разностный годограф позволяет оценить значение граничной скорости в предположении, что угол наклона границы мал и  $\cos \varphi \approx 1$ .

$$t_1(x) - t_2(x) + T_{вз} = t_p(x), \quad V_r = \frac{2\Delta x \cos \varphi}{\Delta t_p} \approx \frac{2\Delta x}{\Delta t_p}. \quad (2.6)$$

Формулы (2.5) и (2.6) используются для построения преломляющей границы способом  $t_0$  (см. формулу (2.2)). В рамках плоской границы для кинематических построений способом  $t_0$  минимальной (необходимой и достаточной) является четырехточечная система наблюдений, применяемая при акустическом каротаже скважин.

### 2.1.2. Годографы волн на сейсмограммах ОСТ

Рассмотрим головную волну от плоской наклонной границы и однородную покрывающую среду. В средней точке между источником и приемником, равноудаленной от источника и приемника (рис. 2.2),  $h_{ОСТ} = (h_{и} + h_{п})/2$ . Обозначение  $h_{ОСТ}$  введено как и в ОСТ (ОГТ) в МОВ. Подставляя значение глубины до границы в средней точке в уравнение (2.3), получаем:

$$\begin{aligned} t &= (h_{и} + h_{п}) \cos i / V_1 + L \cos \varphi / V_2 = \\ &= 2h_{ОСТ} \cos i / V_1 + L \cos \varphi / V_2 = t_{0пр} + L \cos \varphi / V_2. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Кажущаяся скорость преломленной (головной) волны, определяемая по годографу ОСТ, равна  $V^* = V_2 / \cos \varphi = V_{ОСТ}$  и одинакова для преломленных волн, распространяющихся по восстанию или падению границы. Уравнение годографа ОСТ для головной волны можно записать в виде  $t(L) = t_{0пр} + L / V_{ОСТ}$ , где скорость  $V_{ОСТ}$  головных волн отличается от таковой для отраженных волн.

Эта формула является уравнением годографа преломленной волны, отнесенного к центральной точке между источником и приемником, и называется уравнением годографа ОСТ преломленной волны. По принципу взаимности ход лучей не изменится и для встречных годографов, т. е. обе ветки годографа ОСТ будут одинаковы. В отличие от годографа ОСТ отраженных волн, имеющего

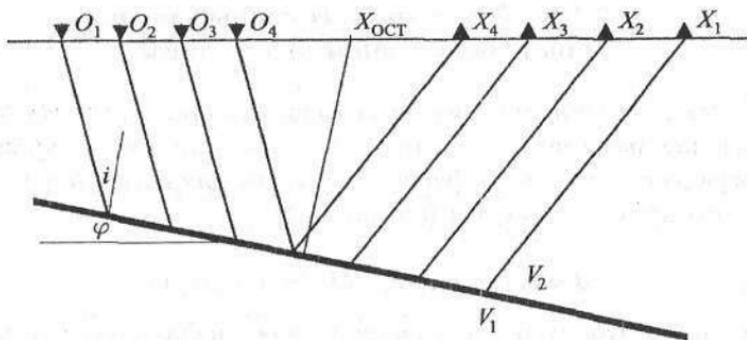


Рис. 2.2. Схема образования годографа ОСТ головной волны.

форму гиперболы, годограф ОСТ преломленных волн прямолинеен и является формальным кинематическим соотношением для головных волн. Записи годографа на сейсмограмме ОСТ соответствуют участкам преломляющей границы разной длины и разным точкам входа и выхода преломленной волны (см. рис. 2.2), при этом граница должна быть плоской в пределах максимального участка записей преломленных волн сейсмограммы ОСТ. Кроме того, записи на сейсмограмме ОСТ преломленной волны динамически отличаются от МОВ, где собираются отражения от площадки сопоставимой с зоной Френеля.

Время  $t_{0пр}$  можно выразить в виде

$$t_{0пр} = t - L/V_{ОСТ}.$$

Годограф ОСТ после введения в него кинематической поправки (редукции)  $\delta t(L) = L/V_{ОСТ}$  трансформируется в горизонтальную линию на времени  $t_0$ .

Сейсмограмма ОСТ-МПВ может быть получена при многократных системах наблюдений и формируется из записей, координаты пунктов возбуждения и приема которых удовлетворяют условию  $X_{ОСТ} = (X_{и} + X_{п})/2$ . Годограф ОСТ МПВ обладает симметрией (следствие принципа взаимности) относительно координаты  $X_{ОСТ}$ . Уравнение годографа (2.7) лежит в основе приближенного построения временных разрезов МПВ (головных волн) способом ОСТ-МПВ (ОГТ-МПВ) при наличии систем многократного профилирования (см. гл. 7).

### 2.1.3. Кинематика головных волн на наборах записей $L = \text{const}$

Рассмотрим кинематические особенности преломленных волн на временных разрезах постоянных удалений, для этого в уравнении годографа преломленной (головной) волны для плоской наклонной границы примем  $L = \text{const}$  (см. рис. 2.1)

$$t = 2h_n \cos i / V_1 + L \sin(i \pm \varphi) / V_1$$

и заменим глубину под источником через начальную глубину на профиле и ее изменение по профилю  $h_n = h_0 \pm x \sin \varphi$ . В таком случае время прихода преломленной волны будет зависеть уже от новой переменной  $x$ :

$$t = 2h_0 \cos i / V_1 + L \sin(i \pm \varphi) / V_1 \pm 2x \sin \varphi \cos i / V_1,$$

где  $h_0$  — начальная глубина преломляющей границы на профиле;  $x$  — координата источника по профилю, остальные обозначения см. выше.

Для плоской наклонной границы изменение времени прихода головной волны на перемещающейся вдоль профиля установке  $L = \text{const}$  определяется изменением глубины до границы аналогично изменению времени прихода отраженной волны в способе центрального луча (СЦЛ) в МОВ [28, 31], но с учетом множителя  $\cos i$

$$\Delta t = \pm 2x \sin \varphi \cos i / V_1.$$

В случае криволинейной границы изменение времени прихода волны определяется уже двумя слагаемыми:

$$\Delta t = \pm 2x \sin \varphi \cos i / V_1 + L \sin(i \pm \varphi) / V_1,$$

хотя основной вклад в изменение времени прихода головной волны определяется первым слагаемым.

Системы наблюдений с  $L = \text{const}$  легко осуществляются при морских работах МПВ, при этом удаление выбирается для оптимального прослеживания основных преломленных волн. При наземных работах такая система может быть сформирована из записей многократных наблюдений.

Возможности обработки материалов МПВ с  $L = \text{const}$  ограничены, по таким материалам граничные скорости и  $t_0$  преломленных волн определить нельзя, но если эти параметры известны, можно построить динамический разрез МПВ.

#### 2.1.4. Годографы головных волн в слоисто-однородной среде

Для модели многослойной среды с нарастанием скоростей и горизонтальными границами уравнение годографа головной волны, скользящей по границе с номером  $n$ , определяется в следующем виде:

$$t = L/V_n + 2 \sum_{j=1}^{n-1} h_j \cos i_{jn} / V_j, \quad \text{где } i_{jn} = \arcsin V_j / V_n. \quad (2.8)$$

Координаты начальной точки

$$L_{n,т} = 2 \sum_{j=1}^{n-1} h_j \sin i_{jn}, \quad T_{n,т} = 2 \sum_{j=1}^{n-1} h_j / V_j \cos i_{jn}$$

Годограф преломленной волны является прямой линией, наклон которой определяется скоростью под преломляющей границей, а время его пересечения с осью времен (над источником) равно сумме членов вида  $(2h_j \cos i_{jn} / V_j)$ . Выражение (2.8) можно использовать для нахождения скоростей и мощностей каждого из  $n - 1$  слоев в предположении горизонтальных границ.

На практике часто применяется метод средних скоростей, при этом в качестве средней скорости используется эффективная скорость. В случае однородно-слоистой среды (при существовании преломляющих границ) замена средней скорости эффективной мало обоснована.

## 2.2. КИНЕМАТИКА ПРЕЛОМЛЕННЫХ ВОЛН С ПРОНИЦАНИЕМ

Ранее уже рассматривалась кинематика головных волн без учета явлений проникания и рефракции. Для плоских границ проникание отсутствует, а рефракция возможна при нарастании скорости ниже преломляющей границы.

### 2.2.1. Годографы преломленных волн от криволинейной преломляющей границы

Аналитического выражения годографа головной волны в случае слабо криволинейной границы не существует, так как для определения времени прихода головной волны необходимо знать форму преломляющей границы.

При решении обратной задачи по двум встречным годографам головной волны (без проникания) способы сопряженных точек и полей времен не накладывают ограничений на криволинейность границы, способ построения годографов  $t_0(x)$  и  $t_p(x)$  требует, чтобы граница была плоской в пределах двойного сейсмического сноса для каждой точки профиля.

Годографы преломленных волн, образованных на криволинейных границах, не являются отрезками прямых линий. В этом случае волны не скользят вдоль границы, а распространяются в соответствии с законами преломления на границах двух сред с прониканием в нижнюю среду. При вогнутых границах кажущаяся скорость с удалением от источника возрастает, годограф становится выпуклым; если граница выпуклая, годограф оказывается вогнутым. При значительной кривизне границы возможны петли на годографах преломленных волн.

### 2.2.2. Годографы преломленно-дифрагированных волн

Для криволинейных границ и преломленных волн с прониканием аналитического выражения годографа также не существует, при расчете его предлагается использовать преломленно-дифрагированные волны.

Если рассматривать преломляющую границу любой конфигурации как набор точек дифракции, то соответствующую этой границе преломленную волну  $t_1$  можно представить в виде набора (суммы) годографов преломленно-дифрагированных волн  $t_d$  с учетом их проникания. При этом не играет роли, существуют фактически точки дифракции на границе или нет, замена преломленной волны набором годографов дифрагированных волн происходит в соответствии с принципом Гюйгенса—Френеля.

Годограф преломленно-дифрагированной волны от объекта или точки дифракции на преломляющей границе (с учетом проникания) можно аналитически выразить в следующем виде (рис. 2.3):

$$t = \frac{h_{и}}{V_1 \cos i} + \frac{\sqrt{(x_{д} - x_{и} \pm h_{и} \sin(i \pm \varphi) / \cos i)^2 + (h_{и} \cos(i \pm \varphi) / \cos i - h_{д})^2}}{V_r} + \frac{\sqrt{(x_{п} - x_{д})^2 + h_{д}^2}}{V_1}, \quad (2.9)$$

где  $x_{и}$  и  $x_{п}$  — координаты источника и приемника на профиле;  $h_{д}$  и  $x_{д}$  — координаты точки дифракции; знак  $\pm h_{и}$  — (-) для точки входа под источником по падению и (+) по восстанию границы, остальные обозначения см. выше.

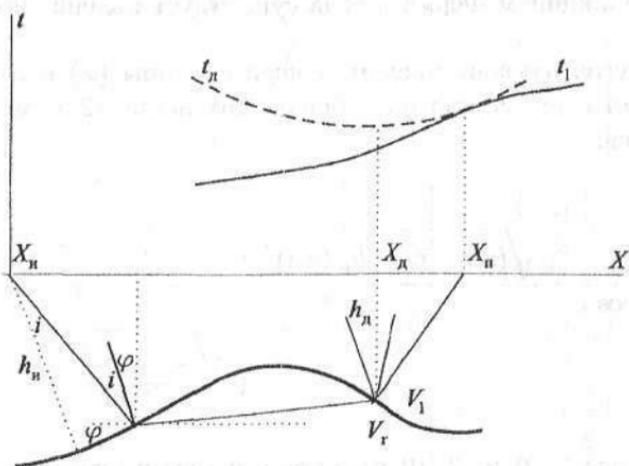


Рис. 2.3. Лучевая схема преломленной волны с прониканием и ее представление преломленно-дифрагированными волнами.

Для встречного и нагоняющего годографов меняются значения параметров:  $x_{и}$ ,  $x_{п}$  и знак  $\varphi$  соответственно.

Это уравнение дифрагированной волны для точки выхода волны из преломляющего пласта, путь до точки выхода она проходит как преломленная с прониканием. При выводе его сделано только одно приближение: участок границы под источником между точкой входа луча в пласт и точкой пересечения нормали к границе должен быть плоским.

Выражение (2.9) позволяет определять времена прихода преломленных волн в самом общем случае (криволинейная граница и проницание). При таком подходе реальные преломленно-дифрагированные волны также используются в обработке, и по ним строится изображение объекта дифракции. Уравнение годографа головной волны для плоской преломляющей границы, определяемое выражением (2.1), является частным случаем годографа преломленно-дифрагированной волны (2.9), когда проницание отсутствует и волна скользит вдоль границы, т. е. все годографы головных волн для плоской границы, рассмотренные выше в разд. 2.1–2.4, можно записать на основе формулы (2.9).

Напомним, что для определения времени прихода головной волны, скользящей вдоль границы, необходимо знать ее форму (см. выше), кроме того, для криволинейной границы в соответствии с принципом Ферма всегда существует явление проницания волн.

Если угол наклона преломляющей границы ( $\varphi$ ) в точке входа волны мал и им можно пренебречь, уравнение (2.9) значительно упростится:

$$t \approx \frac{h_n}{V_1 \cos i} + \frac{\sqrt{(x_d - x_n \pm h_n \operatorname{tg} i)^2 + (h_n - h_d)^2}}{V_r} + \frac{\sqrt{(x_n - x_d)^2 + h_d^2}}{V_1}. \quad (2.10)$$

Формулы (2.9) и (2.10) являются аналитическим выражением годографа преломленной волны в наиболее общем случае — для криволинейной границы с проницанием. Эти формулы можно использовать при решении как прямой, так и обратной задачи сейсморазведки преломленных волн, они, в частности, используются для расчета времен прихода преломленных волн в процессе их миграции.

Представление преломленных волн преломленно-дифрагированными волнами является наиболее общим подходом и учитывает физические особенности их образования и распространения. Такой подход совершенно аналогичен представлению отраженных волн в виде годографов дифракции [23, 28]. В частности, времена прихода

Таблица 2.1. Кинематические параметры преломленных (головных) и преломленно-дифрагированных волн для различных наборов записей

Наборы записей	$L = \text{const}$	ОТВ (ОТП)	ОСТ
Преломленные (головные) волны для плоской границы			
Годограф, или время прихода волны	$t = 2h_0 \cos i / V_1 + L \sin(i \pm \varphi) / V_1 \pm \pm 2x \sin \varphi \cos i / V_1$ , где $h_0 = h_n \pm x \sin \varphi$	$t = 2h_n \cos i / V_1 + L \sin(i \pm \varphi) / V_1 = t_{0\text{нп}} + L / V^*$	$t = (h_n + h_n) \cos i / V_1 + L \cos \varphi / V_r = 2h_{\text{ОСТ}} \cos i / V_1 + L / V_{\text{ОСТ}}$ , где $V_{\text{ОСТ}} = \frac{V_r}{\cos \varphi}$
Нормальная составляющая при $\varphi = 0$	$t = 2h_0 \cos i / V_1 + L \sin i / V_1 \pm \pm 2x \cos i / V_1$	$t = 2h_0 \cos i / V_1 + L / V_r = t_{0\text{нп}} + L / V_r$	$t = 2h_0 \cos i / V_1 + L / V_r = t_{0\text{нп}} + L / V_r$
Изменение времени от угла наклона границы	$\Delta t = \pm \frac{2x \sin \varphi \cos i}{V_1}$	$\Delta t = \frac{L \sin(i \pm \varphi)}{V_1}$	$\Delta t = -\frac{L}{V_{\text{ОСТ}}}$
Геометрический размер участка преломляющей границы	$M = L \cos \varphi - (h_n + h_n) \text{tg } i$	$M = L \cos \varphi - (h_n + h_n) \text{tg } i$	$M = L \cos \varphi - (h_n + h_n) \text{tg } i$
Кажущаяся скорость	$V^* = \frac{V_1}{2 \sin \varphi \cos i}$	$V^* = \frac{V_1}{\sin(i \pm \varphi)}$	$V^* = V_{\text{ОСТ}} = \frac{V_r}{\cos \varphi}$
Преломленно-дифрагированные волны от произвольной границы			
Годограф волны	$t = t_1 + t_2 + t_3 \approx \frac{h_n}{V_1 \cos i} + \frac{\sqrt{(x_d - x_n \pm h_n \text{tg } i)^2 + (h_n - h_d)^2}}{V_r} + \frac{\sqrt{(L - x_d)^2 + h_d^2}}{V_1}$		

Примечание:  $h_n$ ,  $h_n$ , и  $h_{\text{ОСТ}}$  — глубина по нормали до преломляющей границы под источником, приемником и средней точкой соответственно,  $h_d$  и  $x_d$  — координаты точки дифракции на преломляющей границе;  $\varphi$  — угол наклона границы;  $i$  — критический угол;  $L$  — удаление источник-приемник. Все остальные обозначения см. ранее.

отраженных волн представляются голографами дифрагированных волн в следующем виде (рис. 2.4):

$$t = \frac{1}{V_1} \sqrt{h_d^2 + x_d^2} + \frac{1}{V_1} \sqrt{h_d^2 + (L - x_d)^2},$$

где  $h_d$  и  $x_d$  — координаты точки дифракции на отражающей границе;  $L$  — удаление источник-приемник.

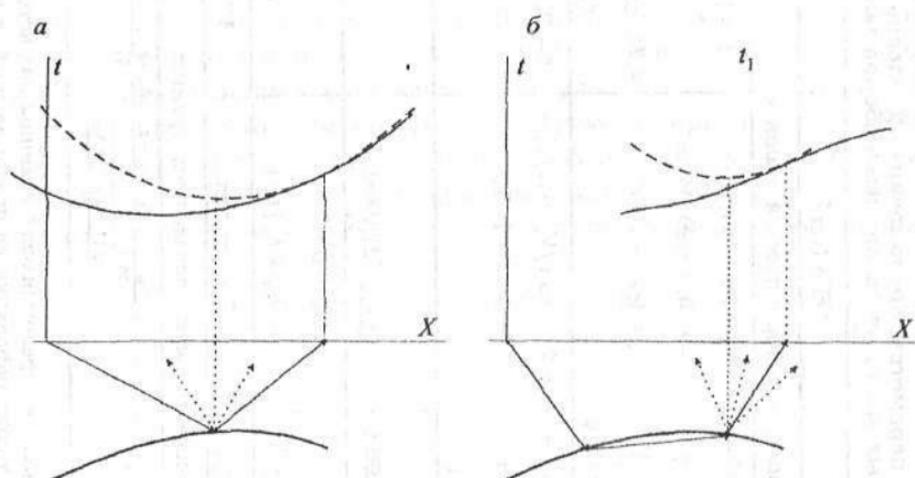


Рис. 2.4. Схема представления отраженных (а) и преломленных (б) волн дифрагированными волнами.

Кинематические параметры преломленных волн для однородного полупространства над преломляющей границей сведены в табл. 2.1.

## Глава 3

# ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ПРЕЛОМЛЕННЫХ ВОЛН

В предыдущих главах предполагалась распространение упругих волн в идеальных условиях — в однородных изотропных средах. Теперь рассмотрим упругие свойства реальных геологических сред.

### 3.1. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ И АКУСТИЧЕСКАЯ СЛОИСТОСТЬ РАЗРЕЗА

В геологии и геофизике, в частности, в сейморазведке, основополагающим является существование слоистости отложений и, следовательно, границ между слоями. Глобальные и локальные циклы [6, 24] повышения и понижения уровня моря (трансгрессии и регрессии) приводят к изменению условий осадконакопления и образованию слоистости за счет изменения источников сноса, геохимической обстановки, перерывов в осадконакоплении и размыва отложений. С развитием Земли связано и послышное излияние эффузивных и инъекция интрузивных пород. Последующие или одновременные пликативные и дизъюнктивные дислокации изменяют не только условия осадконакопления и образования пород, но и создают дополнительные границы в разрезе. Кроме того, с погружением отложений на глубину происходят их уплотнение за счет метаморфизма, а при выходе на поверхность (или вблизи нее) — разуплотнение и выветривание.

Многообразие геологического состава пород определяет изменение упругих свойств, как по глубине, так и по площади регионов; с ним связано различие существующих акустических разрезов и сейсмогеологических условий территорий. При проведении сейсмических работ именно изменение упругих свойств по глубине и форма залегания слоев являются наиболее важными.

Минимальные скорости, с которыми приходится иметь дело в сейсморазведке, — это скорости распространения упругих волн в воздухе — звуковых волн. Скорости распространения продольных волн в ЗМС немного больше, они начинаются от 400–600 м/с. В морской сейсморазведке минимальные скорости распространения волн обусловлены водным слоем и составляют 1440–1540 м/с.

Максимальные скорости распространения упругих продольных волн в горных породах в земной коре до 8,0 км/с (в мантии и ядре до 11–13 км/с). Таким образом, диапазон изменения скоростей, с которым имеют дело в сейсморазведке, ограничен значениями 0,3–8,0 км/с. Это довольно широкий диапазон, скорости в глубинной среде меняются в меньшем диапазоне, значения скоростей для различных пород перекрываются и не могут служить абсолютным критерием при определении типа породы.

Породы могут быть монолитными и пористыми или трещиноватыми. Скорость упругих волн в пористых породах зависит не только от состава скелета породы, но и от вида заполнения пор или трещин: воздухом (газом), нефтью, водой (льдом).

Найдем скорость распространения упругих волн в породе с пористостью  $\psi$  и скоростями упругих волн в скелете  $V_c$  и в заполнителе  $V_3$ . Если в объеме породы (рис. 3.1, а) вырезать стержень длиной  $L$ , то при распространении по нему упругой волны можно определить среднюю скорость  $V = L/t$ , где  $t$  — время прохождения волны. Время распространения волны в стержне зависит от скорости в породах скелета и заполнителя, если сконцентрировать скелет и заполнитель, то можно стержень представить в эффективном виде (рис. 3.1, б). В таком случае общее время распространения в стержне можно определить как время пробега волны в скелете и заполнителе [24, 31]:

$$t = \frac{L}{V} = \frac{\psi L}{V_3} + \frac{(1 - \psi)L}{V_c}, \quad \text{откуда} \quad V = \frac{V_c V_3}{V_3 + \psi(V_c - V_3)}.$$

На основе этой формулы можно оценить изменение акустических свойств осадочных отложений в зависимости от состава их скелета и заполнения пор воздухом (газом), нефтью, водой (льдом), или изменение упругих свойств магматических пород в зависимости от минералогического состава. Эту же формулу можно использовать и при определении скорости в породе, зная содержание различных минералов и скорости в них.

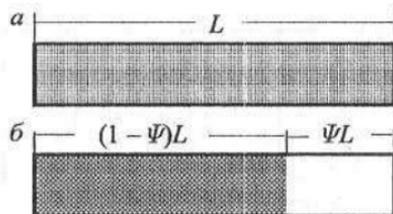


Рис. 3.1. К определению скоростей распространения упругих волн в пористых породах.

Упругие свойства пористых пород зависят от вида заполнителя: воздух (газ), вода (нефть), лед. Заполнение водой пористых пород приводит к резкому изменению упругих свойств в случае замерзания (в районах многолетнемерзлых пород). Скорость в массиве льда зависит от его температуры, но более чем в два раза превышает скорость в воде и составляет около 3,5 км/с. Поэтому в субарктических и антарктических районах мира существование многолетнемерзлых пород приводит к особым сейсмогеологическим условиям верхней части разреза. Часто мерзлые породы чередуются с тальми, создавая сложную акустическую среду.

Смена насыщения пород газом или водой резко меняет акустические свойства пласта и этим определяется акустическое различие газовых залежей — появление «яркого» или «тусклого» пятна на сейсмических разрезах. Заполнение пласта нефтью, по сравнению с водой, не дает такого резкого изменения упругих свойств, как заполнение газом, но в пределах нефтяной залежи обычно отмечают изменение свойств самой породы (ее скелета), поэтому на практике иногда выделяются амплитудные аномалии, связанные и с нефтяными залежами. Кроме того, при насыщении воды газом образуются газогидраты, температура замерзания которых выше, чем у воды, в результате появляется дополнительная физическая граница: газогидраты — вода.

Акустические свойства осадочных пород также зависят от глубины современного и максимального погружения, т. е. от степени их метаморфизма. В процессе метаморфизма уменьшается пористость, изменяются свойства скелета пород, которые по упругим свойствам приближаются к изверженным породам. Поэтому в случае длительных перерывов в осадконакоплении осадочные толщи различаются по значениям упругих свойств, и их поверхности являются преломляющими границами.

Таблица 3.1. Основные преломляющие границы в земной коре

Преломляющая граница	Средняя скорость в покрывающей среде $V_1$ , км/с	Граничная скорость $V_T$ , км/с	Преломляющая граница	Средняя скорость в покрывающей среде $V_1$ , км/с	Граничная скорость $V_T$ , км/с
Подощва ЗМС	0,5-0,8	1,0-1,4	Кровля каменной соли	2,5-4,0	5,4-6,5
Подощва ЗПС	0,8-1,2	1,5-2,0	Пластовые эффузивы	2,5-4,0	5,2-5,6
«Мягкое» дно	1,5	1,6-1,7	Интрузии	2,5-4,0	5,2-5,6
«Звонкое» дно	1,5	3,0	Поверхность метаморфизованного фундамента	2,5-5,0	5,2-5,6
Поверхности перерыва в осадконакоплении	2,5-4,0	3,0-4,5	Поверхность кристаллического фундамента	3,0-5,0	5,6-6,4
Поверхность известняков (и рифы)	2,5-4,0	4,5-6,0	Подощва земной коры — граница Мохоровичича	6,0-6,3	7,9-8,1

Учитывая требования МПВ к модели скоростей и реальное их изменение в геологических средах, можно определить конкретные объекты для изучения методом преломленных волн.

В верхней части геологического разреза (ВЧР) существуют границы первого рода, связанные с подошвой зоны малых и пониженных скоростей (ЗМС и ЗПС), они являются преломляющими границами, хотя с явлениями проницания и рефракции, так как имеют сложный рельеф и нарастание скорости в преломляющих слоях. Изучение их необходимо для определения априорных статических поправок за верхнюю часть разреза, решения инженерных задач в процессе строительства и т. п. При морских работах дно обычно также является преломляющей границей.

В осадочных отложениях преломляющими границами могут быть кровля известняков, включая поверхность крупных рифов, и каменная соль (последняя и была самым первым объектом изучения МПВ). Кроме того, преломляющими границами могут быть поверхности длительного перерыва в накоплении осадков, которые часто сопровождаются несогласным залеганием пород.

Обычно хорошей преломляющей границей является поверхность фундамента (метаморфизованного и кристаллического), особенно при малых глубинах его залегания. С увеличением глубины залегания фундамента скачок скорости на его поверхности уменьшается вплоть до полного исчезновения.

В качестве преломляющих границ могут быть также поверхности эффузивов и интрузий в разрезе осадочных отложений.

Подошва земной коры (граница Мохоровичича) относится к преломляющим границам, хотя преломленные волны регистрируются не всегда, чаще выделяются закритические отражения.

Основные преломляющие границы, встречающиеся в геологическом разрезе, и соответствующие им изменения скоростей распространения волн приведены в табл. 3.1.

### **3.2. СКОРОСТНЫЕ МОДЕЛИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В МПВ**

Практическое определение скорости распространения упругих волн в среде основано на измерении времени пробега в некотором интервале (или в объеме) среды. Для однородной изотропной среды лучи распространения волн будут прямыми линиями, что позволя-

ет определить истинную скорость. Во всех прочих случаях траектории распространения волн имеют сложную форму и определяются принципом Ферма.

В реальных средах из-за сложного изменения скоростей, которое трудно описать аналитически, вводятся их некоторые осредненные значения: средняя, интервальная, пластовая, лучевая и эффективная скорость.

В физике понятие средней скорости вводится как результат деления пройденного пути на время распространения, но в сложных средах лучи волн становятся криволинейными и определить путь можно, зная распределение скоростей. При распространении упругих волн в слоисто-однородной среде (нормально к границам раздела) средняя скорость действительно равна частному при делении пройденного пути на время распространения. Интервальная скорость равна средней на интервале измерения, если интервалы измерения выбираются по мощности геологических пластов — получаются пластовые скорости. Они используются для описания геологических сред в виде модели пластовых скоростей.

В реальных геологических средах скорости распространения сейсмических волн изменяются по глубине и площади сложным образом, лучи сейсмических волн становятся криволинейными (или состоят из отрезков прямых линий). В таком случае приходится аппроксимировать изменение скоростей некоторыми упрощенными (приближенными) моделями, чтобы найти простые аналитические зависимости для вычисления времен распространения волн, в частности, полезных: прямых, отраженных и преломленных.

Если на поверхности горизонтально-слоистой среды (с вертикальным изменением скорости) поместить источник (рис. 3.2) и рассчитывать среднюю скорость распространения волны до некоторой точки на границе (по пути  $AB$  — пунктир) простым делением прямолинейного пути на время прихода преломленных проходящих волн, то она будет изменяться в зависимости от угла выхода луча (лучевые скорости), но всегда будет больше средней скорости по вертикали. Происходит это потому, что траектории лучей определяются в соответствии с принципом Ферма по минимальному времени распространения волн.

Для описания сложного изменения скоростей по глубине и площади в реальных средах используются разные скоростные модели. Чаще всего используется однородная скоростная модель (метод

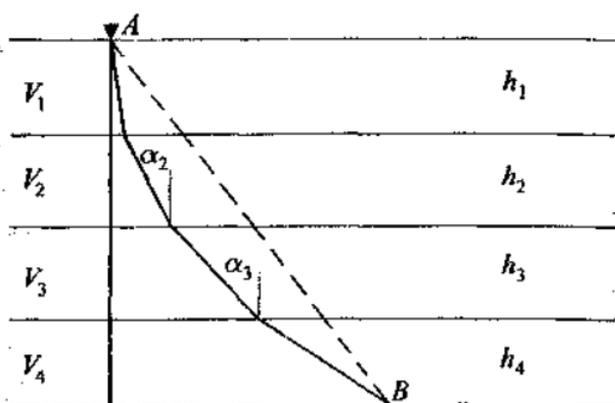


Рис. 3.2. К определению средней и эффективной скоростей в слоистой среде с мощностью слоев  $h$  и скоростями в них  $V$ .

средних скоростей), применяются также слоисто-однородная или слоисто-градиентная модели.

В качестве примера рассмотрим аналитическое выражение для различных скоростей в случае изотропной горизонтально-слоистой среды, состоящей из пластов мощностью  $h_i$  и скоростью распространения уругих волн  $V_i$ .

В модели средних скоростей до некоторой глубины реальная среда заменяется однородной со скоростью равной средней до этой глубины. Приимается, что распространение волн происходит в однородной среде со средней скоростью, а на границах пластов происходят явления преломления отражения (в том числе и с обменом типа колебаний). Средняя скорость распространения волн в горизонтально-слоистой среде определяется по нормали к границам:

$$\bar{V}_n = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_i}} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \Delta t_i}{t_n}$$

По известной средней скорости можно найти пластовую скорость

$$\bar{V}_n = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \Delta t_i}{t_n} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} V_i \Delta t_i + V_n \Delta t_n}{t_n} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} V_i \Delta t_i}{t_{n-1}} * \frac{t_{n-1}}{t_n} + \frac{V_n \Delta t_n}{t_n}$$

откуда

$$\bar{V}_n t_n = \bar{V}_{n-1} t_{n-1} + V_n (t_{0n} - t_{0n-1}), \quad V_n = \frac{\bar{V}_n t_n - \bar{V}_{n-1} t_{n-1}}{t_{0n} - t_{0n-1}}.$$

Модель средних скоростей вполне обеспечивает точность сейсмических построений в осадочных бассейнах, сложенных терригенными (песчано-глинистыми) отложениями, когда при общем нарастании скоростей с глубиной существуют небольшие изменения для отдельных литологических разностей. Исключением являются известняки, гидрохимические осадки (каменная соль, ангидрит), изверженные породы.

Для непрерывных сред используется модель истинных скоростей с градиентом скорости  $V = V_0(1 + \beta H)$ , или со средним градиентом  $V = V_0(1 + \beta_c H)$ , изменяющимся с глубиной.

Теперь рассмотрим распространение волн вдоль лучей с изломом на границах пластов (по пути  $AB$ , рис. 3.2). Траектория луча, выходящего из источника под некоторым углом  $\alpha_i$ , который подходит к преломляющей границе под критическим углом  $i$ , определяется параметром  $p = \sin \alpha_i / V_i = 1/V^* = \sin i / V_{n-1} = 1/V_n$ . Время распространения волны, отраженной от  $n$ -й границы, равно

$$t_n = 2 \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_i \cos \alpha} = 2 \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_i \sqrt{1 - (V_i p)^2}},$$

а расстояние выхода отраженной волны от источника

$$X_n = 2 \sum_{i=1}^n h_i \operatorname{tg} \alpha = 2 \sum_{i=1}^n \frac{h_i V_i p}{\sqrt{1 - (V_i p)^2}}.$$

В начальной точке преломленная волна совпадает с отраженной, поэтому определим скорость прохождения упругих волн вдоль траектории луча через кажущуюся скорость годографа отраженной волны:

$$V = \sqrt{\frac{X}{t} \frac{dX}{dt}} = \sqrt{\frac{XV^*}{t}}.$$

Годограф отраженной волны в этом случае отличается от гиперболического и становится более пологим. Для определения ско-

рости заменим элемент реального одографа его элементом для однородной среды с некоторой эффективной скоростью:

$$V_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \frac{h_i V_i}{\sqrt{1 - (V_i p)^2}}}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i / V_i}{\sqrt{1 - (V_i p)^2}}}}$$

Заменяя отрезок реального годографа фрагментом теоретического годографа, приравниваем время, расстояние между источником и приемником, кажущиеся скорости и скорости распространения волн.

Эффективные скорости нарастают с увеличением удаления источник–приемник, начиная от предельной эффективной скорости, и стремятся к максимальной скорости в покрывающей среде. Очевидно, что эффективная скорость всегда выше средней и это различие зависит от степени неоднородности среды по глубине. По преломленным волнам не определяется эффективная предельная скорость, так как волна всегда распространяется по лучу под углом к границам.

Изменение скоростей в реальных средах с разной степенью приближения может быть описано некоторыми аналитическими выражениями. Наилучшее приближение к реальному изменению скоростей в геологических средах дает использование однородно-слоистой модели (рис. 3.3), когда разрез представлен однородными

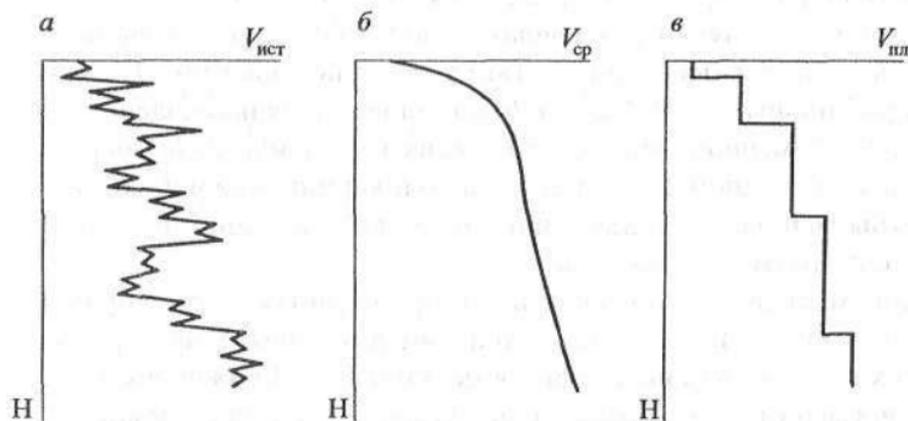


Рис. 3.3. Модели скоростей:

*a* — реальная (исходная) скоростная кривая; *б* — модель средних скоростей; *в* — слоисто-однородная модель.

изотропными слоями различной мощности с постоянными значениями скоростей распространения упругих волн в слоях. В таких средах явления отражения и преломления (с обменом типа колебаний) также происходят только на границах пластов, а между ними упругие волны распространяются без изменения формы импульса. Пластовые скорости для этой модели вычисляются по значениям эффективных скоростей (хотя, строго говоря, их необходимо вычислять по предельным эффективным скоростям). Неоднородность геологического разреза по вертикали можно рассматривать как набор однородных пластов и решать задачу распространения упругих волн в неоднородной среде с помощью послойного решения для каждого однородного пласта. К подобному приему в сейсморазведке прибегают довольно часто при решении кинематических и динамических задач, прямых и обратных. С меньшей степенью приближения могут быть использованы также модели средних скоростей или среднего градиента. Используются и другие более сложные акустические модели геологических сред.

Для любой принятой модели учет изменения скоростей по профилю или площади может выполняться различным образом. Если учитывается изменение скоростей только по вертикали, модель будет одномерной. Строгий учет скоростной модели среды (двумерной в профильном варианте или трехмерной в площадном) предполагает использование своего значения скорости для каждого конкретного луча, даже в пределах одного набора записей (сейсмограмм ОСТ или ОТВ). Существует и промежуточный вариант, когда изменение скоростей учитывается только со сменой сейсмограммы, а для всех лучей в пределах одной сейсмограммы скоростная кривая остается постоянной. Такую модель называют 1,5-мерной при профильных или 2,5-мерной при площадных наблюдениях. При 1,5- или 2,5-мерной модели в пределах годографа (сейсмограммы) используется одномерная модель, а по профилю или площади ее параметры меняются. Только при глубинной миграции используется дву- или трехмерная модель.

Кинематика сейсмических волн, приведенная выше, справедлива для модели средних скоростей или для однородной среды. Во многих случаях она является достаточным приближением к реальным временам регистрации волн. Однако в случае сложных геологических сред необходимо использовать более точные приближения.

## Глава 4

### МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ РАБОТ МПВ

Для изучения акустических свойств геологической среды необходимо на площади исследований провести следующие работы: возбуждать и регистрировать сейсмические волны. Методика полевых сейсморазведочных работ включает в себя схему размещения на местности источников и приемников упругих колебаний (систему наблюдений), а также условия возбуждения и регистрации сейсмических волн.

Каждый сейсмический метод (МПВ, МОВ, СТ) предъявляет особые требования к методике работ, но общим для всех методов является следующее: оптимальная методика работ должна обеспечить детальное изучение упругих (акустических) свойств геологической среды с учетом экологических требований, а также с наименьшими затратами времени и средств.

Для выполнения этих требований при полевых работах необходимо:

— зарегистрировать полезные сейсмические волны, образующиеся на акустических неоднородностях, в частности, на границах геологической среды, и содержащие информацию об ее упругих свойствах; с оптимальным расположением источников и приемников, обеспечивающим надежную корреляцию сейсмических результатов;

— выделить полезные волны в процессе регистрации или создать предпосылки для их выделения из всей зарегистрированной волновой картины на этапе обработки материалов без искажения кинематических и динамических свойств.

При обработке материалов выполнение этих условий позволит определить упругие свойства изучаемой геологической среды.

## 4.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ РАБОТ

Выбор оптимальной методики сейсмических работ зависит прежде всего от изменения упругих свойств в объеме изучаемой геологической среды по площади и глубине исследований (рис. 4.1).

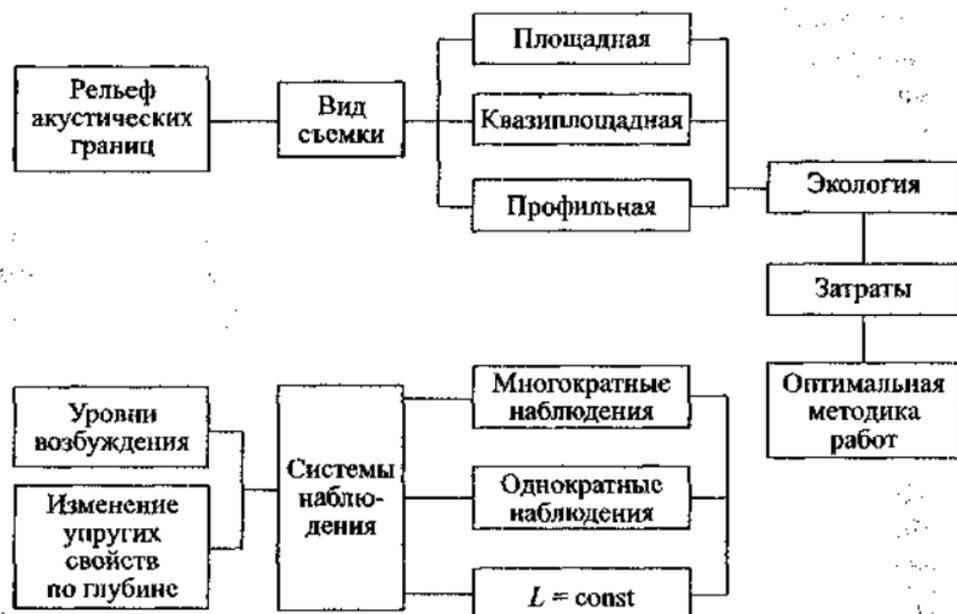


Рис. 4.1. Общая схема выбора оптимальной методики сейсмических работ.

Изменение упругих свойств геологической среды по площади определяет вид съемки — расположение точек изучения разреза на поверхности наблюдений, а изменение упругих свойств по глубине разреза и условия возбуждения обуславливают набор записей, которые необходимо получить в каждой точке.

Расположение точек на поверхности наблюдений зависит от сложности рельефа акустических границ, т. е. от изменения упругих свойств по площади работ. Сейсморазведка по своим физическим особенностям является объемным методом и в общем случае предполагается произвольный рельеф акустических границ, поэтому необходимо располагать пункты наблюдений (пункты изучения разреза) равномерно по площади с одинаковым шагом по  $X$  и  $Y$  ( $dX \approx dY$ ). Размеры  $dX$  и  $dY$  определяют элементарную

площадку — бин (bin) — элемент дискретизации изучаемой среды по площади, и съемка называется площадной — трехмерной (3D). Геологические структуры часто имеют некоторое простирание, и тогда вдоль него можно несколько увеличить шаг изучения разреза ( $dX < dY$  — бин прямоугольник). В частном случае при благоприятных сейсмогеологических условиях — геологическом строении, близком к двумерному, может быть использована профильная съемка ( $dX \ll dY$ ). Возможны некоторые промежуточные (квази-площадные) виды съемки.

Вид съемки, размер бина или шаг изучения разреза выбираются одинаково для МПВ и МОВ, но в МПВ существуют более жесткие ограничения по углам наклона преломляющих границ. Размер «мертвой» зоны растёт с увеличением угла наклона (см. гл. 2), поэтому для изучения преломляющей границы угол ее наклона должен удовлетворять следующему условию:  $\varphi < (90^\circ - i)$ , где  $i$  — критический угол.

От изменения упругих свойств по глубине разреза и условий возбуждения зависит характер возникающего волнового поля — прежде всего образование полезных волн и возможность применения сейсмического метода МПВ, а также интенсивность сейсмических волн-помех. При сейсмических работах МПВ и МОВ для разделения регулярных волн используются различия их кинематических и динамических свойств, которые проявляются на наборах сейсмических записей: на разрезах или сейсмограммах (ОТВ, ОТП и ОСТ). Существование волн-помех приводит к необходимости получения набора записей в каждой точке изучения разреза, т. е. к использованию определенной системы наблюдений для выделения полезных волн без искажения их свойств.

Применяемая система наблюдений — количество записей в каждом бине и их геометрические параметры (набор удалений источник-приемник) зависит от кинематических и динамических свойств регистрируемой волновой картины. В самом простом случае, когда совсем нет волн-помех, можно использовать минимальную систему наблюдений, обеспечивающую только регистрацию полезных волн. С появлением помех оптимальная система наблюдений усложняется, и в самом общем случае в каждой точке изучения разреза необходимо получать площадной набор записей.

В настоящее время методика работ МПВ выбирается в основном с позиций непрерывного однократного или малократного прослеживания преломляющих границ, не обеспечивается возможность

разделения волн, но, совершенно аналогично МОВ, необходимо выбирать методику МПВ не только для прослеживания волн, но и для их разделения и ослабления помех. Ниже рассмотрены основные принципы выбора оптимальной методики сейсмических наблюдений МПВ, в сравнении с методикой работ МОВ.

Прежде всего отметим некоторые физические особенности регистрации преломленных волн, которые влияют на выбор методики работ. Специфика преломленных волн обусловлена физическими особенностями их образования: начало регистрации на некотором расстоянии от источника, существование интервала (области) прослеживания и возможность регистрации в первых вступлениях.

Отраженные и преломленные волны различаются по областям их прослеживания. Преломленные волны прослеживаются от начальных точек и до некоторых максимальных удалений, обусловленных затуханием волн и интенсивностью источника (рис. 4.2), кроме того, преломленные волны прослеживаются в первых вступлениях. Отраженные волны прослеживаются, начиная от источни-

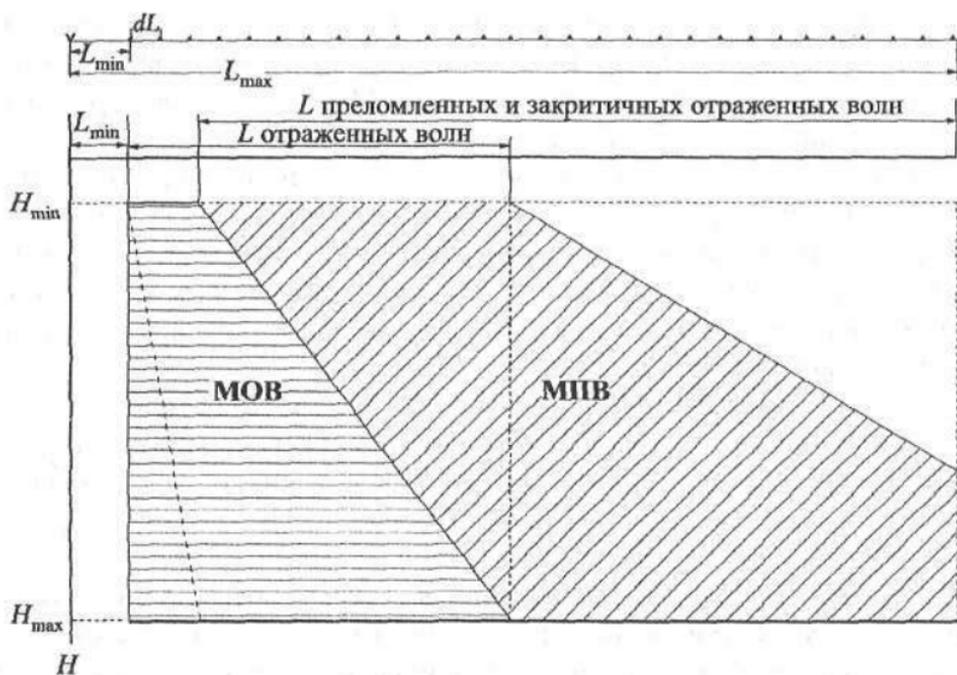


Рис. 4.2. Соотношение областей прослеживания полезных волн в МОВ и МПВ для некоторого интервала глубин  $H$  в зависимости от удаления источник-приемник  $L$ .

ка, в широком диапазоне удалений, включая и закритические отражения, но используются в обработке от минимальных удалений до удалений, примерно равных глубине образования волн, и не выходят в первые вступления.

Важной физической особенностью распространения преломленных волн и их отличие от отраженных волн заключается в том, что разделены точки входа в преломляющий пласт и выхода из него. Динамика преломленных волн зависит не только от геометрического расхождения при распространении в покрывающей среде и преломляющем пласте, но и от коэффициентов преломления в точках входа и выхода волны (см. рис. 2.4). Геометрическое расхождение преломленных волн можно учесть обычным образом, после чего динамика волн будет определяться коэффициентами преломления при входе в преломляющий пласт и выходе из него. При этом можно получать два варианта динамического разреза преломленных волн: по точкам входа волны в преломляющий пласт с осреднением влияния на амплитуду точек выхода и по точкам выхода волны из преломляющего пласта с осреднением влияния на амплитуды точек входа. Шаг между записями на результативных разрезах определяется шагом между источниками или приемниками соответственно, а кратность их наблюдений — количеством записей в сейсмограммах ОТВ или ОТП с учетом областей прослеживания волн.

#### 4.2. ВЫБОР РАЗМЕРА БИНА (ИЛИ ШАГА ИЗУЧЕНИЯ РАЗРЕЗА)

Вид съемки должен обеспечить изучение упругих свойств среды с помощью целевых волн, в частности преломленных и преломленно-дифрагированных в МПВ. В общем случае при площадных работах выбирается размер бина по  $X$  и  $Y$ , при профильных работах — шаг изучения разреза и расстояние между профилями. Эти параметры одинаковы для МПВ и МОВ и определяют надежность корреляции результатов сейсморазведки или представление их без искажений на волновом изображении геологической среды.

На волновом или акустическом изображении геологической среды в масштабе времени границы или геологические объекты можно считать плоскими в пределах бина. В таком случае уверенная корреляция будет определяться запаздыванием импульса на величину

не более четверти его преобладающего периода:

$$dt \leq T/4 = 2dh/V = 2dX \operatorname{tg} \varphi / V,$$

где  $V$  — скорость волн в покрывающей среде;  $T$  — преобладающий период волнового изображения или акустического разреза;  $\varphi$  — максимальный угол наклона изучаемой границы.

При произвольном рельефе преломляющих границ (трехмерном строении среды) бин должен быть квадратом со стороной (рис. 4.3)  $dX = dY \leq VT / (8 \operatorname{tg} \varphi) = \lambda / (8 \operatorname{tg} \varphi) = \lambda^* / 4$ , так как для разреза с учетом сейсмического сноса  $V^* = V / 2 \operatorname{tg} \varphi$  в отличие от разреза без учета сейсмического сноса, на котором  $V^* = V / (2 \sin \varphi)$ , где  $V^*$  — кажущаяся скорость и  $\lambda^*$  — кажущаяся длина волны сейсмического изображения геологической границы определяют размер неоднородности в масштабе времени.

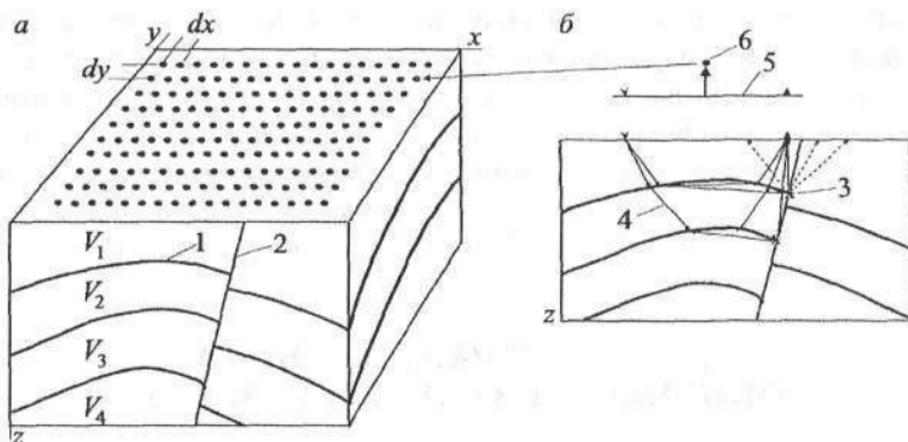


Рис. 4.3. Схема проведения площадных (3D) сейсморазведочных работ МПВ.

*a* — изучаемый объем геологической среды; *b* — разрез вкrest простира-ния пород.

1 — преломляющие границы; 2 — разрывные нарушения; 3 — объекты дифракции; 4 — лучи распространения преломленной волны (с проициани-ем); 5 — сейсмическая установка для работы МПВ с  $L = \text{const}$ ; 6 — условное обозначение сейсмической установки ее положения на площади работ ( $dX$  и  $dY$  — смещение сейсмической установки по  $X$  и  $Y$ ).

Уверенная корреляция результативных акустических разрезов в линейном масштабе времени соответствует также их представ-лению не менее чем четырьмя отсчетами в пределах кажущейся длины волны [22, 34], чтобы обеспечить малые амплитудные иска-жения (до 3 дБ) .

Для горизонтальных границ размер бина может быть бесконечным, а для вертикальных стремится к нулю, но практические возможности МПВ по изучению наклонных границ ограничены (см. выше).

Таким образом, размер бина в методе преломленных волн выбирается так же, как и в МОВ, так как результаты их должны представляться одинаково, но ограничения величины угла наклона в МПВ более жесткие, чем в МОВ.

Шаг изучения разреза в МПВ равен расстоянию между приемниками или источниками, т.е. расстоянию между сейсмограммами ОТП или ОТВ, а не между сейсмограммами ОСТ (ОГТ), как в МОВ. Поэтому его выбор и определяет расстояния между приемниками (или источниками:  $dX = dПП$  или  $dПВ$ ), для сравнения в МОВ шаг между приемниками увеличивается вдвое по сравнению с шагом изучения разреза (в МОВ  $dX = dПП/2$ ). Поэтому формально при одинаковых прочих параметрах в МПВ требуется меньший шаг между приемниками (или источниками), но, учитывая, что частоты преломленных волн ниже, чем отраженных, шаг изучения разреза в МПВ практически можно увеличить, соответственно и шаг между приборами также увеличится.

Для обеспечения заданной глубины изучения разреза в МПВ не только резко увеличиваются удаления источник-приемник (см. рис. 4.2), но также увеличивается время регистрации сейсмических записей и сейсмический снос волн (рис. 4.4). Конкретные значения максимальных удалений и времени регистрации зависят от изменения упругих свойств с глубиной, но всегда эти параметры больше, чем в МОВ [31].

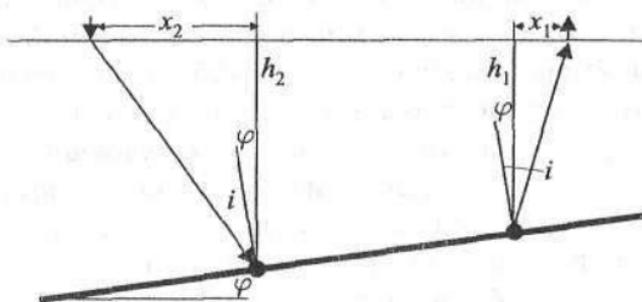


Рис. 4.4. К оценке глубины изучения разреза и сейсмического сноса преломленных волн.

Площадь наблюдений по сравнению с поверхностью изучаемого объема геологической среды в МПВ увеличивается за счет сейсмического сноса, который в МПВ зависит от угла наклона границ и его соотношения с критическим углом и различается для точек входа и выхода преломленной волны:

$X_c = h \sin(i \pm \varphi) / \cos i$ , где  $h$  — глубина до границы в точке входа волны в преломляющий пласт или выхода из него.

### 4.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАБОРА ЗАПИСЕЙ В БИНЕ

В соответствии с общей схемой выбора методики сейсмических работ можно определить минимальную систему наблюдений, достаточную при отсутствии помех, и общую систему наблюдений, необходимую в условиях регистрации различных волн-помех.

В условиях отсутствия помех для описания методики работ необходимо и достаточно определить следующие параметры: размер бина, длительность регистрации (или оптимальную глубину изучения разреза) и увеличение площади работ по сравнению с поверхностью изучаемой среды.

Размер бина определяется видом результативного разреза, а для выделения полезных волн необходимо в каждом бине получить набор сейсмических записей. Записи, относящиеся к одному бину, характеризуются типом набора (ОТВ, ОТП, ОСТ), количеством записей в наборе и шагом между ними.

Сначала рассмотрим случай, когда совсем нет помех и в каждом бине необходимо лишь зарегистрировать полезные волны. В самом простом случае для изучения упругих свойств геологической среды по целевым волнам достаточно в каждом бине получить только по одной записи — это минимально возможная система наблюдений в сейсморазведке. В МОВ такой минимальной системой наблюдений является способ центрального луча (СЦЛ), он позволяет зарегистрировать отраженные волны и при известном скоростном законе получить распределение упругих свойств с глубиной. В МПВ минимальную систему наблюдений можно создать с помощью перемещающейся по площади или профилю установки  $L = \text{const}$ , обеспечивающей регистрацию преломленных волн.

Заметим, что подобная система наблюдений использовалась в самом начале применения МПВ для поиска соляных куполов на радиальных профилях в варианте первых вступлений преломленных волн [36].

Возможность регистрации преломленных волн в первых вступлениях значительно упрощает технологию и технику регистрации, а также обработку полученных материалов, так как регистрации первых вступлений преломленных волн помехи не мешают и не надо использовать приемы выделения волн на фоне различных помех. По этой причине МПВ с регистрацией только первых вступлений легче применять технически и он был первым сейсмическим методом, практически использованным для решения геологических задач. Однако при этом используется не вся информация о преломленных волнах, что обедняет получаемые результаты и делает их неоднозначными, поэтому в настоящее время редко используют только первые вступления преломленных волн.

Применение системы наблюдений с перемещающейся установкой  $L = \text{const}$  хотя и позволяет зарегистрировать преломленные волны, но недостаточно для изучения скоростей их распространения и построения волнового изображения изучаемой среды. Для определения упругих параметров геологической среды и построения преломляющих границ необходимо применять встречные непрерывные системы наблюдения преломляющих горизонтов. Самая простая из них — встречная четырехточечная система наблюдений, применяемая при акустическом каротаже скважин. При наземных работах оптимальной в отсутствие помех является встречная однократная система наблюдений с набором удалений источник-приемник, достаточным для изучения целевых преломляющих границ — это практически основная система наблюдений, используемая в настоящее время при работах МПВ на малых глубинах (изучение ВЧР) до изучения всей земной коры в ГСЗ. Она обеспечивает получение в каждой бине две записи преломленных волн и решает задачу построения волнового изображения среды по преломленным волнам в отсутствие помех, но не решает проблемы разделения волн и ослабления помех. В МПВ в последующих вступлениях всегда регистрируются помехи, в частности, закритические отраженные волны, но даже в условиях отсутствия помех необходимо разделение самих полезных волн, поэтому возможности минимальных систем наблюдений в МПВ ограничены, включая и наиболее популярную — встречную однократную систему наблюдений.

При регистрации волн-помех необходимо в каждой точке изучения разреза обеспечить получение некоторого набора записей. В методе преломленных волн основными помехами являются среднеско-

ростные сейсмические волны, кажущиеся скорости которых примерно равны пластовым скоростям в среде. К ним относятся закритические отраженные волны, кратные отраженно-преломленные волны и интерференция самих преломленных волн. Сами преломленные волны по значениям кажущихся скоростей также относятся к среднескоростным волнам. Низкоскоростные волны-помехи, обусловленные ВЧР, которые являются серьезной проблемой в МОВ, не мешают прослеживанию преломленных волн. Эти помехи не накладываются на полезные волны из-за различия областей регистрации, так как полезные волны прослеживаются на значительных расстояниях от источника и имеют более высокие кажущиеся скорости. Низкоскоростные волны-помехи можно вырезать нижним мьютингом. Поэтому в МПВ более мягкие требования к условиям возбуждения, чем в МОВ: группирование приборов и/или источников для ослабления регулярных волн в МПВ обычно не применяется, а важна только интенсивность источника. Высокоскоростные помехи (однократные и кратные докритические отражения) также не мешают прослеживанию преломленных волн. В МПВ существует не только проблема ослабления помех, но и проблема разделения самих преломленных волн, так как они почти всегда интерферируют (накладываются друг на друга) в рабочей области удалений и времен. В МОВ в геологических разрезах с нарастанием скорости с глубиной также происходит интерференция полезных волн, но это происходит только на больших удалениях от источника, которые на практике не используются в обработке [28].

#### 4.3.1. Возможности разделения регулярных волн

Сейсмические волны различаются по направлению полного вектора смещения (поляризации), кинематическим и динамическим свойствам, эти различия можно использовать для их разделения.

При совместном использовании параметров поляризации и кинематических свойств волн можно определить тип колебаний и направление подхода волны. Поляризационная фильтрация позволяет разделить волны по направлению подхода и типу колебаний. Однако ее применение ограничено осложнением поляризации волн за счет их интерференции и анизотропии пород, технологией работ и техническими особенностями регистрирующей аппаратуры.

Возможности разделения волн на основе их поляризации при наземных наблюдениях ограничиваются также существованием и

особенностями строения ВЧР. В зонах пониженных и малых скоростей все волны глубинного происхождения распространяются по лучам, близким к вертикальным, поэтому по направлению полного вектора смещения можно разделить волны только по типу колебаний: продольные или поперечные. При этом упрощаются условия регистрации: для первых волн достаточно использовать только вертикальные приборы, а для вторых — горизонтальные.

При сейсмических работах МПВ и МОВ (морских, наземных, в скважинах, шахтах и т. п.) для разделения регулярных волн используется в основном различие их кинематических и динамических свойств, которые проявляются на наборах сейсмических записей: на разрезах или сейсмограммах (ОТВ, ОТП и ОСТ). В таком случае процедуры выделения и ослабления волн являются многоканальными фильтрами. Особенности применения многоканальных фильтров, как и одноканальных, удобнее и проще рассматривать в частотной области.

Волновая картина, зарегистрированная на наборах записей  $A(t, X)$ , однозначно преобразуется в комплексный двумерный частотный спектр, который можно представить в виде амплитудной  $A_{\omega}(f, K)$  и фазовой  $\varphi(f, K)$  характеристик, при этом различие кинематических и динамических свойств волн переходит в различие их спектров. Наклон двумерного спектра для регулярной волны определяется ее кажущейся скоростью  $V^* = \Delta f / \Delta K$ .

На двумерных спектрах регулярные волны можно разделить как по различию амплитудных спектров (динамике волн) с помощью одномерной фильтрации, так и по различию кажущихся скоростей (кинематике) двумерным фильтром, или совместно используя различия в кинематике и динамике волн. Результат двумерной фильтрации определяется особенностями двумерного спектра исходного набора записей и частотной характеристикой фильтра. Для разделения волн необходимо, чтобы их двумерные спектры различались в рабочей полосе частот и/или диапазоне кажущихся скоростей. Выделение волн на наборе записей (сейсмограмме или разрезе) можно рассматривать как двумерную фильтрацию по кажущимся скоростям и частоте, т. е. по их кинематическим и динамическим свойствам (рис. 4.5).

Независимо от типа набора записей разделение (выделение и ослабление) волн происходит по одной схеме. Все существующие способы разделения волн на наборах записей являются двумерными фильтрами с различными частотными характеристиками, спе-

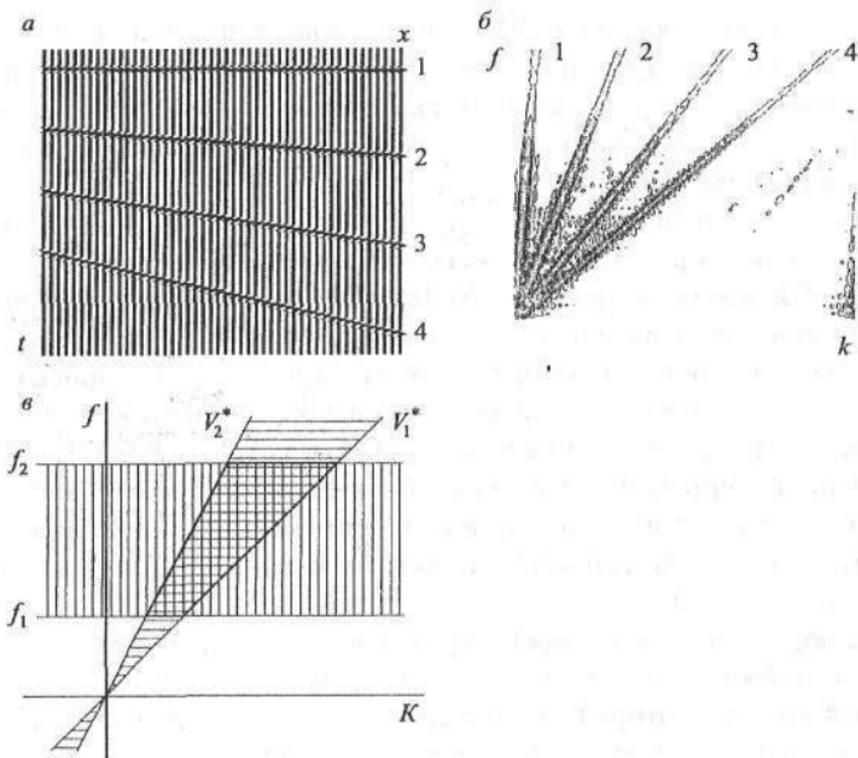


Рис. 4.5. Принцип разделения волн в двумерной частотной области.

*a* — сейсмограмма; *b* — ее двумерный спектр ( $f - K$ ); *в* — частотная характеристика двумерного фильтра для выделения волны 3.

цифическими по технологии и применению, использующими различные кинематики и динамики полезных волн и помех. Наиболее простая и эффективная процедура выделения полезных волн — суммирование набора записей, такая процедура является интерференционной системой.

Интерференционные системы могут быть площадными (по  $X$  и  $Y$ ) или профильными (только по  $X$ ) и не зависят от времени. Частотная характеристика одномерного суммирования по  $X$  также одномерна — она зависит только от волнового числа  $K$  и рассчитывается по параметрам интерференционной системы: значениям весовой функции  $H(X)$  и количеству записей  $n = X/\Delta X$ .

Амплитудная характеристика интерференционной системы для постоянной весовой функции представляется обычным выражением

ем [10, 22, 36]:

$$[H(K)] = \frac{1}{n} \left[ \frac{\sin(\pi K X)}{\sin(\pi K \Delta X)} \right].$$

В соответствии с теоремой отсчетов В. А. Котельникова  $\Delta K X = 1$ , откуда  $\Delta K = 1/(n\Delta X)$ . В таком случае число отсчетов спектра по  $K$  также равно  $n$ :

$$2K_N/\Delta K = (1/\Delta X)/(1/n\Delta X) = n,$$

и можно заменить переменную  $K$  перебором номеров  $KX = i\Delta K X = i$ , а амплитудную характеристику записать в следующем виде (рис. 4.6):

$$[H(K)] = \frac{1}{n} \left[ \frac{\sin(i\pi)}{\sin(i\pi/n)} \right],$$

где  $i$  — номер компоненты, который изменяется от  $-(n-1)/2$  до  $+(n-1)/2$ .

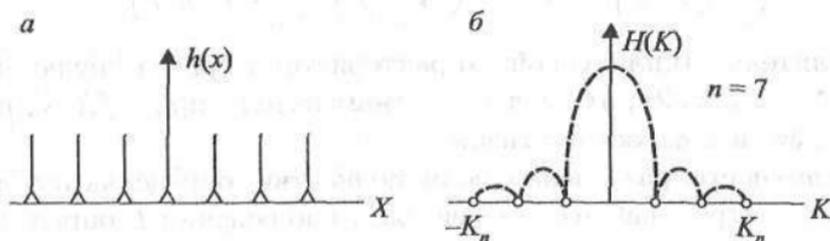


Рис. 4.6. Определение амплитудной частотной характеристики интерференционной системы:

*a* — интерференционная система; *б* — ее амплитудная частотная характеристика в зависимости от волнового числа.

Форма амплитудной частотной характеристики интерференционной системы самая простая — она равна единице только при  $K = 0$ , а при остальных значениях  $K$  равна нулю, поэтому она расположена всегда вдоль оси частот и не зависит от параметров интерференционной системы: размера базы наблюдений и шага между записями в ней, а также от формы весовой функции (прямоугольная, треугольная, колокольная и т. д.). От всех этих параметров зависит только двумерный спектр регистрируемой волновой картины. Так как амплитудная частотная характеристика интерференционной системы не зависит от параметров набора записей, она всегда выделяет из двумерного спектра волновой картины только ту его

часть, которая расположена вдоль оси частот, т. е. выделяет только волны с кажущимися скоростями, близкими к бесконечным [22, 31].

При фильтрации амплитудные частотные спектры волновой картины и фильтра (интерференционной системы) умножаются, а фазовые складываются, поэтому результирующий спектр также становится одномерным — только вдоль оси частот. При переходе в обычную область получается одна суммотрасса.

Таким образом, задача выделения волн с помощью суммирования сводится к рассмотрению двумерного частотного спектра суммируемой волновой картины набора записей (сейсмограммы) только вдоль оси частот, т. е. одномерного спектра. Амплитудный спектр вдоль оси частот зависит от параметров регистрируемой волновой картины на наборе записей, в частности, при суммировании с постоянными весовыми коэффициентами спектральная характеристика имеет вид

$$\left[ H \left( \frac{f}{V^*} \right) \right] = \frac{1}{n} \left[ \sin \left( \frac{\pi f X}{V^*} \right) / \sin \left( \frac{\pi f X}{V^* n} \right) \right].$$

Числитель амплитудной характеристики равен нулю при  $\pi f X / V^* = 0, \pi, 2\pi, 3\pi$ , и т. д., а знаменатель при  $\pi f X / V^* n = 0, \pi, 2\pi, 3\pi$ , и т. д. соответственно.

Возможности разделения волн полностью определяются двумерным спектром набора записей: база наблюдений  $L$  определяет ширину области двумерного спектра регулярных волн, а шаг между записями  $\Delta L$  — период повторения спектра вдоль оси частот, и в процессе полевых работ необходимо обеспечить оптимальные параметры этого набора [10, 22, 31].

Для разделения волн необходимо иметь на базе наблюдений различие во временах прихода полезных волн и помех не менее периода колебаний (т. е. база наблюдений должна быть не меньше кажущейся длины волны):  $L \geq \lambda^* = T V^*$ , откуда  $f_1 = V^* / L$ , где  $\lambda^*$  и  $V^*$  — кажущаяся длина и скорость волны-помехи соответственно после редукции сейсмограмм ОТП (ОТВ) или их миграции. Это приводит к прямой зависимости между длиной области прослеживания помехи и степенью ее ослабления. Период повторения спектра волны по оси частот  $f_0 = V^* / \Delta L$ , где  $\Delta L$  — шаг между записями в сейсмограмме ОТВ (или ОТП),  $\Delta L = \Delta ПП$  (или  $\Delta ПВ$ ),  $f_0 = f_2 + f_1$ , а  $f_1 \div f_2$  — полоса частот, в пределах которой помеха может быть ослаблена (рис. 4.7).

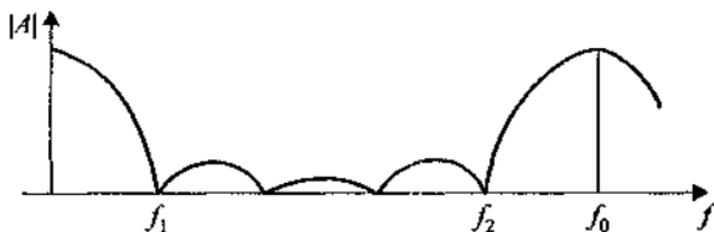


Рис. 4.7. Амплитудная характеристика волны с некоторой кажущейся скоростью при суммировании записей.

Отмеченные особенности разделения волн в двумерной частотной области одинаковы для любых наборов сейсмических записей: временных разрезов, сейсмограмм ОТП и ОТВ, ОСТ и др. Наборы записей различаются кинематическими и динамическими свойствами волн, зарегистрированных на них и, соответственно, характером спектров этих волн в двумерной частотной области. При выделении полезных волн требуется решить противоречивую задачу: в необходимой степени ослабить волны помехи и при этом не исказить динамические и кинематические свойства полезных волн. Ее решение зависит от типа используемого набора записей и его параметров. Поэтому возникает вопрос, какой набор записей необходимо использовать в интерференционной системе для выделения полезных волн?

#### 4.3.2. Требования к параметрам сейсмограмм ОТП (ОТВ)

С учетом отмеченных требований полезные волны на наборах записей, используемых в качестве интерференционных систем, должны удовлетворять следующим условиям:

- соответствовать минимальному участку геологической границы и объему покрывающей среды,
- технологически просто трансформироваться с переводом кажущихся скоростей полезных волн в бесконечные скорости (спектры волн перемещать на ось частот),
- иметь оптимальные параметры (базу наблюдений и шаг между записями) для разделения волн.

Полезные волны на наборах записей должны быть образованы минимальной поверхностью границы (площадкой не больше диаметра первой зоны Френеля) и минимальным объемом покрыва-

ющей среды. Под участком подразумевается площадь границы, с которой связано образование полезной волны, зарегистрированной и представленной на сейсмограмме или разрезе.

Искажения волн обусловлены в основном размером участка границы, которому соответствует волна, зарегистрированная на наборе записей. На разных наборах записей полезные волны соответствуют участкам границ различной протяженности (см. табл. 2.1). При использовании интерференционных систем происходит суммирование записей, что определяет усреднение волны от участка границы, а в результате приводит к искажению ее кинематических и динамических свойств. Кинематические искажения волн приводят к изменению углов наклона границ: выполаживанию и изменению формы границ, а динамические — к осреднению и изменению амплитуд, т. е. к искажению упругих параметров на границе. Искажения полезных волн возрастают с увеличением длины участка преломляющей границы, соответствующего набору записей, и со сложностью рельефа границы.

В МПВ по физическим особенностям распространения волн любой набор записей обусловлен значительным объемом геологической среды, поэтому наиболее оптимально использовать наборы записей, которые относятся к общей точке входа в преломляющий пласт или выхода из него, в таком случае оптимальным набором для интерференционных систем являются сейсмограммы ОТП (или ОТВ), а не ОСТ, как в МОВ. При использовании сейсмограмм ОТП общей для преломленных волн является точка выхода волны из преломляющего пласта (при этом осредняется влияние точек входа волны и распространение в преломляющем пласте), для сейсмограммы ОТВ соответственно — общая точка входа, а осредняются точки выхода и распространение в преломляющем пласте. На сейсмограммах ОСТ записи преломленных волн не имеют общих точек на границе: у каждой записи свой путь распространения и свои точки входа и выхода волны в преломляющий пласт и при ее суммировании в большей степени искажается динамика и кинематика волн — происходит размазывание границы. Поэтому для разделения и выделения преломленных, в частности и головных волн, наиболее оптимально (с наименьшими искажениями их кинематических и динамических свойств) использование сейсмограмм ОТП (или ОТВ).

Для некоторых наборов записей технологически просто трансформировать годографы полезных волн в постоянные значения

времени (или перевести значения кажущихся скоростей в бесконечные), т.е. расположить их двумерные спектры вдоль оси частот. Например, в МОВ на сейсмограммах ОСТ однократные отраженные волны соответствуют минимальному размеру отражающей границы по сравнению с другими наборами записей: временными разрезами, сейсмограммами ОТВ и ОТП. Кроме того, годографы отраженных волн на сейсмограммы ОСТ легко спрямить, используя значения скоростей ОСТ для полезных волн. Поэтому в МОВ для разделения волн (выделения полезных и ослабления помех) используется в основном сейсмограмма ОСТ, которая получается в каждой точке изучения разреза с оптимальными параметрами (количеством записей и шагом между ними). В МПВ требуется трансформировать наборы записей на сейсмограммах ОТП (или ОТВ).

Таким образом, для выделения полезных преломленных волн в каждом бине необходимо иметь уже не одну запись, а сейсмограммы ОТП или ОТВ (рис. 4.8). В самом общем случае (при регистрации различных помех) в каждом бине необходимо получить площадные сейсмограммы ОТП (и ОТВ), параметры которых определяют возможности выделения истинных преломляющих границ и ослабления ложных. По различию кинематических и динамических свойств волн на этих сейсмограммах и можно выделить полезные волны.

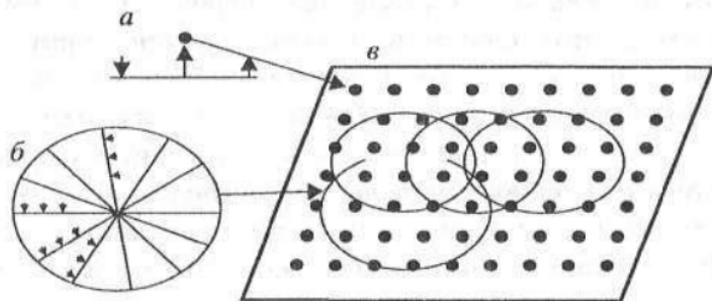


Рис. 4.8. Проведение площадных (3D) сейсмических работ МПВ.  
 а — установка  $L = \text{const}$ ; б — площадная сейсмограмма ОТП; в — площадная (3D) съемка.

Использование сейсмограмм ОТП или ОТВ в каждом бине, хотя и приводит к увеличению затрат на полевые работы МПВ, позволяет ослабить различные помехи при минимальном искажении полезных волн. Обработка этих сейсмограмм может быть различной: суммирование записей после редукции для разделения волн и миграция исходных записей. Более подробно особенности исполь-

зования сейсмограмм ОТП или ОТВ в МПВ при обработке будут рассмотрены в гл. 7.

Для эффективного разделения волн (или границ) необходимо выбрать параметры сейсмограмм ОТП (или ОТВ): минимальное и максимальное удаления источник-приемник, кратность наблюдений (количество записей в сейсмограммах) и шаг по азимутам. Вместе с параметрами рассмотренной выше минимальной системы наблюдений (размером бина или шагом изучения разреза) они и определяют оптимальную методику сейсмических работ МПВ. Рассмотрим выбор оптимальных параметров этой сейсмограммы для профильных систем наблюдений.

База наблюдений должна располагаться в интервале удалений, обеспечивающих прослеживание преломленных волн. Выбор величины минимального удаления источник-приемник зависит от координаты начальной точки преломленной волны от самой мелкой границы. Максимальное удаление определяется интервалом прослеживания волны от наиболее глубокой границы.

При проведении работ необходимо получить требуемый набор удалений источник-приемник, обеспечивающий возможность выделения полезных волн в некотором интервале геологического разреза; при обработке полученных материалов используются свои оптимальные удаления для каждой глубины разреза (см. рис. 4.2).

В МПВ обязательно использование встречных систем наблюдений — только в этом случае возможно решение обратной задачи в процессе обработки материалов для произвольной конфигурации преломляющих границ. В общем случае оптимальной является встречная многократная система наблюдений, которая в присутствии помех позволяет определить упругие свойства геологического разреза по кинематике и динамике преломленных волн. В МПВ преобладающие частоты обычно ниже, чем в МОВ, поэтому используются относительно большие базы сейсмограмм ОТП или ОТВ для разделения волн по сравнению с сейсмограммами ОСТ в МОВ.

Для площадных систем наблюдений необходимо выбрать еще шаг по азимутам для получения в каждой точке изучения разреза площадного многократного годографа ОТП (или ОТВ).

Выше рассмотрены параметры сейсмограмм ОТП или ОТВ в одном бине при изучении геологической среды. Для изучения всего объема среды необходимо получить такие сейсмограммы в каждом бине по всей площади наблюдений.

#### 4.4. ПРАКТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ МПВ

В настоящее время при работах МПВ на суше технически проще и дешевле регистрировать сейсмограммы ОТВ, используя перемещающуюся по площади или профилю сейсмическую установку, состоящую из одного источника и многоканального регистратора. При этом обычно шаг между точками приема меньше, чем между источниками. На море работы МПВ проводятся чаще с неподвижными автономными регистраторами, донными или плавающими, и движущимся источником (регистрируются сейсмограммы ОТП), обычно шаг между возбуждениями меньше, чем между регистраторами. В соответствии с принципом взаимности их можно переименовать, но реально на суше размер бина определяется расстоянием между точками приема, а набор записей в бине — сейсмограммой ОТП. На море, наоборот, размер бина определяется шагом между источниками, а в каждом бине получится сейсмограмма ОТВ.

Поэтому при выборе методики работ необходимо прежде всего определить, какими сейсмограммами будут обеспечены параметры бина и, соответственно, количество записей в бине, т. е. размер бина и кратность суммирования в бине.

Для практического получения сейсмограмм ОТП с выбранными параметрами: базой наблюдений  $L$ , расстоянием между записями  $dL$ , при шаге изучения разреза  $dL = dX_p = dПП$ , необходимо определить канальность приемного устройства  $K_{ст}$ , расстояние между каналами в установке  $dПП$  и шаг смещения всей установки — шаг между источниками  $dПВ$ .

Для любой сейсмической установки (один источник и многоканальное приемное устройство с  $L = L_{max} - L_{min}$ ) существуют очевидные соотношения между ее параметрами, параметрами сейсмограммы ОТП и шагом изучения разреза: количество записей в сейсмограмме ОТП (кратность по ОТП) равна  $n_{отп} = (L_{max} - L_{min}) / dПВ = K_{ст}^* dПП / dПВ$ , но для каждой волны необходимо учесть свой фактический интервал прослеживания. В каждом бине будет получена сейсмограмма ОТВ, количество записей в которой (кратность по ОТВ) равна соответственно  $n_{отв} = K_{ст} = (L_{max} - L_{min}) / dПП$ .

Для сравнения напомним, что кратность наблюдений в МОВ (количество записей в сейсмограмме ОСТ) определяется следующим выражением:  $n_{кр} = K_{ст}^* dПП / 2dПВ$ .

В профильном варианте нанесем выбранные параметры сейсмограмм ОТП на обобщенную плоскость вначале в одной точке изучения разреза, а с учетом оптимального шага изучения разреза и по всему профилю (рис. 4.9).

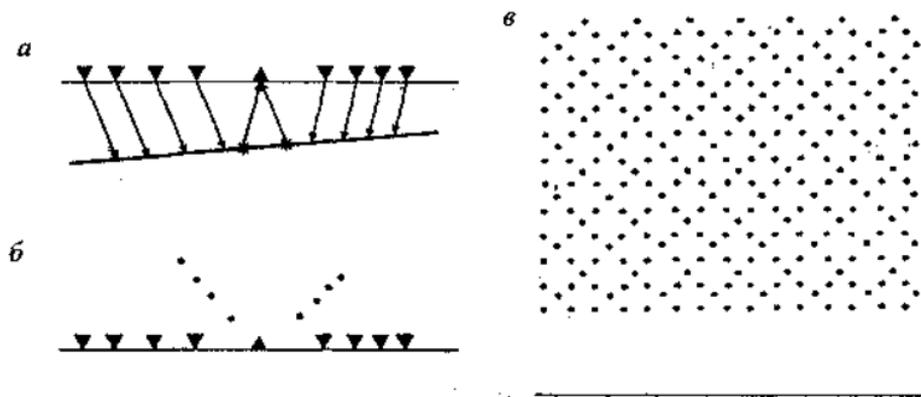


Рис. 4.9. Формирование профильной многократной системы наблюдений МПВ. а — схема лучей для преломленных волн в одной точке приема; б — изображение системы наблюдений на обобщенной плоскости для одной точки приема; в — система наблюдений для многократного непрерывного прослеживания преломляющих горизонтов по профилю.

При наземных работах МПВ обычно  $d_{МПВ} > d_{ПП}$ , соответственно и шаг по разрезу ОТВ больше, чем по ОТП, кратность суммирования имеет обратное соотношение: по ОТВ больше, чем по ОТП. При морской технологии работ чаще выполняется условие  $d_{МПВ} < d_{ПП}$  и соотношение параметров кратности и шага изучения разреза по ОТП и ОТВ меняется.

Если нанести на обобщенную плоскость однократную систему наблюдений, она для МПВ и МОВ формально будет одинаковой, но в МОВ для каждой точки разреза ОГТ будет одна запись, а в МПВ для разреза ОТП — две записи, при этом шаг изучения разреза будет в два раза больше, чем в МОВ. Так как в МПВ чаще получаются разрезы ОТП, кратность их суммирования по сравнению с ОГТ в два раза больше.

Оптимально выбранные параметры площадных сейсмограмм ОТП или ОТВ: минимальное и максимальное удаления источник-приемник (или минимальное удаление и база наблюдений), кратность наблюдений (или с учетом базы — шаг между записями в сейсмограммах) и шаг по азимутам — определяют оптимальную систему наблюдений в МПВ.

Методика работ МПВ выбирается для регистрации полезных волн от всех преломляющих границ, а также для разделения волн: выделения полезных волн и ослабления помех. Из-за физических особенностей образования преломленных волн обе задачи решаются сложнее, чем в МОВ. Для регистрации преломленных волн дополнительными параметрами являются области их прослеживания от начальной точки преломленной волны до удалений, где волна еще выделяется по интенсивности. Основной задачей здесь является согласование индивидуальных систем наблюдений для каждой преломляющей границы с общей системой наблюдений для всех границ (рис. 4.10). Для разделения преломленных волн и ослабления помех необходимо обеспечить многократное прослеживание преломляющих границ, разделение и ослабление волн происходит за счет суммирования границ (после миграции) или суммирования волновой картины на сейсмограммах ОТП (ОТВ) как обычной интерференционной системой. Так как преломленные волны прослеживаются только на некоторых удалениях от пункта возбуждения, возрастающих с увеличением глубины границы, то в МПВ труднее обеспечить необходимую кратность прослеживания всех преломляющих границ. Поэтому, вопреки существующему мнению о дешевых работах МПВ, для получения динамического разреза методика работ МПВ должна быть не менее сложная и работы не дешевле, чем МОВ. Конечно, однократные системы МПВ дешевле многократных МОВ, но многократные системы МПВ могут быть дороже многократных МОВ.

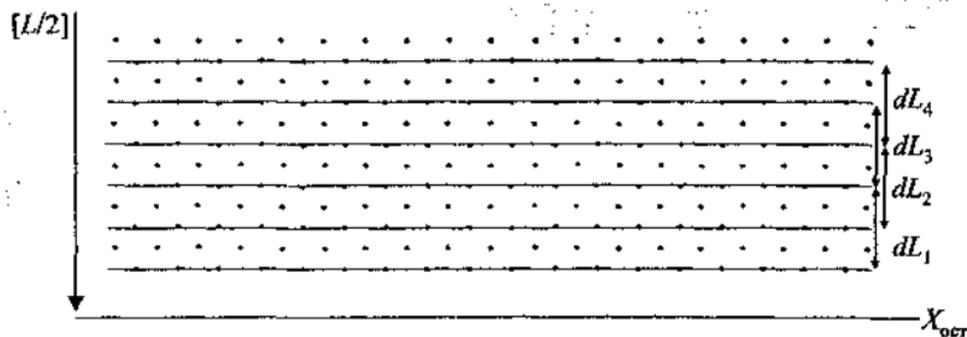


Рис. 4.10. Выбор профильной системы наблюдений в методе преломленных волн.

Для уменьшения влияния рефракции волн на результаты работ МПВ области регистрации преломленных волн часто сокращают,

без выхода на большие удаления источник-приемник, но в таком случае уменьшаются возможности разделения волн.

Условия проведения работ (суша, море, транзитная зона) также накладывают некоторые ограничения на выбор методики их выполнения. В зависимости от условий проведения работ система может быть регулярной и нерегулярной (рис. 4.11). Система наблюдений регулярная, когда пикеты возбуждения, приема образуют равномерную сетку на площади, или равномерный шаг по профилю и нерегулярная, когда они распределяются случайным образом по площади или профилю. В последнем случае размер бина выбирается не только по кривизне акустических границ, но и по выдержанности параметров сводной сейсмограммы ОТП: количеству записей, удалений источник-приемник и распределению удалений по азимутам. На суше профильные системы стараются сделать регулярными (хотя используются и слалом-профили), а площадные редко удается сделать регулярными. На море чаще всего используются регулярные системы наблюдений, как при площадных, так и при профильных работах.

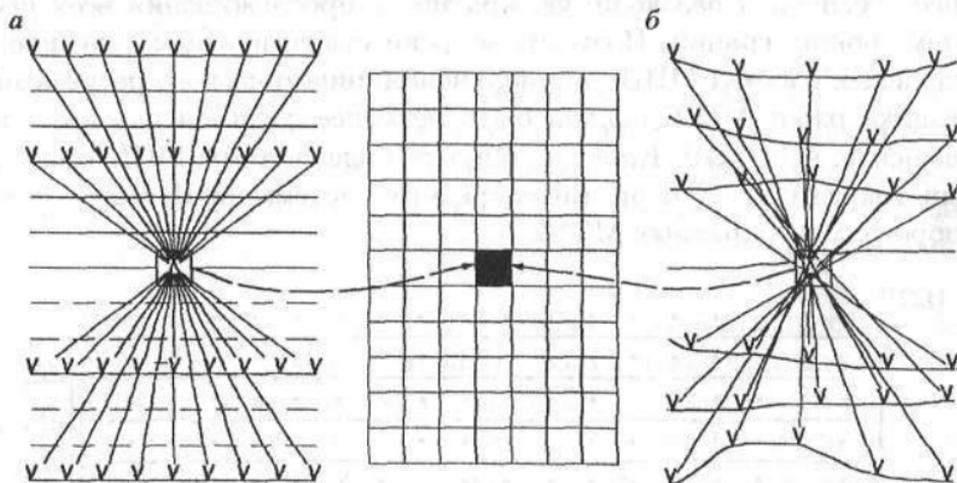


Рис. 4.11. Формирование бина при площадных системах наблюдений МПВ:  
а — регулярных; б — произвольных.

Мы рассмотрели выбор системы наблюдений и ее осуществление с позиций детального изучения геологической среды и оптимального разделения волн. Наиболее общая система наблюдений используется при площадных работах с получением площадной сейсмо-

граммы ОТП или ОТВ в каждом бине (см. рис. 4.1). Упрощение методики работ может происходить как по виду съемки — от площадной к профильной, так и по набору записей в бине — от площадной сейсмограммы ОТП (ОТВ) к одной записи с  $L = \text{const}$ .

Основные принципы выбора оптимальной методики сейсмических работ (МПВ и МОВ) не зависят от поставленных задач или глубины исследований. Они определяются тем, что результаты работ должны содержать всю зарегистрированную информацию об упругих свойствах среды — кинематическую и динамическую в исследуемом диапазоне глубин. При решении любых геологических задач (изучение земной коры, или изучение ВЧР, инженерные работы, малоглубинные, сверхглубинные и т. д.) подход к выбору оптимальной методики работ одинаков, различаются только ее параметры: размер бина, минимальные и максимальные удаления источник-приемник, кратность наблюдений, время регистрации записей. Например, при инженерных исследованиях и изучении ВЧР все параметры системы наблюдений уменьшаются: шаг изучения разреза 2–5 м в зависимости от длины волны, максимальное удаление источник-приемник 20–100 м в зависимости от глубины изучения разреза. При региональных работах параметры системы наблюдений резко увеличиваются: шаг изучения разреза до 100–200 м, максимальные удаления — до 100–200 км.

Реализация системы наблюдений на практике в каждом конкретном случае, кроме изменения упругих свойств по глубине и площади исследования, зависит также от технической оснащенности метода, экологических ограничений и затрат на проведение работ (см. рис. 4.1).

При совместном применении МОВ и МПВ на одном профиле (или площади) возникает вопрос о совмещении (комбинировании) систем их наблюдений. На практике параметры методики работ МПВ и МОВ различаются по условиям возбуждения и регистрации, требованиям к размеру бина, минимальным и максимальным удалениям источник-приемник и кратности наблюдений, поэтому системы наблюдений отрабатываются раздельно. Обработка полученных материалов МОВ и МПВ также выполняется раздельно, хотя можно использовать результаты одного метода в другом, например, скорость в покрывающей среде из МОВ в МПВ, а совмещаются уже результаты работ на этапе их интерпретации.

При работах МОВ всегда регистрируются и преломленные волны, глубина изучения преломляющих границ зависит от макси-

мальных удалений, используемых в системе наблюдений. Так как в МОВ в последнее время применяются большие удаления источник-приемник и высокая кратность наблюдений, полученные записи можно использовать для получения волновых изображений по преломленным волнам. В качестве примера можно назвать работы МОВ в транзитных зонах суша-море с телеметрической аппаратурой, где максимальные удаления источник-приемник достигают 12-15 км.

Обратная ситуация, когда при работах МПВ используют отраженные волны, бывает редко, ибо применяемые в настоящее время системы наблюдений МПВ не оптимальны для регистрации не только преломленных, но и отраженных волн.

## Глава 5

# АППАРАТУРА И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СЕЙСМОРАЗВЕДКИ МПВ

Для использования сейсмических волн (преломленных, отраженных и др.) при изучении акустических свойств геологической среды необходимо возбуждать и регистрировать упругие колебания.

К техническим средствам сейсморазведки относятся [10, 31, 36]: источники упругих волн, приемники, средства передачи информации, системы регистрации, средства управления и контроля за работой аппаратуры, обрабатывающая техника, вспомогательное оборудование и транспорт.

К техническим средствам и аппаратуре для сейсморазведки предъявляются особые требования, которые зависят от физических свойств регистрируемых волн (полезных и помех), особенностей методики работ, условий местности, где проводятся исследования, ограничений экологии и затрат на выполнение работ.

### 5.1. ФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ЗАПИСЕЙ

Сейсмические записи являются результатом наложения регулярных волн различной амплитуды и формы (полезных и помех) и случайных колебаний. Регулярные волны представляют собой свертку падающего импульса с коэффициентами преломления, дифракции и отражения. Свойства регулярных волны можно охарактеризовать динамическим диапазоном, полосой частот и диапазоном кажущихся скоростей.

Нижний предел амплитуд регистрируемых сейсмических записей определяется уровнем случайных колебаний (микросейсм). Конечно, имеются способы снижения уровня микросейсм, включая выбор времени регистрации (по погодным условиям: ветер, дождь и др.), использование статистического эффекта группирования приборов на малых базах и т. д., но всегда существует некоторый фон, который ограничивает нижний предел регистрируемых амплитуд сейсмических волн. При многократных наблюдениях уровень регистрируемых микросейсм можно увеличить в расчете на последующее суммирование записей, которое, помимо ослабления регулярных волн-помех, понижает также уровень случайных колебаний.

С другой стороны, максимальная амплитуда сейсмических записей определяется интенсивностью источника. Поэтому динамический диапазон сейсмических записей зависит от целого ряда условий и меняется в широких пределах. При проведении сейсмических работ МПВ и МОВ смещение дневной поверхности изменяется от  $10^{-2}$  мм до 0,1 мм. Таким образом, динамический диапазон сейсмических волн на суше может быть 140 дБ. На море уровень микросейсм ниже и динамический диапазон достигает 160 дБ.

В МПВ за счет больших удалений источник-приемник динамический диапазон увеличивается по сравнению с МОВ, но в зависимости от времени (для постоянного удаления) амплитуды записей изменяются меньше.

Интенсивность сейсмических волн уменьшается за счет геометрического расхождения энергии, поглощения и рассеяния, прохождения через границы акустических свойств. Геометрическое расхождение энергии преломленных волн приводит к уменьшению их амплитуд обратно пропорционально квадрату пройденного расстояния, т. е. в большей степени, чем отраженных волн. Все явления вместе и определяют характер затухания амплитуд регистрируемых волн и динамический диапазон сейсмических волн.

Техника регистрации должна быть рассчитана на максимальный динамический диапазон. Практически в МПВ, как и в МОВ, необходимо ориентироваться на динамический диапазон записей 140-160 дБ.

Полоса регистрируемых частот определяет разрешенность сейсморазведки — детальность изучения акустического разреза по глубине и площади работ. Для разрешенности по вертикали отмечается обратная связь между мощностью выделяемого пласта и преобладающей частотой регистрации:  $\Delta h \geq V / (4f_n)$ , где  $V$  — пластовая

скорость. Размеры изучаемых горизонтальных неоднородностей сопоставимы с диаметром первой зоны Френеля  $D_F \approx \sqrt{h\lambda}$ .

Частотный состав колебаний определяется в первую очередь типом источника, его положением в разрезе (условиями возбуждения) и свойствами глубинного геологического разреза. Спектр сейсмических колебаний понижается с увеличением заряда (при прочих равных условиях), регулируется при использовании вибратора, хотя и ограничен свойствами пород вблизи плиты вибратора. Со временем регистрации преобладающие частоты понижаются за счет относительно большого поглощения высоких частот. Преобладающие частоты преломленных волн обычно ниже, чем у отраженных. Поперечные волны имеют более низкочастотный спектр по сравнению с продольными волнами (примерно по соотношению скоростей распространения волн), поверхностные волны также относительно более низкочастотные.

Неискаженная регистрация частотного состава сейсмических колебаний является одним из основных требований к сейсмической технике.

Кажущиеся скорости преломленных волн примерно соответствуют пластовым скоростям изучаемого разреза и несколько изменяются за счет углов наклона преломляющих границ. Кажущиеся скорости основных волн-помех, мешающих прослеживанию преломленных волн, имеют примерно такой же диапазон.

Диапазон кажущихся скоростей полезных волн (и регулярных волн-помех) и соответственно выбор шага записей в сейсмограммах ОГП (ОТВ) определяют необходимое количество регистрирующих каналов используемых станций.

В целом к сейсмическим источникам и регистрирующей аппаратуре предъявляются требования по сохранению физических особенностей сейсмических записей в трех диапазонах: динамическом, частотном и кажущихся скоростей.

Технические средства работ МПВ формально сходны с таковыми в МОВ, но отличаются по своим параметрам из-за больших удалений источник-приемник, необходимых в МПВ, соответственно из-за использования более мощных источников и более низкочастотного состава преломленных волн. В частности, сейсмоприемники должны иметь более низкую собственную частоту, а в усилителях используются более низкочастотные фильтрации по сравнению с МОВ, хотя регистрирующая аппаратура МОВ может применяться и в МПВ.

## 5.2. ИСТОЧНИКИ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ МПВ

Из-за больших удалений источник-приемник при регистрации преломленных волн и большего их затухания для МПВ необходимы источники большей интенсивности по сравнению с МОВ. При работах на суше обычно в качестве источников используются взрывы больших зарядов в мелких водоемах и болотах, не запрещенных для взрывов по экологическим причинам, а также группы мелких скважин для рассредоточения большого заряда с целью увеличения сейсмического эффекта и уменьшения энергии, расходуемой на разрушение пород.

Несмотря на многообразие конструкций невзрывных источников для морских сейсмических работ наибольшее применение получили пневматические излучатели. Сейсморазведочные работы МПВ на акватории морей и океанов проводятся в настоящее время исключительно с пневматическими источниками большой мощности — групповыми и одиночными [3]. У пневматических источников пульсирующая полость образуется в результате выхлопа в воду сжатого воздуха под давлением от 2 до 34 МПа. Они возбуждают в воде сложный акустический сигнал, состоящий из нескольких импульсов избыточного давления и разрежения (рис. 5.1).

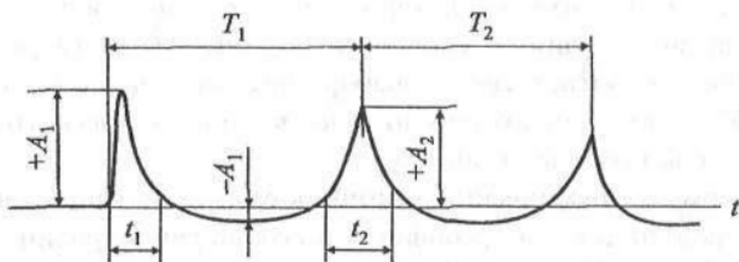


Рис. 5.1. Акустический сигнал в ближней зоне от пневматического источника.

$T_1, T_2$  — периоды пульсации;  $+A_1, +A_2 - A_1$  — амплитуды импульсов сжатия и разрежения;  $t_1$  и  $t_2$  — длительность импульсов сжатия.

Газовая полость в зависимости от режима истечения сжатого воздуха, глубины погружения источника и конструкции пневматического излучателя (соотношения объема к площади выхлопного отверстия, скорости открытия выхлопного отверстия и времени, в течение которого оно остается открытым) совершает 5–8 достаточ-

но интенсивных колебаний, а акустический сигнал состоит из соответствующего числа импульсов избыточного давления  $+A_1$ ,  $+A_2$ , ... и разрежения  $-A_1$ ,  $-A_2$ . Период первой пульсации зависит от энергии выхлопа и глубины погружения источника. Энергия, затраченная на выхлоп, определяется объемом пневмокамеры, начальным и конечным давлением сжатого воздуха при выхлопе.

За рубежом широко применяют пневматические источники фирмы «Volt», США [37]. Эта фирма разработала и выпустила широкий набор источников марки PAR объемом от  $8 \cdot 10^{-3}$  до  $164 \text{ дм}^3$  и рабочим давлением от 1,46 до 34,1 МПа. Фирма выпускает девять моделей морских источников PAR, отличающихся друг от друга габаритами и площадью выхлопных отверстий, причем в каждой модели предусмотрена возможность изменения рабочего объема. Так, например, модель 600В имеет шесть сменных емкостей рабочим объемом от 19 до 660 (19, 90, 160, 330, 480, 660)  $\text{см}^3$ . Для МПВ интерес представляют источники большого объема. Источник состоит из корпуса 1, сменной емкости 2, поршня челночного типа 3, запускающего электропневмоклапана 4 (рис. 5.2).

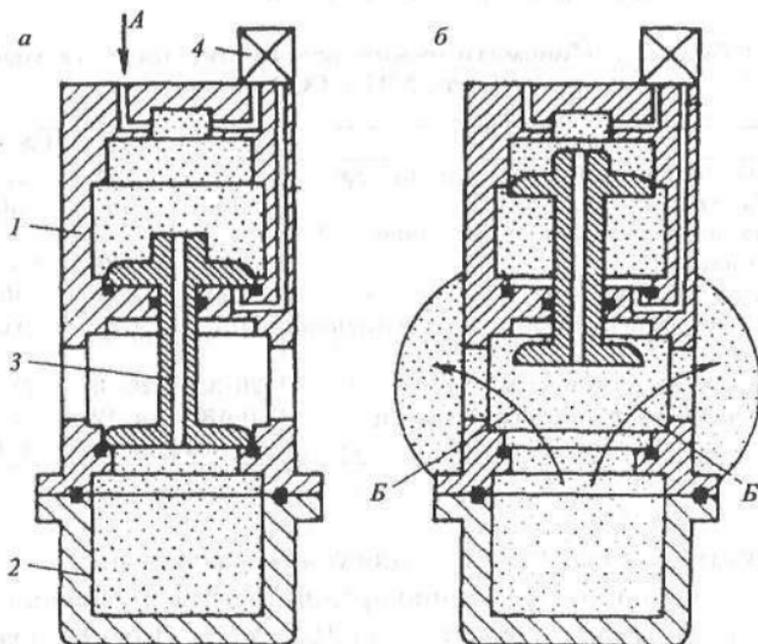


Рис. 5.2. Схема пневматического источника марки PAR при заполнении его сжатым воздухом (а) по направлению, указанному стрелкой А, и в момент выхлопа воздуха по направлению, указанному стрелкой Б (б).

В низкочастотном сейсмическом диапазоне от 10 до 20 Гц также используется группирование источников для подавления пульсации, однако применяются и одиночные источники без подавления пульсации. Форма импульса обеспечивается соответствующим выбором параметров источника и глубины его погружения, но энергия в основном сосредоточена в достаточно узком диапазоне частот.

В нашей стране в качестве одиночных источников при работах ГСЗ-МПВ на море применяются источники ПИ-5 и СИИ-6.

Пневматический источник ПИ-5 характеризуется рабочим объемом пневмокамеры 30 дм<sup>3</sup> и диаметром выхлопного отверстия 197 мм. Максимальное значение спектральной плотности достигается на частоте 12 Гц, а в диапазоне частот 7–15 Гц сосредоточено более 80% энергии акустического сигнала.

Пневматический источник СИИ-6 состоит из одной пневмокамеры объемом от 75 до 120 дм<sup>3</sup> и имеет диаметр выхлопного отверстия 320 мм. Конструкция пневмокамеры и принцип действия аналогичен пневмокамере PAR (см. рис. 5.2).

Основные технические характеристики низкочастотных пневматических источников сведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1. Пневматические источники, применяемые при работах МПВ-ГСЗ на море

Характеристика	ПИ-5	СИИ-6	PAR800
Объем одной пневмокамеры, дм <sup>3</sup>	30	120	32,8
Рабочее давление, МПа	15	15	13,7
Расход сжатого воздуха на одиночный выхлоп, дм <sup>3</sup>	25	100	—
Масса пневмокамеры, кг	230	800	407
Амплитуда первого импульса давления, МПа	0,7	1,25	0,69
Глубина погружения, м	20-35	20-45	60-70
Диапазон частотного спектра, Гц	0-18	4-12	3-8
Погрешность синхронизации, с	±0,002	±0,003	±0,001

Пневматические источники для сейсморазведочных работ МПВ и необходимая арматура обычно предназначены для использования сжатого воздуха под давлением до 15,0 МПа. Потребность в сжатом воздухе определяется методикой работ (интервал повторения воздействий, глубина погружения камер и др.) и общим объемом рабочих камер группового источника. Поэтому при работе с пневматическими источниками эффективность их применения во мно-

гом определяется производительностью воздушных компрессоров, установленных на судне. Именно этот фактор определяет производительность и качество сейсморазведочных работ.

Для эффективного использования пневматических источников при работах МПВ необходимо размещение на сейсморазведочных судах компрессорных установок суммарной производительностью от 24 до 100 дм<sup>3</sup>/мин и более.

Осуществление выбранной системы наблюдений на море, т.е. реализация выбранного шага между возбуждениями, зависит от скорости судна для транспортировки косы, обеспечения пушек и возможного наложения кадров записи.

### 5.3. ПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА

При морских сейсмических работах МПВ-ГСЗ используются в основном буйковые устройства (плавающие, подвешенные в толще воды) и автономные донные регистраторы. Буйковые регистраторы применяют в качестве датчиков гидрофоны, а современные донные регистраторы имеют обычно трехкомпонентные приемники смещения и гидрофон, запись осуществляется в цифровом виде.

При работах МОВ ОГТ с длинными плавающими (буксируемыми) косами также попутно регистрируются преломленные волны. В меньшей степени используются донные косы. Для проведения сейсмических работ МПВ и МОВ в транзитной зоне используется специальная аппаратура: различные приемные устройства буйковые, донные и наземные.

Основным элементом регистрирующей аппаратуры является сейсмический канал, в него входят: сейсмоприемник и преобразователь аналог-код (ПАК), регистратор, кроме того, перед преобразователем используются аналоговые фильтры и усилители.

На практике используется два типа сейсмоприемников — электродинамические (геофоны) на суше (или на дне моря) и пьезоэлектрические (гидрофоны) на море, в первом случае регистрируется скорость смещения дневной поверхности, а во втором — изменение давления в воде.

При работах МПВ-ГСЗ на море технически и технологически эффективнее использовать в одной точке (на дне) трехкомпонентный (плюс гидрофон) неподвижный регистратор и буксируемый источник, т.е. относительно малое число регистраторов и малый шаг между источниками с получением сейсмограмм ОТП.



## Глава 6

# ТЕХНОЛОГИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ РАБОТ МПВ

Методика работ выбирается в зависимости от поставленных задач в конкретных сейсмогеологических условиях изучаемых территорий, а ее практическое осуществление зависит от поверхностных условий местности, где проводятся работы, технической оснащенности партии и выливается в реальную технологию работ.

Технология работ должна обеспечить параметры выбранной методики работ: вид съемки и систему наблюдений, условия возбуждения и регистрации сейсмических волн на конкретной площади.

Площадные многократные системы наблюдений МПВ предполагают разбиение изучаемой площади на бины с получением в каждом бине сейсмограмм ОТВ или ОТП с необходимым количеством записей (кратностью наблюдений).

Формально осуществление площадных многократных систем наблюдений в МПВ аналогично МОВ. Отличие технологии проведения работ МПВ от МОВ заключается в следующем. Результативные разрезы МПВ получаются при суммировании записей по точкам приема или источникам с учетом сейсмического сноса, а не по общим средним точкам, как в МОВ. Соответственно и разбиение изучаемой площади на бины определяется шагом между точками приема или возбуждения, а кратность наблюдений равна количеству записей в сейсмограммах ОТП или ОТВ. Если существует возможность суммирования разрезов по точкам входа волны в преломляющий пласт и выхода из него (одинаковый шаг между источниками и приемниками), то общая кратность суммирования, соответственно, удваивается. При выборе технологии работ также необходимо учитывать реальные области прослеживания всех изу-

часмых преломленных волн, для этого перед началом работ необходимо изучать волновую картину на специальных зондированиях.

Отличительными особенностями работ МПВ являются необходимость получения в общем случае встречных систем наблюдений для определения граничных скоростей и использование больших удалений источник-приемник по сравнению с МОВ.

Наиболее общая технология проведения сейсморазведочных работ МПВ используется при площадной (3D) съемке с получением в каждом бине площадных сейсмограмм ОТВ или ОТП, аналогично площадным работам МОВ, она технологически и наиболее сложная для выполнения. Упрощение идет как по виду съемки — от площадной к профильной, так и по системе наблюдений — от площадной многократной к однократной (одна запись в бине).

Реальное осуществление выбранной системы наблюдений зависит прежде всего от условий местности при проведении работ (суша, море), характера источника и приемного устройства, последнее может быть одно- и многоканальным, неподвижным, пассивным (дрейфующим) или активным (буксируемым) [15, 16, 36].

Использование сейсмических установок из одного источника и многоканальной регистрации, или наоборот, одного регистратора и многих источников, зависит от стоимости применения источников и приемников в данных условиях. Например, на суше при работах МПВ чаще всего дешевле использовать одиночные источники и многоканальную регистрацию, а на море, при работах ГСЗ, — одноканальное (донное или поплавокное) приемное устройство и буксируемый источник.

## 6.1. НАЗЕМНЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ РАБОТЫ МПВ

На суше, как правило, дешевле использовать большое количество регистрирующих каналов и меньше источников, так как источники обходятся значительно дороже и больше влияют на экологию.

В самом общем виде, при трехмерном рельефе преломляющих границ, наблюдения в МПВ должны быть площадными (3D) с получением площадной сейсмограммы ОТП или ОТВ для каждого бина (см. рис. 4.1). Для осуществления таких систем необходимо использовать установки типа «широкий» профиль (рис. 6.1, а), «крест» или другие, обеспечивающие встречную систему наблюдений, вы-

бранный размер бина и площадные сейсмограммы в нем с оптимальными параметрами: размером базы и шагом между записями. За один проход обрабатывается полоса, а для обработки всей площади необходимо каждый раз смещаться по площади. Регулярные установки обеспечивают обработку шаблона с постоянной кратностью вдоль направления перемещения, а степень ее перекрытия при смещении в поперечном направлении определяет кратность в этом направлении. В случае применения установки с одинаковым количеством линий возбуждения и приема можно суммировать динамические разрезы МПВ по точкам входа в преломляющий пласт и выхода из него, если шаг между источниками и приемниками будет одинаков, или по большему из расстояний между источниками и приемниками.

На суше регулярные площадные системы наблюдений МПВ осуществлять трудно, поэтому чаще применяют произвольных систем с расположением источников и приемников по условиям местности (см. рис. 4.11).

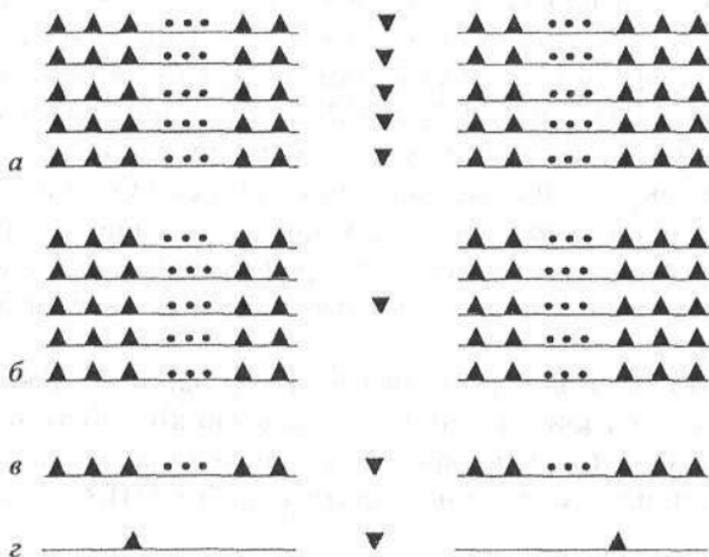


Рис. 6.1. Технология проведения площадной съемки на суше с получением площадных и профильных сейсмограмм ОТП и ОТВ.

*а* — установка для площадной съемки с получением площадных сейсмограмм в бине; *б* — то же с получением линейных сейсмограмм; *в* — установка для профильной съемки с получением продольных сейсмограмм; *г* — то же с получением записей  $L = \text{const}$ .

Отличительная особенность сейсмических работ МПВ на суше — относительно проще выполнять встречные системы наблюдений, чем при морских работах.

Несколько проще обрабатывается площадная съемка с получением линейных (продольных или поперечных) сейсмограмм ОТП (или ОТВ) в каждом бине (рис. 6.1, б). Для этого может использоваться установка типа «широкий» профиль с необходимой кратностью в продольном направлении и величиной смещения в поперечном направлении, обеспечивающем только однократное наблюдение. В варианте, когда используется несколько приемных линий и одна линия источников (см. рис. 6.1, б), резульативные разрезы получаются по точкам выхода волны из преломляющего горизонта (по ОТП), так как в поперечном направлении (по ОТВ) размер бина будет в пять раз больше, поэтому их объединение не имеет смысла.

Площадную съемку можно осуществить и линейной установкой: один источник и многоканальная регистрация, которая обычно используется при профильных работах, но с малым шагом между профилями по площади (по оси  $y$ ) для получения необходимого размера бина. В этом случае получается площадное расположение точек (бинов), а в каждой точке получается только продольная сейсмограмма ОТП или ОТВ (рис. 6.1, в). Конечно, при этом увеличиваются затраты на обработку площади. При использовании линейной установки для площадной съемки разрезы ОТП и ОТВ можно объединять при одинаковом шаге между источниками и приемниками. С увеличением шага между профилями (когда  $dy \gg dx$ ) осуществляются обычные профильные работы по системе замкнутых контуров.

Следует заметить, что многократные системы наблюдений в МПВ использовались очень редко (обычно кратность наблюдений мала и изменяется по профилю) и только в профильной съемке, о проведении площадных многократных работ МПВ на суше автору не известно.

Совсем крайний случай площадных и профильных работ — однократные наблюдения — получаются с упрощением системы наблюдений и в продольном направлении вплоть до установки  $L = \text{const}$  (рис. 6.1, г). Подобные системы наблюдений применялись во время первых работ МПВ для поиска соляных куполов.

С использованием многоканальных регистраторов работы МПВ-ГСЗ на суше проводятся вдоль опорных профилей с редкой

сетью источников для обеспечения встречной одно- двухкратной системы наблюдений основных преломленных волн. С такой технологией отработаны относительно большие объемы, в результате обработки представляются обычно скоростные разрезы (результаты томографической обработки) или кинематические разрезы преломляющих границ, хотя иногда можно получить и динамические разрезы преломляющих границ (без применения интерференционных систем для разделения волн и ослабления помех на основе многократных наблюдений).

Часто работы МПВ-ГСЗ на суше проводятся с одноканальными регистраторами (одно- или трехкомпонентными) и редкой сетью источников, в таком случае не обеспечивается фазовая корреляция волновой картины, и возможности обработки резко ограничиваются, в частности, нельзя выполнять построение динамических разрезов преломленных волн. С одноканальными регистраторами выполняется и площадная съемка в технологии МПВ-ГСЗ по очень редкой сети наблюдений [26].

## 6.2. СЕЙСМИЧЕСКИЕ РАБОТЫ МПВ НА АКВАТОРИЯХ

При проведении сейсмических работ на море существует ряд специфических особенностей: наличие в верхней части разреза толщи воды, определяющей условия возбуждения, распространения и приема упругих колебаний, использование судов в качестве основного вида производственного транспорта и высокую производительность выполнения работ, использование спутниковой геодезической привязки. Сейсмические работы на море проводятся в основном в процессе движения источников и/или приемников, что определяет специфику работ. Обычно используются специальные сейсмические суда, оборудованные источниками, приемными устройствами и системами сбора и регистрации сейсмической и другой геофизической информации.

В целом условия проведения сейсмических работ на море более благоприятные, чем на суше. Однородность водной толщи и соответственно стабильные условия возбуждения и приема формируют регулярную и устойчивую картину полезных волн и помех. Наиболее характерным осложнением волновой картины при мор-

ских работах является реверберация сейсмических волн (особенно в случае «звонкого» дна).

Работы МПВ на море могут выполняться в двух разных вариантах: аналогично МОВ с судами, оборудованными буксируемыми сейсмическими косами и источниками, или с неподвижными регистраторами (донными или фиксированными в водном слое) и подвижным источником. В первом варианте для МПВ основная проблема — длина сейсмических кос и вынос ближнего прибора, а также необходимость дополнительного прохода для получения встречных наблюдений. То и другое пока технически ограничено (рассчитано только на МОВ), в результате ограничена и глубина изучения геологического разреза МПВ. Самые длинные косы, используемые в настоящее время при морских работах МОВ, не обеспечивают необходимой глубины изучения разреза методом преломленных волн. Во втором варианте основная проблема связана с большими расстояниями между отдельными регистраторами, что приводит к увеличению шага между записями в сейсмограммах ОТП и, соответственно, к неоптимальной интерференционной системе для разделения волн и построения динамических разрезов. Оба варианта технически не обеспечивают применение оптимальной методики МПВ при работах на море. Поэтому в настоящее время для получения динамических разрезов преломленных волн можно использовать сейсмические записи МОВ, полученные с длинными косами, но относительно малой глубиной изучения преломляющих границ, или с неподвижными регистраторами и очень малой кратностью наблюдений, например, полученные при глубинных сейсмических исследованиях — ГСИ (ГСЗ).

При работах ГСЗ на море с донными или буйковыми регистраторами обычно используется обращенная система годографов с одним перемещающимся судном источником и неподвижными регистраторами.

На акваториях технологически проще проводить площадные сейсмические работы (3D), особенно в варианте с длинными косами. На море возможно осуществление регулярных систем наблюдений: линейное положение источников и приемников, а бин соответствует точке (см. рис. 4.12); произвольные, крестовые и наклонные системы наблюдений технологически осуществлять сложнее.

При морских работах МПВ интервал времени между отдельными возбуждениями увеличивается по сравнению с МОВ из-за большей мощности источников и, соответственно наложения кад-

ров, как при использовании буксируемой сейсмической косы, так и неподвижных регистраторов.

При транспортировке нескольких источников они срабатывают последовательно. Интервал времени между возбуждениями (время заполнения пушек) зависит от скорости движения судна (шаг между источниками) и должен обеспечиваться мощностью компрессоров.

### 6.2.1. Использование многоканальных буксируемых приемных устройств

Для технического обеспечения морских сейсмических работ МПВ в технологии, аналогичной МОВ, необходимо иметь длинные косы. Кроме того, при работах с одним судном за один проход получается только фланговая система наблюдений, для получения встречной системы необходимо использовать два судна или отрабатывать профиль дважды при движении в различных направлениях.

Так как длина буксируемых кос всегда ограничена, в МПВ их можно использовать для изучения относительно малых глубин. Чаще всего при работах МОВ с длинными косами преломленные волны регистрируются только от неглубоких границ. Для выполнения специальных работ требуется более сложная технология, чем в МОВ. При использовании одного судна с длинной косой и источником требуется выполнить на профиле два встречных прохода. Возможна технология работ двумя сейсмическими суднами в варианте широкоугольного глубинного сейсмического профилирования (ШГСП), причем оба судна должны иметь источник и длинную косу. При равенстве скоростей движения судов получается встречная система профилирования с многократными перекрытиями на фиксированном диапазоне удалений  $L_1 - L_2$  в интервале прослеживания целевых волн. Недостатком такой технологии является регистрация в ограниченном диапазоне удалений источник-приемник.

При морских работах для обеспечения площадной (3D) съемки с получением площадной сейсмограммы в бине необходимо буксировать несколько кос и несколько источников одновременно (рис. 6.2, а). В таком случае технология проведения работ полностью аналогична работам на суше (см. рис. 6.1, а), но только для фланговой системы наблюдений.

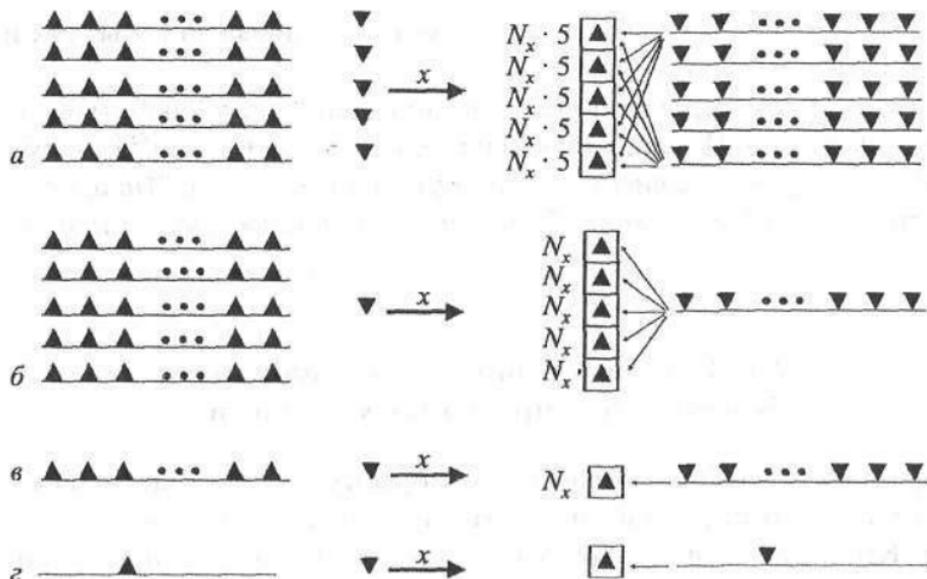


Рис. 6.2. Технология проведения площадной съемки на море с получением площадных и профильных сейсмограмм ОТП и ОТВ (стрелкой показано направление движения судна,  $N_x$  — кратность наблюдений вдоль оси  $X$ ).

а — установка для площадной съемки с получением площадных сейсмограмм в бине; б — то же с получением линейных сейсмограмм; в — установка для профильной съемки с получением продольных сейсмограмм; г — то же с получением записей  $L = \text{const}$ .

(Справа для каждой установки показано формирование записей в бинах.)

Если буксировать несколько кос и один источник или несколько источников и одну косу, то обеспечивается проведение площадной съемки с получением линейных сейсмограмм ОТП или ОТВ (рис. 6.2, б). В этом случае получается площадное (регулярное) расположение точек (бинов) изучения геологической среды, но в каждой точке образуются только линейные сейсмограммы ОТВ или ОТП (продольные или поперечные).

Следующими по упрощению идут площадные работы с буксировкой одной косы и одного источника, т. е. обычные профильные работы, но с малым шагом между профилями по площади размера бина (рис. 6.2, в).

Крайний случай площадных работ 3D на море получается, если буксировать установку с постоянным удалением источник — приемником ( $L = \text{const}$ ), при этом в каждом бине регистрируется одна запись с  $L = \text{const}$  (рис. 6.2, г).

В настоящее время идет совершенствование техники морских сейсмических работ: увеличивается длина буксируемых сейсмических кос до 12–16 км и одновременно возможна буксировка 12–16 кос, так что общая площадь, покрываемая одной сейсмической установкой, составляет 8–10 км<sup>2</sup>. Иногда для буксировки большого числа кос используется судно-ассистент. Размеры бина постепенно уменьшаются и достигают квадрата со сторонами 6,25 м.

### 6.2.2. Системы наблюдений при использовании одноканальных приемных устройств.

Одноканальные приемные устройства чаще всего используются при работах МПВ–ГСЗ на море, где необходимы большие удаления источник–приемник. Наблюдения МПВ–ГСЗ выполняются обычно по обращенной системе с неподвижными регистраторами (донными или поплачковыми) и перемещающимся по профилю источником возбуждения (с получением сейсмограмм ОТП). Эта технология аналогична работам МОВ, но с учетом интервала прослеживания преломленных волн и получением сейсмограмм ОТП (а не ОТВ, как обычно в МОВ).

В качестве неподвижного приемного устройства могут использоваться автономные донные сейсмические станции (АДСС) с трехкомпонентной регистрацией и гидрофоном, или поплачковые регистраторы — только гидрофон на некоторой глубине от поверхности; в настоящее время наиболее широко применяются АДСС.

Работы с АДСС проводятся в варианте продольного профилирования (2D). При такой технологии работ построение динамических разрезов выполняется по точкам возбуждения (сейсмограммам ОТВ), так как шаг между точками регистрации очень велик для построения разрезов. Интервал между источниками определяет шаг между трассами результирующего разреза и должен обеспечить непрерывную корреляцию преломляющих границ. Расстояние между станциями (пунктами приема) определяет количество записей в сейсмограммах ОТВ (с учетом областей прослеживания волн), от которых зависят возможности разделения волн и ослабления помех в точках возбуждения. Обычно количество записей в сейсмограмме ОТВ очень мало и расстояние между записями слишком велико (5–20 км).

Максимальное расстояние источник–приемник должно обеспечить необходимую глубину изучения разреза. Величина этого пара-

метра определяется задачами исследований и конкретными сейсмогеологическими условиями. Так, для изучения глубинного строения в пределах земной коры и верхней мантии максимальное расстояние источник-приемник обычно составляет в оксале до 100 км, на шельфе — до 200 км.

В реальных условиях интервалы прослеживания разных волн колеблются в широких пределах и полные системы наблюдений для всех волн трудоемки и пока практически не выполнимы. Поэтому параметры системы наблюдений выбирают, как правило, исходя из условия непрерывного прослеживания только целевых волн.

Непрерывное построение преломляющей границы обеспечивается отработкой прямых и встречных систем многократных наблюдений. В общем случае, как и в МОВ, необходимо обеспечить многократное прослеживание преломленных волн для последующего их разделения и ослабления помех и построения динамических разрезов.

Технология выполнения работ МПВ-ГСЗ на море состоит в установке донных сейсмических регистраторов и прохождении судна по профилю с возбуждением уругих колебаний пневматическим источником.

### 6.3. КОМБИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ МОВ И МПВ

Комбинированные системы наблюдений МОВ и МПВ предполагают отработку большого набора удалений, начиная от источника (см. рис. 4.2), чтобы обеспечить регистрацию отраженных и преломленных волн. Как уже отмечалось, ввиду различия в образовании и распространении преломленных и отраженных волн их совместная регистрация часто не оптимальна. В частности, для МОВ и МПВ требуются разные условия возбуждения и регистрации.

Для работ МПВ необходимо использовать мощные источники, обеспечивающие прослеживание преломленных волн от границ заданной глубины. При этом не обязательно применение группирования источников и приемников для ослабления низкоскоростных волн-помех, так как они не мешают прослеживанию полезных волн.

В МОВ требуются меньшие заряды и обязательное ослабление поверхностных волн группированием источников или погружением заряда на оптимальную глубину, при регистрации также осуществ-

ляется группирование приемников для ослабления низкоскоростных помех. Кроме того, отраженные волны имеют более широкую и высокочастотную полосу по сравнению с МПВ и поэтому необходимо использовать меньший шаг дискретизации записей.

По всем перечисленным причинам одновременная обработка профиля с регистрацией отраженных и преломленных волн не проводится, работы выполняются раздельно.

Конечно, в МОВ с применением многоканальной регистрации на больших удалениях источник-приемник (на суше и на море) на записях регистрируются и преломленные волны, но методика работ рассчитана на отраженные волны и не оптимальна для МПВ: она не обеспечивает требуемой глубины изучения.

## Глава 7

### ОБРАБОТКА СЕЙСМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В результате проведения полевых работ независимо от применяемого метода и методики получают набор сейсмических записей  $A_i(M_i, N_i, t)$  — амплитуды волн, зарегистрированных при положениях источников  $M_i(X, Y, Z)$  и приемников  $N_i(X, Y, Z)$  во внутренних точках среды, или вблизи дневной поверхности (на море или на суше) с координатами источников и приемников соответственно  $M_i(X, Y)$  и  $N_i(X, Y)$ . Минимальной единицей измерения данных, поступающих в обработку, является одна сейсмическая запись, зарегистрированная при некотором положении источника и приемника. Эта запись содержит полезные волны, обусловленные некоторым объемом геологической среды, а также различные сейсмические помехи, образующиеся вследствие физических процессов при распространении упругих волн в реальных акустических средах. К ним добавляются помехи, связанные с технологией и техникой работ, и случайные колебания.

Таким образом, сейсмические записи являются результатом наложения регулярных волн (полезных и помех), различной амплитуды и формы, и случайных колебаний:

$$A(M, N, t) = S(M, N, t) + P(M, N, t) + n(t),$$

где  $S(M, N, t)$  — полезные волны, например, в МПВ продольные (или поперечные, обменные) преломленные и преломленно-дифрагированные волны, обусловленные изменением упругих свойств в геологической среде и формой импульса преломленной проходящей волны;  $P(M, N, t)$  — регулярные сейсмические волны-помехи

(в МПВ — закритические отраженные, кратные преломленно-отраженные и пр.) и  $n(t)$  — случайные сейсмические колебания. При этом предполагается, что помехи аддитивны — они просто добавляются к записи, т. е. действует принцип суперпозиции волн. Почти никогда не бывает, чтобы регистрировались только полезные волны, очень редко в этой сумме преобладают полезные волны, и наоборот, зачастую на записях видны только помехи.

Обработка — второй этап в проведении сейсмических работ, по ее результатам выполняется геологическая интерпретация. В качестве исходных данных используются результаты полевых сейсмических работ — сейсмические записи, зарегистрированные на площади исследований по некоторой системе наблюдений. В результате обработки по кинематическим и динамическим свойствам полезных волн получают распределение скоростей распространения упругих волн и акустической жесткости изучаемой геологической среды [31]. Обработка — процесс последовательного преобразования исходных сейсмических записей в акустический разрез (акустическое изображение, акустическую «фотографию».) изучаемой геологической среды.

Обработка основана на физических особенностях распространения упругих волн в среде, она решает обратную задачу сейсморазведки — определяет изменение упругих свойств в изучаемой геологической среде по сейсмическим записям, полученным в результате возбуждения и регистрации упругих волн на ее поверхности или в скважине. В то время как прямая задача заключается в расчете волновой картины по известному распределению упругих свойств в среде и заданному положению источников и приемников.

При выборе методики проведения полевых работ задача состояла в регистрации сейсмических записей с оптимальными параметрами: шагом квантования по расстоянию и времени, набору записей в каждом бине. Оптимальная обработка должна реализовать те возможности, которые заложены при полевых наблюдениях: выделить полезные волны и определить по ним упругие свойства изучаемой геологической среды. Возможности обработки и сейсморазведки в целом по изучению акустических свойств геологической среды закладываются в процессе полевых работ, а реализуются при обработке полученных материалов. В обработке нельзя получить больше информации, чем зарегистрировано при проведении полевых работ, но можно извлечь не всю информацию, содержащуюся в исходных материалах.

В сейсмических записях содержится большое количество информации: об изменении акустических свойств в изучаемой среде, о параметрах и положении источника колебаний, особенностях строения, параметрах ВЧР и др. Эта информация заключена в различных волнах: полезных и помехах. Из всей этой информации в процессе обработки необходимо извлечь сведения об акустических свойствах глубинной среды, которые содержатся во временах прихода и амплитудах полезных волн, т. е. выделить только ту часть, которая представляет геологический интерес. Иногда зарегистрированная доля информации об акустических свойствах глубинной среды, связанная с полезными волнами, очень мала по сравнению с информацией о верхней части разреза, параметрах и положении источника колебаний.

В обработку могут поступать материалы, полученные различной методикой работ: площадные или профильные, многократные и однократные наблюдения, в зависимости от этого меняются возможности обработки и получаемые результаты.

## 7.1. ОБЩАЯ СХЕМА ОБРАБОТКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Обработка преломленных волн осуществляется в соответствии с общей схемой обработки сейсмических материалов (рис. 7.1), но имеет свою специфику из-за физических особенностей образования и распространения преломленных волн.

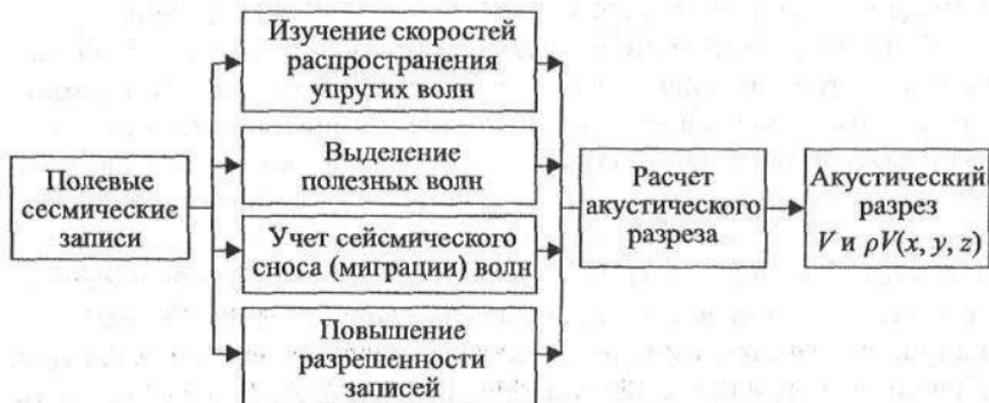


Рис. 7.1. Общая схема обработки сейсмических материалов МПВ.

В общем случае в процессе обработки необходимо выполнить пять операций, каждая из которых решает свою задачу (хотя некоторые операции могут объединяться в одну процедуру, или для выполнения одной операции может использоваться несколько процедур), а в целом они составляют обработку сейсмических материалов. В обработке преломленных волн выполняются те же операции, что и в МОВ, и в той же последовательности: определение скоростей распространения упругих волн в изучаемой среде, построение преломляющих границ (учет сейсмического сноса преломленных волн), разделение волн, повышение разрешенности сейсмических записей и расчет акустического разреза. Это полная схема обработки сейсмических материалов МПВ. Любая выполняемая обработка сейсмических материалов с использованием кинематических и динамических свойств волн — с получением акустического разреза, или кинематическая — с построением преломляющих границ, входит в рамки этой общей схемы как частный случай. Различие заключается только в полноте использования исходных материалов и соответственно детальности получаемого акустического разреза, (в частности, скоростного разреза).

К обработке относятся только те преобразования записей, которые изменяют амплитуды или времена прихода сейсмических волн. Такие процедуры, как демультимплексация, сортировка записей и подобные им, не являются обработкой, хотя и необходимы — они осуществляют перевод данных в формат обрабатывающих систем или упрощают технологию обработки. Рассмотрим вначале кратко назначение отдельных операций обработки, а затем особенности их выполнения и последовательность или граф обработки.

1. Одной из основных операций обработки является изучение скоростей распространения упругих волн в глубинном геологическом разрезе и ВЧР. Для оптимального выделения полезных волн и учета сейсмического сноса необходимо знать кинематические свойства (форму годографов) полезных волн и помех или скорости их распространения в глубинной среде и верхней части разреза. Так как в ВЧР скорости распространения волн аномально низкие, они значительно влияют на кинематику глубинных волн, и это влияние учитывается особо с помощью статических поправок. Скоростной разрез используется не только для оптимального выполнения последующих процедур обработки, но представляет и самостоятельный интерес, так как он является первым толстослоистым приближением к изучаемым упругим свойствам геологической среды.

2. Для определения истинного положения преломляющих границ и объектов дифракции необходимо в процессе обработки учесть сейсмический снос преломленных и преломленно-дифрагированных волн, т. е. поместить полезные волны на те участки геологической среды, где они образовались. В МПВ сейсмический снос необходимо учитывать всегда при любых системах наблюдений даже в случае горизонтальных преломляющих границ. В МОВ сейсмический снос также необходимо всегда учитывать, но при малых углах наклона границ (если  $\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi$ ) операция учета сейсмического сноса очень простая — запись отраженных волн помещается на среднем пикете между источником и приемником (в ОСТ). Операция учета сейсмического сноса называется в сейсморазведке — миграцией.

3. В процессе обработки из всей зарегистрированной волновой картины необходимо выделить полезные волны без искажения их свойств или ослабить все сейсмические помехи до такого уровня, чтобы они не искажали геологическую интерпретацию получаемых результатов. Дальнейшая обработка нацелена уже только на полезные волны. Эту операцию можно не применять только в одном случае, когда совсем нет сейсмических помех, если такой случай возможен на практике. Из-за физических особенностей образования и распространения упругих волн вместе с преломленными волнами почти всегда регистрируются помехи, в частности закритические отражения, и происходит наложение — интерференция самих полезных волн, поэтому операция разделения волн всегда необходима при обработке материалов МПВ.

4. Результатом обработки должен быть детальный акустический разрез изучаемой геологической среды, однако при возбуждении, распространении упругих волн, а также выполнении операций по ослаблению помех происходит неизбежное снижение разрешающей способности сейсмических записей — понижение и сужение полосы частот. Поэтому крайне желательно, если это возможно, повысить разрешенность сейсмических записей и соответственно детальность получаемого разреза. Необходимость выполнения этой операции зависит от требований к детальности изучаемого геологического разреза.

5. Обычно последней операцией обработки является расчет акустических свойств (акустической жесткости) среды по амплитудам преломленных и дифрагированных в МПВ (или отраженных и дифрагированных волн в МОВ), т. е. вместе с результатами изучения

скоростей распространения волн (толстослоистым скоростным разрезом) получаем окончательный результат сейсмических работ — детальный акустический разрез изучаемой геологической среды.

Пять перечисленных операций составляют полную обработку сейсмических материалов, т. е. решают обратную задачу сейсморазведки, превращая исходные записи в акустический разрез изучаемой геологической среды. Обработка любых сейсмических материалов (МПВ и МОВ) выполняется в рамках этой схемы, но с учетом применяемой методики работ и имеющейся технологии обработки.

Операции обработки делятся на однократные, которые выполняются только один раз, и многократные, которые реализуются в процессе обработки несколько раз. К однократным относятся операции, которые выполняются по одним и тем же исходным материалам, хотя формально могут осуществляться несколько раз с разными параметрами. Например, учет сейсмического сноса (миграция записей) — типичная однократная процедура, но может выполняться несколько раз с разными скоростными законами. К однократным операциям относится также расчет акустического разреза. Многократные операции реализуются последовательно к преобразованиям в ходе обработки материалам. Типичной многократной процедурой является повышение разрешенности записей (деконволюция), она может выполняться многократно: вначале к исходным записям (в рамках так называемой корректирующей фильтрации), затем к динамическому разрезу МПВ после миграции. Многократной операцией часто является также выделение полезных волн при последовательном ослаблении различных волн-помех на сейсмических записях.

## 7.2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЗАПИСЕЙ В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ

Сейсмические записи обычно регистрируются в виде значений амплитуд в зависимости от времени для постоянных координат источника и приемника, т. е. в виде  $t$ -представлений сейсмических записей. Хотя их можно регистрировать (или пересортировать) в виде  $X$  (и/или  $Y$ )-представлений — зависимость амплитуды от координат для постоянного времени. Наборы записей для одной постоянной координаты при профильных работах являются двумерными зависимостями, например, зависят от удаления источник-приемник

и времени  $A(L, t)$ , а при работах  $3D$  — трехмерными, обычно двумерные наборы записей называют зависимостью  $A(X, t)$ . Все существующие системы обработки сейсмических материалов ориентированы на входной поток исходных записей в виде различных наборов  $t$ -представлений  $A(X, t)$ , чаще сейсмограмм ОТВ (или ОТП).

Большинство процедур обработки выполняется над наборами записей в обычной области, т. е. в системе координат  $X, t$ , но технологически иногда удобнее осуществлять некоторые операции и процедуры обработки в другой системе координат (в другой области) [4, 35, 39]. Например, фильтрацию удобнее рассматривать, а часто и выполнять, в частотной области: одномерную в области  $A(f)$  при  $X = \text{const}$ , а двумерную (по наборам записей) — в двумерной частотной области  $A(f, K)$ . В принципе все операции обработки можно выполнять в двумерной частотной области (ДЧО). Кроме фильтрации в ДЧО часто выполняют учет сейсмического сноса (миграцию), суммирование набора записей и прочие процедуры.

Различные преобразования сейсмических записей широко используются для выполнения отдельных операций обработки материалов всех методов, особенно МПВ и МОВ, как более удобная технология. Кроме  $f$ - $K$  применяется также  $\tau$ - $p$  (преобразование Радона) и  $f$ - $p$ -преобразование (рис. 7.2). При обработке материалов МПВ широко применяется  $\tau$ - $p$ -преобразование, так как годографы преломленных волн часто близки к прямолинейным и в  $\tau$ - $p$ -области зарегистрированная волновая картина изображается в более компактном виде [4, 7, 35].

Сами преобразования не являются обработкой, поэтому не может быть  $\tau$ - $p$ - или  $f$ - $K$ -обработки сейсмических материалов, возможно только использование  $\tau$ - $p$ - или  $f$ - $K$ -преобразования при выполнении отдельных операций обработки: выделении полезных волн или ослаблении помех, учете сейсмического сноса, определении скоростей как более удобной технологии для выполнения конкретного алгоритма.

При переводе сейсмических записей в другую систему координат информация, конечно, не увеличивается, в лучшем случае она не уменьшается (хотя практически при различных пересчетах может несколько уменьшиться за счет погрешностей вычислений). Наиболее широко распространено использование в процессе обработки сейсмических материалов  $f$ - $K$ -преобразований, так как при переходе в двумерную частотную область сохраняется размерность

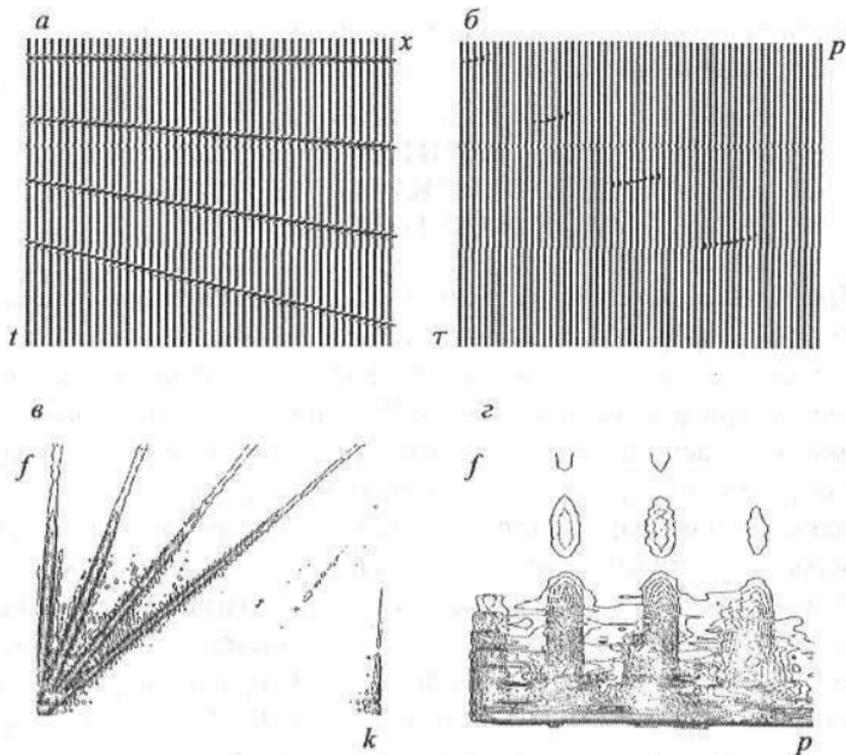


Рис. 7.2. Представления набора сейсмических записей в различных областях.

а — в обычной области  $X, t$ ; б — в  $\tau$ - $p$ -области; в — в  $f$ - $K$ -; г — в  $f$ - $p$ -области.

массива, а следовательно, и информационная равноценность временного и частотного представлений.

Двумерный частотный спектр волновой картины, зарегистрированной на некотором наборе сейсмических записей, является дискретным, и количество его значений удваивается по сравнению с исходным набором, однако для спектра вещественной функции отсчеты с положительными и отрицательными частотами взаимосвязаны:  $A(-K) = A^*(K)$ , что подтверждает информационную равноценность временного и частотного представлений. Практически это выражается в совпадении прямого и обратного преобразования сейсмограммы с исходной записью в пределах погрешности расчетов. Кинематические и динамические свойства волн преобразуются в амплитудную и фазовую характеристики двумерного спектра. Преобразования из  $X, t$  в  $f$ - $p$  и  $\tau$ - $p$ -области не имеют информационной равноценности, поэтому при прямом и обратном преобразовании

сейсмограммы возникают ее динамические искажения. Переход от  $f-p$  в  $\tau-p$  и обратно также информационно равноценный.

### 7.3. ОПЕРАЦИИ ОБРАБОТКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЗАПИСЕЙ ПРЕЛОМЛЕННЫХ ВОЛН

При любой обработке сейсмических записей используются кинематические (времена прихода) и динамические (форма импульса) свойства волн, но схема (или степень) их использования может быть разной. Например, в так называемой кинематической обработке динамика волн используется только при их корреляции для определения кинематики, а дальнейшая обработка выполняется по полям времен или годографам волн. Поэтому важно использование кинематических и динамических свойств волн не в процессе обработки, а в представлении результатов. Под кинематической обработкой обычно понимают представление только кинематических результатов — положение преломляющих границ и значения граничных скоростей. Наиболее общая динамическая обработка предполагает получение акустического разреза изучаемой среды, который содержит всю зарегистрированную информацию (кинематическую и динамическую) о преломленных волнах, как частный случай результатом динамической обработки может быть формирование волнового изображения преломляющих границ.

В настоящее время в методе преломленных волн выполняется в основном кинематическая обработка материалов [1, 11, 25]. Однако в последние годы на основе миграции сейсмических записей МПВ стало возможным осуществлять полную и строгую обработку материалов с построением динамических разрезов, аналогичных МОВ, в которых представлены кинематические и динамические свойства волн [32].

Конечно, в обработке может быть использована только часть полученной информации, кроме того, в методе преломленных волн, как и в МОВ, можно выполнять не все операции обработки или выполнять их приближенными способами в зависимости от сложности геологического строения изучаемой площади.

В МОВ схема обработки зависит от сложности рельефа сейсмических границ и изменения скоростей с глубиной, в МПВ эта зависимость еще более жесткая. Например, в случае плоских преломляющих границ (и головных волн) обработка значительно упроща-

ется. Поэтому возможна наиболее общая схема обработки и некоторые ее частные способы.

Наиболее строгий и полный (с использованием кинематических и динамических свойств) способ построения динамических разрезов преломленных волн возможен только с помощью миграции исходных записей. На основе миграции записей преломленных волн выполняются все основные операции обработки: определение скоростей, учет сейсмического сноса и выделение полезных волн.

Распространение упругих волн происходит в соответствии с принципом Гюйгенса—Френеля и аналитически выражается волновыми уравнениями. Решение однородного волнового уравнения может быть выполнено разными способами. Аналитическое решение выражается в виде интеграла Кирхгофа, кроме того, широко используется приближенное решение волнового уравнения конечно-разностным методом. Решение может выполняться во временной, двумерной частотной или в  $\tau$ - $p$ -областях и др.

Для миграции сейсмических записей преломленных волн можно применять алгоритмы на основе аналитического решения однородного волнового уравнения в виде интеграла Кирхгофа, или использовать приближенное решение волнового уравнения конечно-разностным способом. Миграцию сейсмических записей МПВ технологически более удобно выполнять на основе интеграла Кирхгофа.

Построение динамических разрезов МПВ на основе интеграла Кирхгофа происходит по наблюдаемому волновому полю в соответствии со схемой распространения преломленных волн с учетом явления проницания (см. рис. 2.3). При этом преломляющая граница любой конфигурации рассматривается как набор точек дифракции, а преломленная волна, соответствующая этой границе, представляется в виде набора годографов преломленно-дифрагированных волн. Соответственно миграция осуществляется представлением преломляющих границ в виде точек дифракции, а преломленных волн в виде элементов преломленно-дифрагированных волн для границ любой формы с учетом проницания.

Годограф головной волны получается как частный случай преломления на плоской границе, когда проницание отсутствует и волна скользит вдоль границы, а дифрагированные волны автоматически используются в обработке, по ним строится волновое изображение объектов дифракции. Такой подход полностью аналогичен миграции исходных записей отраженных волн (см. рис. 2.4).

Для миграции преломленных волн можно использовать уравнения (2.9) или (2.10), при миграции по приближенной формуле (2.10) достаточно знать только граничные скорости в зависимости от вертикального времени или  $t_0$  преломленных волн. Погрешность в определении прочих параметров мало влияет на расчеты, особенно с увеличением удаления источник-приемник.

Рассматриваемый способ позволяет в рамках одной процедуры миграции построить динамический разрез по всем зарегистрированным преломленным волнам, т. е. по всей глубине изучаемого разреза, в масштабе двойного времени по вертикали до преломляющих границ. Амплитуды динамического разреза зависят от коэффициентов преломления или «головления» в точках входа и выхода волны (отрыва преломленной волны или преломления на границе), а также от распространения в покрывающей среде и преломляющем пласте. При миграции преломленная волна помещается в точку входа в пласт (или выхода из него). Влияние покрывающей среды и преломляющей границы на амплитуды преломленных волн можно учесть, используя характеристики взаимных записей [12, 29], или осреднить за счет многократных наблюдений. В таком случае амплитуды будут обусловлены только коэффициентами преломления в точках входа и выхода волны. Разрез может быть получен с различным шагом дискретизации по профилю, в частности с шагом, аналогичным в МОВ (между точками ОГГ), но в МПВ оптимальным (информационно обеспеченным) шагом является шаг между точками приема или возбуждения.

Основные принципы и особенности миграции на основе интеграла Кирхгофа иллюстрируются на материалах моделирования. Модель представлена четырьмя преломляющими границами, их граничные скорости увеличиваются с глубиной. Преломленные волны имеют одинаковую интенсивность и не затухают с расстоянием (рис. 7.3, а). При миграции одной сейсмической записи преломленных волн формируются изохроны возможного положения преломляющих границ (рис. 7.3, б). Миграция одной сейсмограммы ОТВ выполнена последовательно с граничными скоростями, оптимальными для одной из границ (рис. 7.4, а). При этом происходит формирование соответствующей преломляющей границы; прочие преломленные волны, хотя и ослабляются за счет несоответствия их кинематики заданным скоростям, но сохраняются в виде волн-помех. В случае миграции одной сейсмограммы с граничными скоростями для всех существующих в модели преломляющих границ

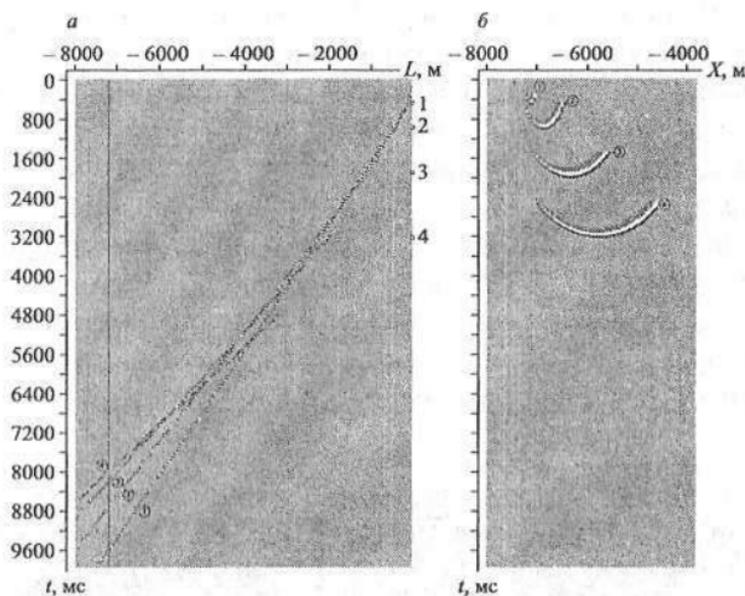


Рис. 7.3. Миграция одной синтетической записи (помечена) преломленных волн.  
 а — записи преломленных волн; б — изохроны преломляющих границ для одной записи.

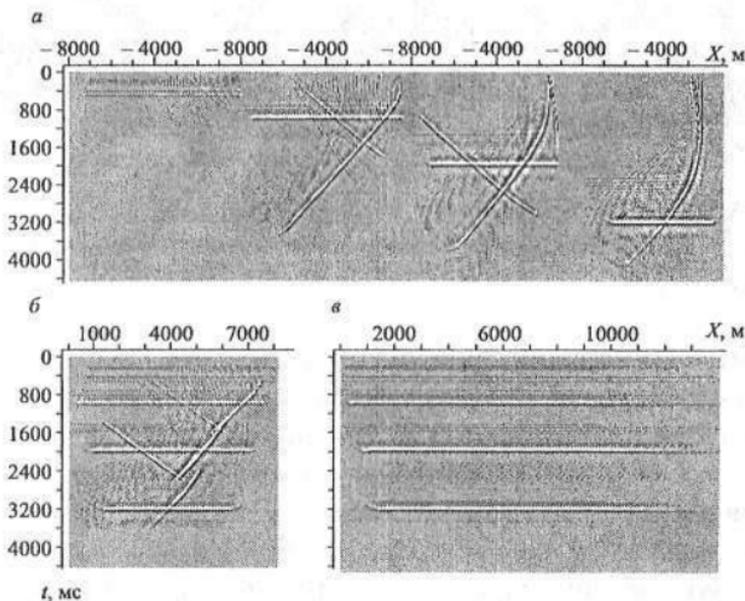


Рис. 7.4. Особенности миграции записей преломленных волн.  
 а — последовательная миграция преломленных волн по одной сейсмограмме ОТВ; б — построение всех преломляющих границ по одной сейсмограмме ОТВ; в — миграция преломленных волн по материалам многократных наблюдений.

формируются все границы (рис. 7.4, б), но остается интерференция самих преломленных волн, которая заметно усложняет разрез. Миграция записей многократных наблюдений преломленных волн со скоростными параметрами для всех преломляющих границ позволяет не только построить преломляющие границы, но и ослабить волны-помехи (рис. 7.4, в).

При миграции записей только первых вступлений преломленных волн уменьшается эффект наложения преломленных волн (рис. 7.5), но при этом соответственно сокращается интервал построения преломляющих границ по сравнению с интервалом преломляющих границ по полному годографу (ср. с рис. 7.4, б)

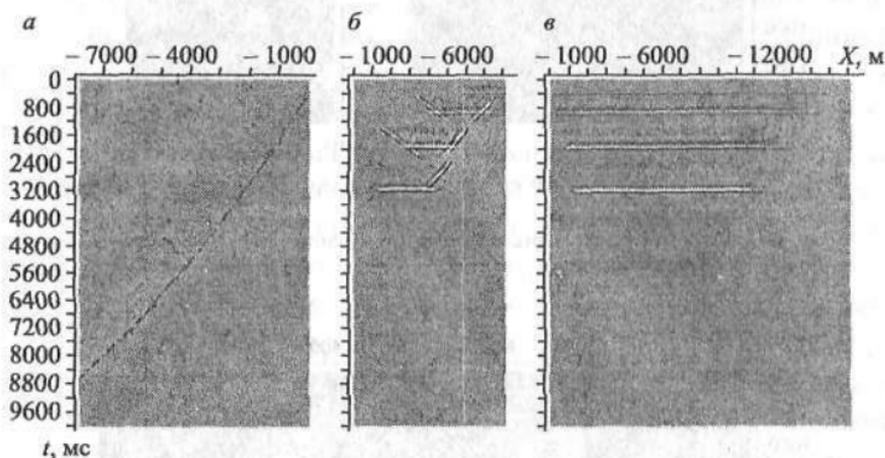


Рис. 7.5. Миграция первых вступлений преломленных волн.

а — сейсмограмма первых вступлений преломленных волн; б — миграция одной сейсмограммы ОТВ; в — миграция первых вступлений многократной системы наблюдений.

В процессе миграции формируется динамическое изображение преломляющей границы с учетом сейсмического сноса и увеличивается ее кинематическое отличие от прочих волн. Для сравнения отметим, что популярная в настоящее время редукция записей фактически не изменяет соотношение кинематических параметров разных волн, происходит только трансформация кажущихся скоростей (рис. 7.6). Кинематическая схема редукции хорошо известна, она обоснована для головных волн и не учитывает их сейсмический снос. При миграции записей преломленных волн различие их кинематических параметров переходит в различие формы преломляющих границ, истинных и ложных, кинематика которых соответ-

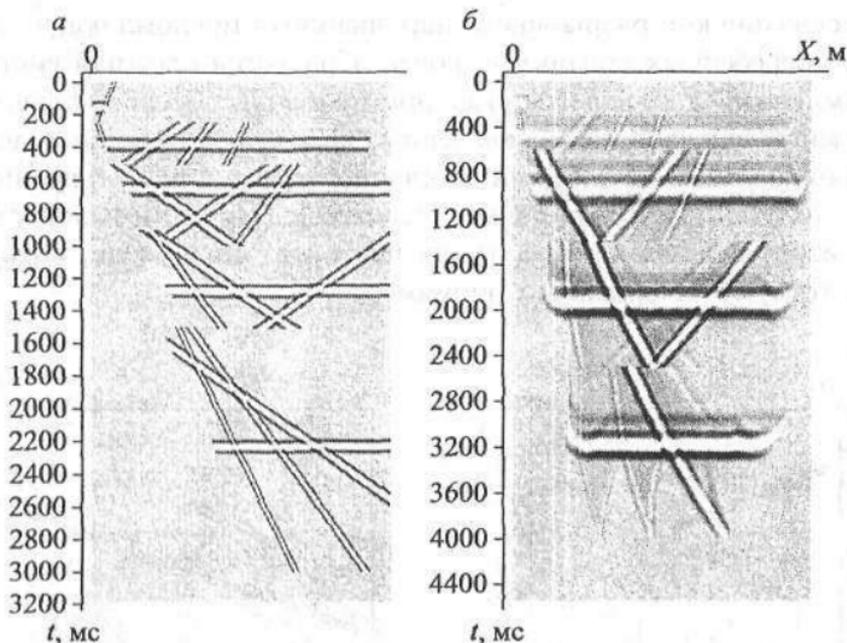


Рис. 7.6. Сравнение редукции (а) и миграции (б) модельных записей.

ствует или не соответствует схеме распространения волны, что позволяет перейти от корреляции волн на исходных записях к корреляции преломляющих границ на разрезе. Это имеет принципиальное значение в сейсморазведке: в МОВ подобный переход произошел в конце 60-х годов прошлого века. Такой подход позволяет автоматизировать обработку сейсмических записей МПВ с привлечением не только кинематических, но и динамических параметров волн, а результаты обработки использовать для прогнозирования как структурных особенностей для изучения пликативных и дизъюнктивных дислокаций, так и вещественного состава геологического разреза. На основе миграции по кинематическим и динамическим параметрам преломленных волн определяются значения граничной скорости, кроме того, упрощается сопоставление и совместное использование результатов МОВ и МПВ в концепции многоволновой сейсморазведки геологических сред [21].

В процессе миграции происходит построение волнового изображения преломляющей границы любой конфигурации с учетом явления проникания преломленных волн. Миграция преломленных волн позволяет перевести в динамический разрез волновую кар-

тину, связанную с разрывными нарушениями преломляющих границ и погребенных контактов, когда образуется сложная система преломленных и преломленно-дифрагированных волн. Эффективность миграции записей преломленных волн опробована на моделях с криволинейными границами: наклонной криволинейной границей (рис. 7.7), уступом и локальным поднятием (рис. 7.8). Конфигурация мигрированных границ точно повторяет их модели, которые соответствуют зачерненным линиям.

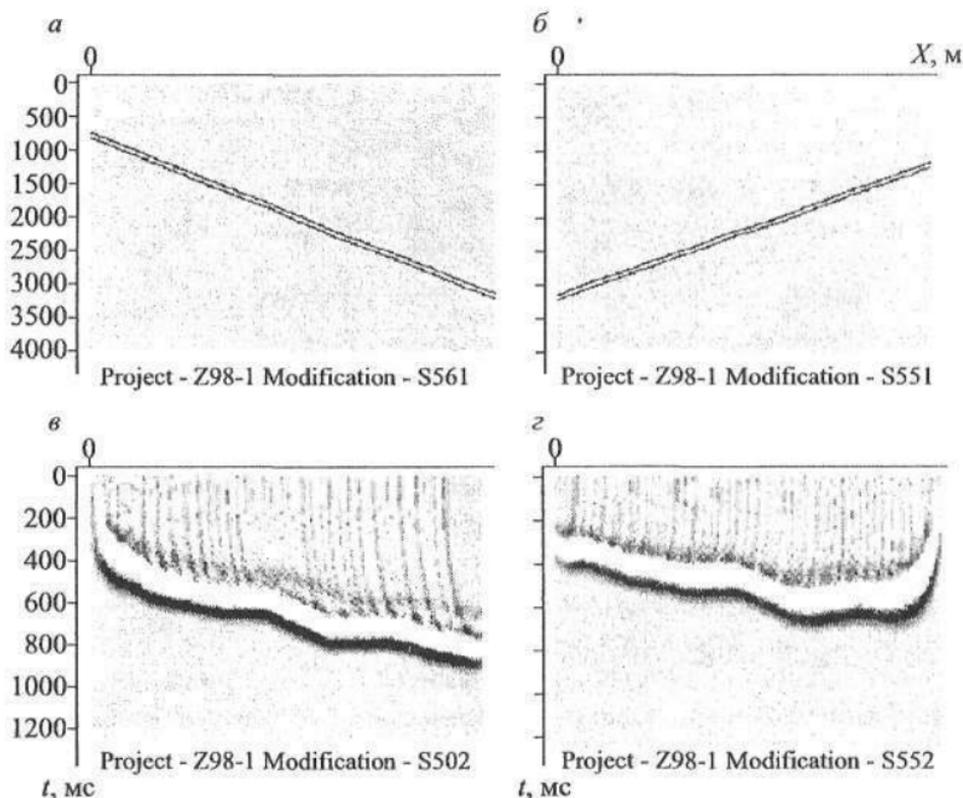


Рис. 7.7. Миграция синтетических записей преломленных волн от наклонной криволинейной границы.

*а* — встречные сейсмограммы преломленных волн; *б* — результаты миграции.

Обработка сейсмических записей преломленных волн на основе их миграции становится аналогичной обработке МОВ. В обработке сейсмических материалов МПВ выполняются те же операции и примерно в той же последовательности, что и в МОВ: определение скоростной модели среды, построение преломляющих границ (учет сейсмического сноса), разделение волн и повышение разрешенно-

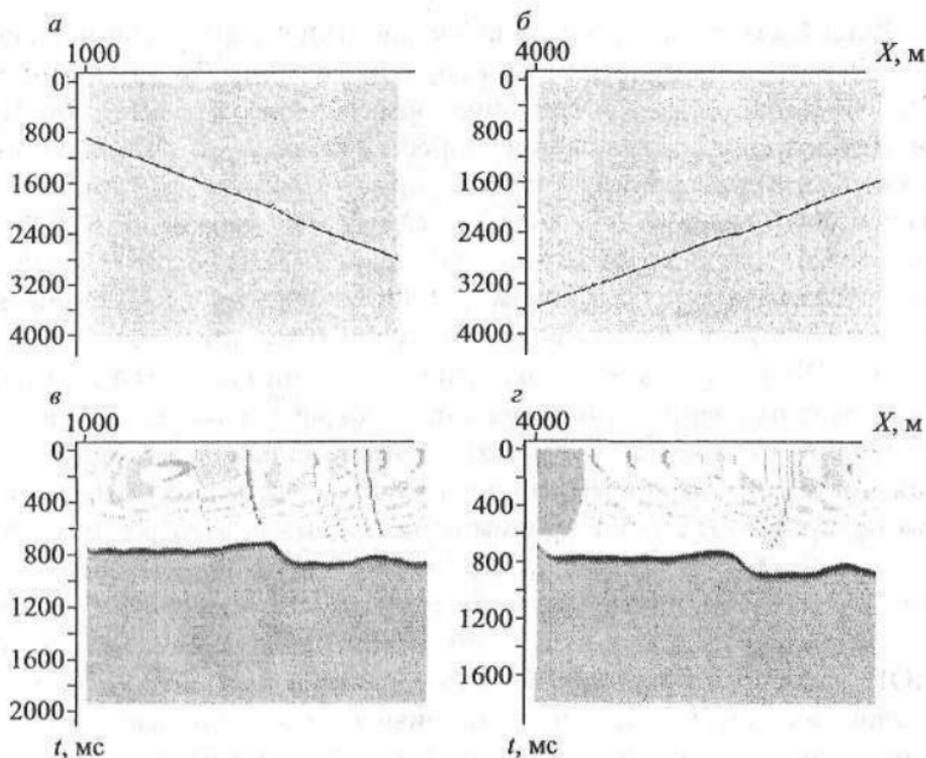


Рис. 7.8. Миграция синтетических записей преломленных волн над уступом. *а* — встречные сейсмограммы преломленных волн; *б* — результаты миграции.

сти сейсмических записей. Результатом обработки также является акустический разрез изучаемой геологической среды.

Рассмотрим более детально особенности и последовательность выполнения отдельных операций обработки.

### 7.3.1. Изучение скоростей распространения преломленных волн

При выполнении процедуры миграции по приближенной формуле (2.10) для расчетов необходимо знать глубину до преломляющей границы по нормали, скорости в верхнем и нижнем пластах. Технологически удобнее задавать  $t_0$  преломленных волн и скорости в верхнем и нижнем пластах, а глубину до границы вычислять.

В этом разделе рассмотрены возможности изучения скоростей распространения упругих волн и параметров, связанных с ними (глубины до преломляющей границы и значения  $t_0$ ) по сейсмическим записям преломленных волн.

Одной из основных операций обработки в МПВ является изучение скоростей распространения упругих волн, необходимых для построения как динамического, так и кинематического разрезов. Кроме того, полученные значения скоростей используются при геологической интерпретации в качестве характеристики упругих свойств изучаемой среды. Наиболее точный строгий способ определения скоростей распространения упругих волн в МПВ основан на миграции записей с использованием хорошо известных кинематических свойствах преломленных волн, но с учетом их динамики.

В МОВ в строгом варианте (при изучении скоростей по миграции исходных записей) определяются эффективные скорости в покрывающей среде в зависимости от вертикального времени до отражающих границ, их можно пересчитать в интервальные (пластовые) скорости. В приближенном варианте, по сейсмограммам ОСГ, находятся скорости ОСГ в зависимости от  $t_0$  отраженных волн [10, 33, 36]. Различие в этих скоростных зависимостях обусловлено наклоном отражающих границ. В МПВ, совершенно аналогично МОВ, на основе миграции исходных записей находятся скорости в преломляющем пласте (или граничные скорости) в зависимости от вертикального времени до преломляющей границы, по ним можно рассчитать эффективные и средние скорости в покрывающей среде. В приближенном варианте (по волновой картине) находятся граничные скорости в зависимости  $t_0$  преломленных волн. Различие скоростей обусловлено также наклоном преломляющих границ. По физическим особенностям преломленных волн можно определить модель среды только в случае реального увеличения пластовых (интервальных) скоростей с глубиной. Конечно, в реальных средах редко происходит такое изменение скоростей (чаще при общем нарастании скоростей наблюдается их уменьшение и увеличение скачками или плавно), и в таком случае в МПВ знания только одних граничных скоростей недостаточно для описания реальной скоростной модели среды. Требуется дополнительные сведения, хотя бы в виде средних или эффективных скоростей в покрывающей среде.

Возможности определения скоростей показаны на основе их перебора при миграции модельных записей преломленных волн (параметры модели описаны выше). Вначале рассмотрим влияние граничной скорости на результаты миграции преломленных волн (рис. 7.9, а). С изменением граничной скорости изменяется наклон преломляющей границы относительно ее истинного угла залегания

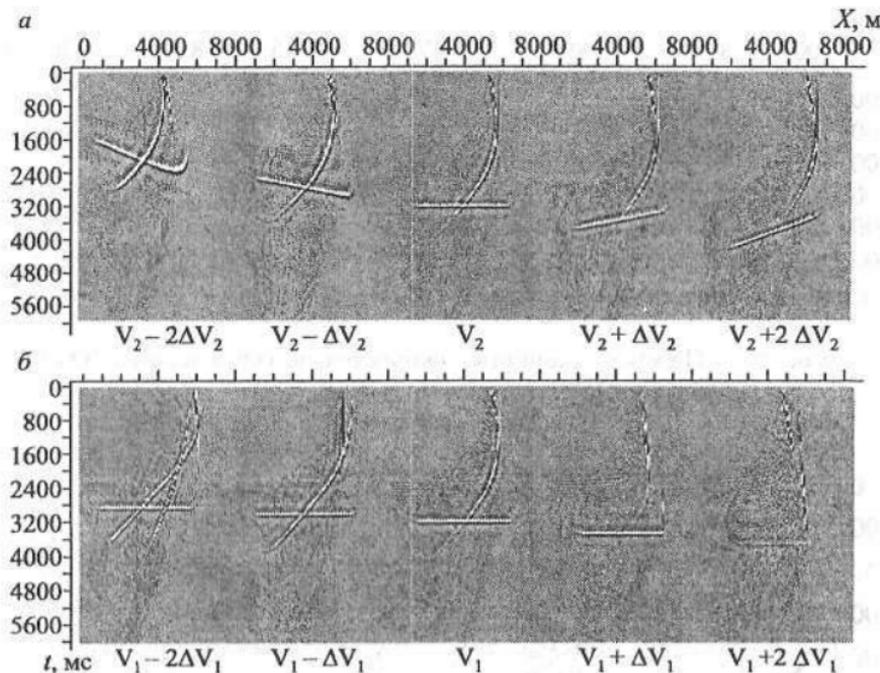


Рис. 7.9. Перебор граничной скорости (а) и скорости в покрывающей среде (б) для границы 4.

и вертикальное время до границы. Изменение наклона и времени до преломляющей границы происходит в основном за счет второго слагаемого в уравнении годографа преломленно-дифрагированной волны (см. (2.10)), первое и третье слагаемые слабо зависят от граничной скорости.

Аналогичные изменения в положении и наклоне преломляющих границ происходят при переборе граничных скоростей по реальным сейсмическим материалам преломленных волн (рис. 7.10).

Перебор граничных скоростей может выполняться по всем зарегистрированным преломленным волнам — по всей глубине изучаемого сейсмического разреза (рис. 7.11).

Совпадение наклона (и рельефа) участка преломляющей границы по встречным системам наблюдений служит критерием для определения истинного значения граничной скорости. Поэтому наиболее простой способ определения граничных скоростей — по встречным записям преломленных волн, которые должны обеспечить изучение общего участка преломляющей границы. При использовании только двух встречных сейсмических записей прелом-

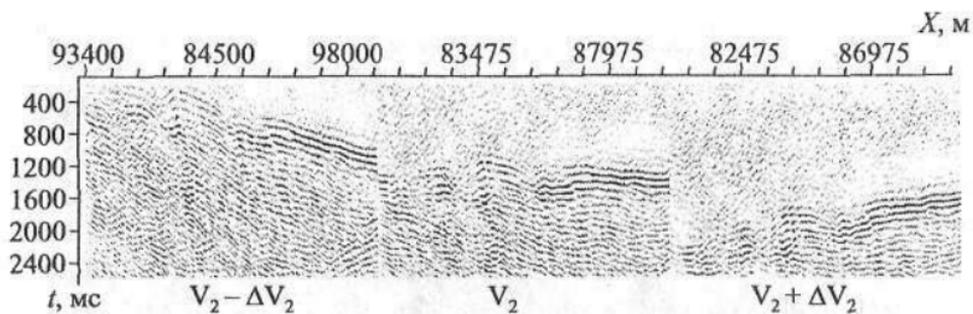


Рис. 7.10. Перебор граничных скоростей по сейсмограмме ОТВ преломленной волны от фундамента.

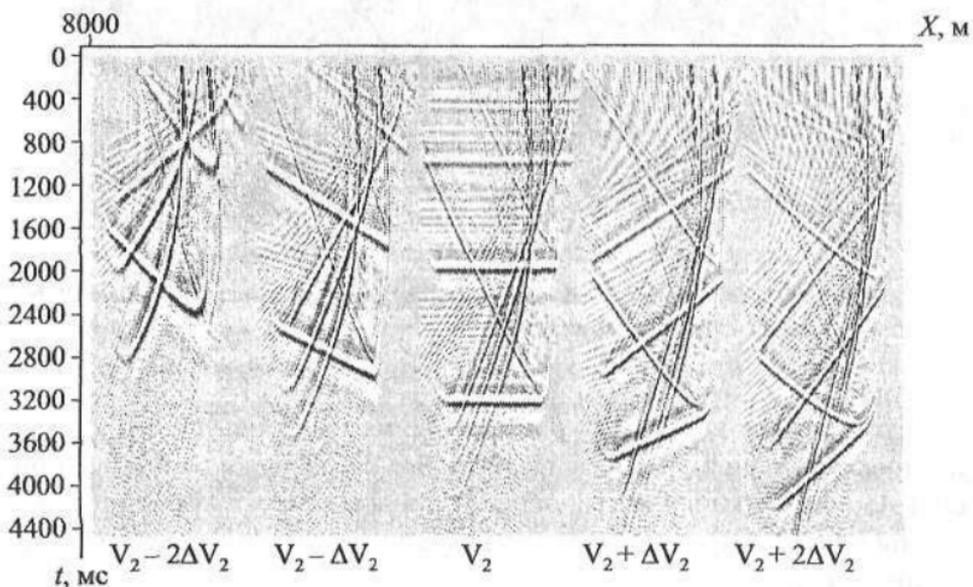


Рис. 7.11. Перебор граничных скоростей по сейсмическим записям для модели из четырех преломляющих границ 1-4.

ленных волн на результаты определения скоростей не влияют погрешности значений скоростей в покрывающей среде (постоянное смещение границ), так как граничная скорость определяется по совпадению наклона преломляющих границ, построенных по встречным записям преломленных волн, а не по их синфазному суммированию (рис. 7.12).

Использование для определения граничных скоростей записей многократных наблюдений преломленных волн позволяет осреднить погрешности в значениях скорости в покрывающей среде (рис. 7.13). Еще раз подчеркнем, что принцип определения гранич-

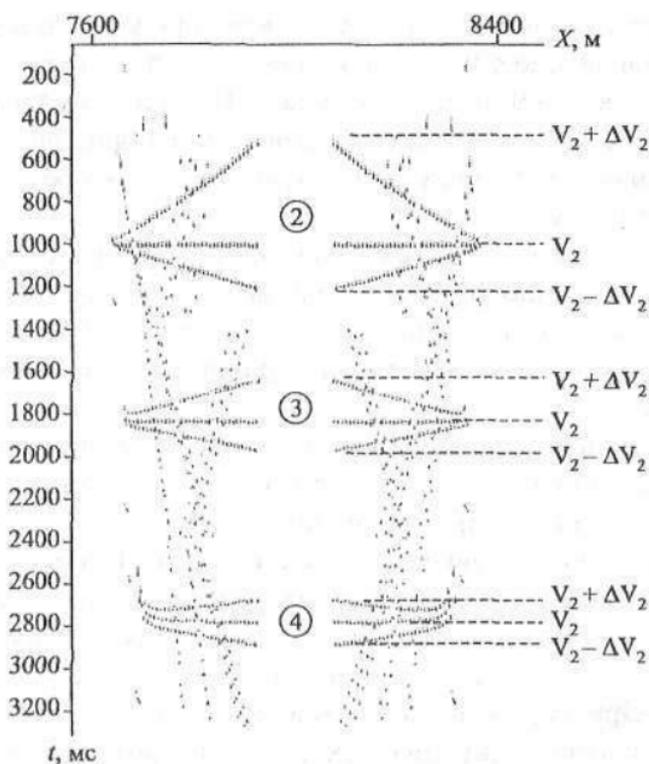


Рис. 7.12. Перебор граничных скоростей по встречным синтетическим сейсмограммам для границ 2-4.

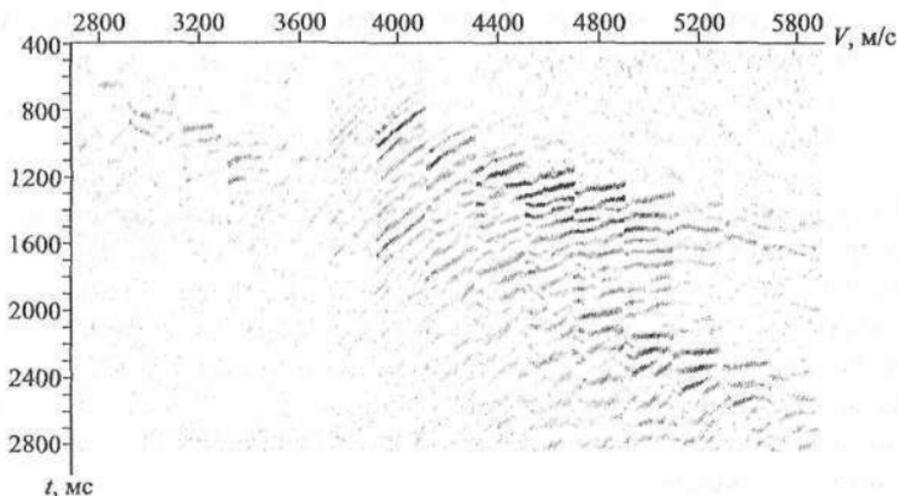


Рис. 7.13. Перебор граничных скоростей по сейсмическим материалам МПВ многократных наблюдений.

ных скоростей на основе миграции записей преломленных волн аналогичен определению эффективных скоростей по миграции исходных сейсмических записей в МОВ [28]. В обоих случаях скорости определяются по суммированию волнового изображения границ, а не исходной волновой картины и результаты перебора можно представить в компактном виде.

В результате перебора определяются граничные скорости в зависимости от вертикального времени до преломляющих границ на отдельных участках профиля, так что вдоль профиля получается полное представление об изменении граничных скоростей в изучаемом разрезе.

Рассмотренный динамический способ определения граничных скоростей на основе миграции записей может использоваться при произвольном рельефе преломляющих границ (включая и плоские границы), так как учитывает проницание волн. Для плоских границ и головных волн при определении скоростей можно использовать сейсмограммы ОСТ преломленных волн, в этом случае определяются скорости ОСТ:  $V_{\text{ОСТ}} = V_r / \cos \varphi$ . При малых углах наклона  $V_{\text{ОСТ}} \approx V_r$ . При переборе скоростей по сейсмограммам ОТП или ОТВ определяются кажущиеся скорости, по которым также можно в предположении малых углов наклона границ найти граничные скорости [10, 25, 36]. В обоих случаях скорости определяются в зависимости от  $t_0$  преломленных волн.

При переборе скоростей в покрывающей среде наклон преломляющей границы практически не меняется (рис. 7.9, б), происходит изменение ее амплитуды и смещение вдоль вертикального времени. Амплитуда границы несколько возрастает с уменьшением скорости в покрывающей толще за счет третьего слагаемого в формуле (2.10), как и при миграции записей МОВ [28], поэтому скорости по результатам перебора определить нельзя. По значению вертикального времени границы также нельзя определить скорость в покрывающей среде, кроме случая, когда априори известна глубина залегания границы, например, по данным МОВ. Изменение вертикального времени до границы обусловлено первым и третьим слагаемым формулы, второе слагаемое мало зависит от скорости в покрывающей среде.

Скорости в покрывающей среде по преломленным волнам в общем случае не определяются, их можно найти только в некоторых частных случаях, если образуется набор лучей в покрывающей среде под различными углами к границе, т. е. существует (или можно

составить) годограф волны от одной точки или участка границы. При этом скорость будет определяться в объеме покрывающей среды, которой соответствует годограф.

Для определения эффективных скоростей в покрывающей среде необходимо зарегистрировать преломленно-дифрагированные волны. По ним определение эффективных скоростей аналогично вычислению скоростей по дифрагированным волнам на разрезах СЦЛ в МОВ [31]. В случае криволинейных преломляющих границ можно составить сводный годограф преломленной волны от криволинейного участка границы, по нему приближенно определяется скорость в покрывающей среде. Такой способ определения скоростей применяется в кинематической обработке головных волн на основе сопряженных точек по встречным увязанным годографам преломленной волны [17, 25].

Глубину до преломляющей границы под источником (которая связана со скоростью в покрывающей среде) также нельзя определить по результатам ее перебора при миграции записей, так как ее изменение (рис. 7.14) приводит к обратному смещению границы почти на такую же величину в основном за счет первого слагаемого в формуле (2.10).

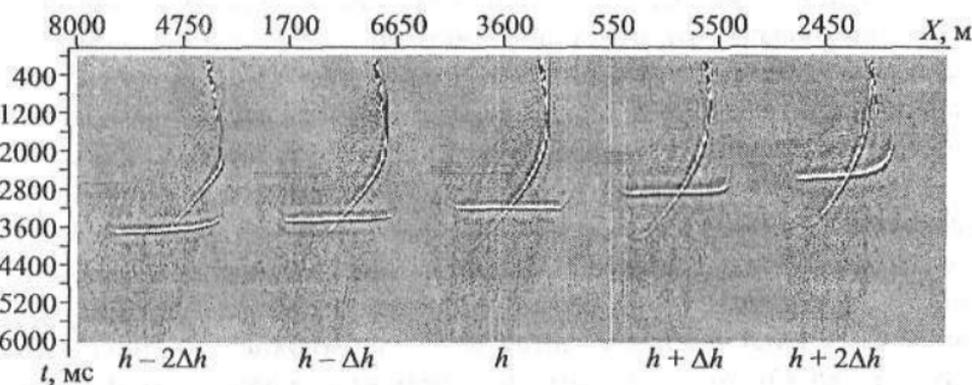


Рис. 7.14. Перебор глубины залегания границы  $h$  по синтетическим сейсмограммам преломленных волн.

Изменения скорости в покрывающей среде и глубины до преломляющей границы под источником смещают в сторону увеличения и уменьшения значения вертикального времени, не меняя наклона границы. Поэтому определение этих двух параметров можно объединить в нахождение одного значения  $t_0 = 2h_n \cos i / V_1$ , которое обеспечивает синфазное суммирование преломляющих границ, но

не позволяет найти отдельно скорости в покрывающей среде и глубину до границы. Определить оптимальные значения  $t_0$  преломленной волны под источниками можно приемами, аналогичными коррекции статических поправок в МОВ по их значениям в пунктах возбуждения и присма.

Таким образом, для миграции записей преломленных волн достаточно определить: граничные скорости в преломляющих пластах в зависимости от вертикального времени до преломляющих границ или от  $t_0$  преломленных волн, т.е. реальная скоростная модель среды заменяется моделью слоисто-однородной среды, в которой пластовые скорости приравниваются граничным. Такая модель позволит получить динамический разрез преломляющих границ (волновое изображение преломляющих границ) в линейном масштабе вертикального времени. Скорость в покрывающей среде и глубина до преломляющей границы должны удовлетворять выбранному значению вертикального времени (или  $t_0$ ). Для перевода в линейный масштаб глубин необходимо знать скорости в покрывающей среде.

Для уменьшения объема перебора в качестве априорных значений граничных скоростей можно использовать результаты кинематической обработки годографов преломленных волн, например, граничные скорости, найденные по разностным годографам на отдельных участках профиля, а вертикальные времена по разрезам МОВ или  $t_0$  преломленных волн — по экстраполяции наблюдаемых или редуцированных годографов.

Минимальный набор записей, необходимый для определения граничных скоростей, обеспечивается встречной системой наблюдений, а оптимальный набор записей — многократной встречной системой наблюдений. Перебор скоростей по многократной системе наблюдений представляется в обычном виде (см. рис. 7.13) и его оценка может быть сделана с помощью различных функций: суммированием, по коэффициенту когерентности или вычислением многомерной функцией корреляции, аналогично МОВ.

По фланговым многократным системам наблюдений в частных случаях также можно определить граничные скорости по миграции преломленных волн (см. рис. 7.12). Для получения встречной системы наблюдений необходимо пересортировать записи в другой тип сейсмограмм. Например, для прямой системы наблюдений, обработанной с получением сейсмограмм ОТВ, в качестве встречной системы принимается выборка сейсмограммам ОТП и соот-

ветственно наоборот, — при получении в поле сейсмограмм ОТП встречной системой для них будут сейсмограммы ОТВ. Конечно, сортировка записей не дает новой сейсмической информации, но с учетом принципа взаимности позволяет сформировать годографы преломленных волн по восстанию и падению преломляющих границ в случае их наклона. Построение одного и того же участка преломляющей границы в процессе миграции преломленных волн происходит в одном случае по точкам входа в преломляющий пласт, а в другом — по точкам выхода из пласта. Если шаг между записями в сейсмограммах ОТВ и ОТП одинаков (т. е. одинаков шаг между пунктами приема и возбуждения), то при переборе граничных скоростей в процессе миграции участки преломляющих границ будут построены также с одинаковым шагом, и не возникает дополнительных погрешностей в определении граничных скоростей. В случае различия шага между пунктами приема и возбуждения шаг получения преломляющих границ по встречным сейсмограммам соответственно будет разным, что приводит к различию в детальности изучения границ и снижает точность определения скоростей.

В кинематических способах обработки используется схема головных волн без учета их проникания, и граничные скорости вычисляются по разностному годографу, методами сопряженных точек, полей времен и т. п. В рамках двумерной скоростной модели слоисто-однородной среды определяются скоростные колонки по параметрам системы годографов преломленных волн: значениям  $t_0$ , и граничным или кажущимся скоростям. Вычисления производятся послойно, исходные времена пересчитываются последовательно на кровлю следующего слоя вдоль лучей, трассируемых через изученные слои.

Априорные статические поправки за строение верхней части разреза определяются при обработке материалов МПВ обычным образом по результатам изучения ВЧР и могут корректироваться по преломленным волнам. Такие алгоритмы существуют и широко используются для определения статических поправок для МОВ, их можно использовать и при обработке материалов МПВ. Так как в МПВ преломленную волну можно относить к точкам входа в границу и выхода, влияние статических поправок для фланговых систем наблюдений меняется: в одном случае поправки за прием не влияют на качество суммирования, а в другом, наоборот, на качество суммирования не влияют поправки за положение источника воз-

буждения. Для встречных систем происходит осреднение поправок за положение источника и приемника.

### 7.3.2. Учет сейсмического сноса преломленных волн (построение преломляющих границ)

Следующей операцией обработки является учет сейсмического сноса преломленных волн — переход от волнового поля к волновому изображению геологического разреза, т. е. построение динамического разреза преломленных волн. Эта операция выполняется с помощью процедуры миграции. Принцип миграции сейсмических записей преломленных волн рассмотрен выше.

Построение динамического разреза может выполняться как по точкам входа преломленной волны в пласт, так и по точкам выхода из него. В результате возможно получение двух вариантов динамического разреза преломленных волн: по точкам входа волны в преломляющий пласт (при этом осредняется изменение амплитуд в точках выхода волны) и по точкам выхода волны из преломляющего пласта (осредняется изменение амплитуд в точках входа волны).

Шаг между записями на полученных разрезах определяется шагом между приемниками или источниками соответственно, а кратность их наблюдений — количеством записей в сейсмограммах ОТВ или ОТП, но с учетом областей прослеживания волн. Эти разрезы можно суммировать, если в системе наблюдений шаг между источниками равен шагу между приемниками, и тогда кратность суммарного разреза равняется сумме кратности разрезов по ОТП и ОТВ.

Динамический разрез, получаемый в результате миграции записей преломленных волн, аналогичен разрезу МОВ, полученному также в результате миграции исходных записей, в частности, аналогичны и тесты развертки сейсмических записей в МОВ и МПВ (рис. 7.15).

В МОВ при миграции исходных записей происходит выделение полезных волн и осреднение упругих свойств покрывающей среды. В МПВ также выделяются полезные волны, но осреднение упругих свойств происходит в большем объеме геологической среды: в покрывающей среде, точках входа в преломляющий пласт или выхода из него и в преломляющем пласте (см. рис. 2.4).

При миграции записей преломленных волн происходит их постоянное растяжение, оно соответствует растяжению отраженной вол-

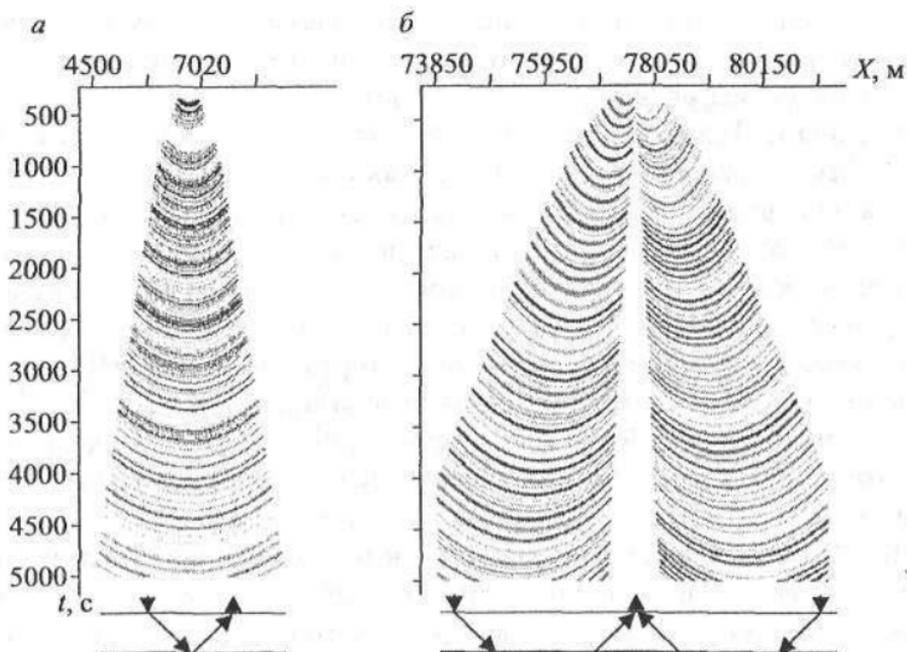


Рис. 7.15. Сравнение миграции записей отраженных (а) и преломленных (б) волн.

В нижней части рисунка показано положение источников и приемников при получении записей. Для преломленных волн приведена развертка двух встречных записей.

ны в начальной точке преломленной волны, но всегда меньшее, чем при обработке закритических отраженных волн. Поэтому мигрированный разрез МПВ более низкочастотный, чем разрез отраженных волн, полученный с использованием оптимальных удалений.

Особо следует отметить изучение сейсморазведкой сложных геологических сред, имеющих не только трехмерное строение, но и сложную скоростную модель. В МОВ к таким средам относятся территории с развитием соляной тектоники при изучении подсолевых отложений. Решение этой проблемы осуществляется в рамках детального учета кинематики волн на основе глубинной миграции записей. В МПВ подобная ситуация возникает в случае блокового строения фундамента (с грабенами и горстами) и в ряде других случаев, она также должна решаться на основе глубинной миграции записей с учетом реальной схемы распространения и кинематики волн.

Все прочие способы получения динамических разрезов МПВ являются частными случаями миграции исходных записей с привле-

чением кинематических и динамических свойств или только кинематики преломленных волн; в частности, все способы обработки на основе схемы распространения головных волн относятся к приближенным. Для головных волн используется более простая схема кинематики волн и соответственно простые способы обработки, но они не учитывают явление проницания волн в реальных средах [1, 5, 13, 16]. Учет проницания преломленных волн при построении динамических разрезов МПВ может выполняться только на основе миграции записей. Частными способами являются также: миграция отдельных преломленных волн или интервалов записи [18, 20], получение динамических разрезов на основе сопряженных точек [29], суммирование записей по общей точке приема (ОТП) после редукции годографов преломленных волн, суммирование по ОСТ (ОГП) и др. [15].

В качестве первого приближения к процедуре миграции исходных записей преломленных волн, рассмотрим получение динамических разрезов на основе сопряженных точек [29]. Сопряженные точки для взаимно увязанных прямого и встречного годографов головной волны соответствуют положению источника и приемника в ее начальной точке. В начальной точке годографа преломленной волны время прихода совпадает со временем прихода отраженной волны, а амплитуда пропорциональна амплитуде отражения. В таком случае записи преломленных волн в сопряженных точках можно рассматривать как отраженные волны и для их обработки использовать процедуры МОВ, в частности, получать динамические разрезы ОНП или ОГТ (рис. 7.16), выполнять их миграцию (учет сейсмического сноса, рис. 7.17), что особенно важно при сложной конфигурации преломляющих границ. Это единственный способ оптимального использования схемы ОСТ в МПВ, но для этого необходимо через сопряженные точки перейти от волновой картины МПВ к МОВ.

Для определения кинематических параметров преломленной волны в начальной точке: расстояния между сопряженными записями ( $X_c$ ) и времени прихода волны ( $T_c$ ), т. е. локальных координат начальной точки можно использовать различные данные, в частности, значения линии  $t_0$  и разностного годографа, найденных по встречным взаимно увязанным годографам преломленной волны:

$$T_c = t_0 / \cos^2 i, \text{ и } X_c = t_0 V_{\text{ОГТ}} \sin i / \cos^2 i,$$

где  $V_{\text{ОГТ}} = V / \cos \varphi$  — значение скорости ОГТ;  $V$  — скорость в по-

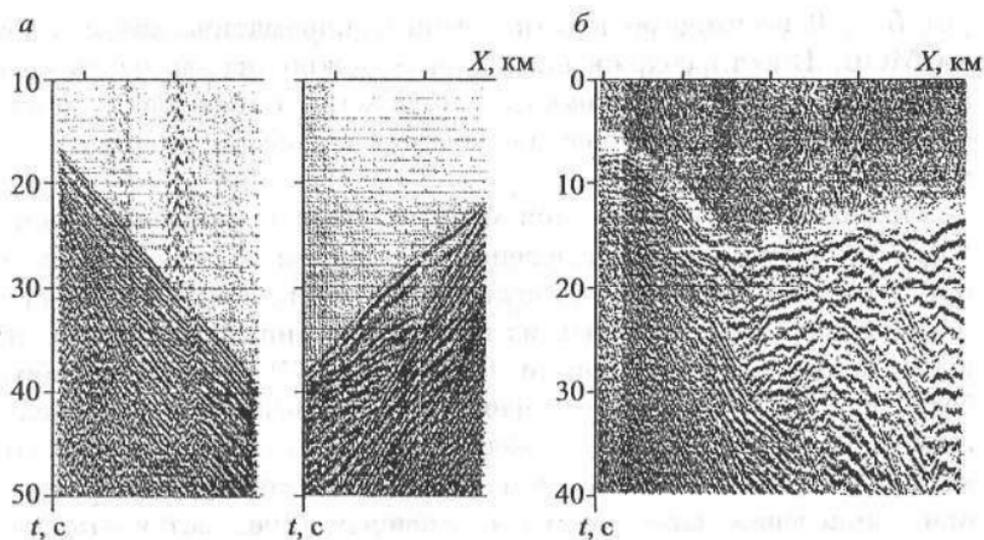


Рис. 7.16. Сейсмические записи на встречных годографах (а) и временной разрез по сопряженным точкам преломленных волн (б).

крывающей среде;  $\varphi$  — угол наклона границы;  $i = \arcsin(V/V_T)$  — критический угол;  $V_T$  — граничная скорость.



Рис. 7.17. Временной разрез по сопряженным точкам преломленных волн после миграции.

Перевод кинематики преломленных волн в сопряженные точки соответствует получению сейсмических записей в МОВ одноканальной установкой с изменяющимися удалениями источник-приемник (близкое к разрезу  $L = \text{const}$ ). Для перевода его в раз-

рез  $L = 0$  необходимо ввести обычные кинематические поправки МОВ. Вместо сопряженных точек можно использовать симметричные точки, погрешность приближения определяется углом наклона границы и совершенно аналогично использованию ОГТ в МОВ.

При обработке материалов многократных наблюдений происходит разделение волн: выделение полезных и ослабление помех, при этом суммирование осуществляется по точкам входа в преломляющий пласт и выхода из него. Изложенная последовательность получения динамических разрезов МПВ аналогична обработке в МОВ с получением временного разреза ОГТ и последующей его миграцией. Приближенность такого подхода к обработке определяется использованием схемы образования головных волн при вычислении параметров сопряженных точек без учета проницаемости и получением по материалам многократных наблюдений временного разреза ОГТ (суммированием волновой картины, а не границ), с его недостатками при сложном рельефе преломляющих границ.

Приближенными являются также способы, использующие получение временных разрезов преломленных волн с помощью редукции записей — ввода кинематических поправок:  $t_R(L) = t - \Delta t(L)$ ,  $\Delta t(L) = L/V_R$ , где  $\Delta t(L)$  — кинематическая поправка;  $V_R$  — скорость редукции;  $L$  — удаление источник-приемник.

Редукция может осуществляться при решении разных задач, но в основном для получения суммарных временных разрезов ОТП, ОТВ и ОСТ преломленных волн. Например, для получения временного разреза ОТВ необходимо спрямить и суммировать сейсмограммы ОТВ в каждой точке возбуждения вдоль профиля.

В МОВ для расчета кинематических поправок обычно используется параметр — скорость ОСТ для отражающей границы. В МПВ для редукции записей применяют кажущиеся или граничные скорости, а также граничные скорости ОСТ в зависимости от  $t_0$  преломленных волн. Если скорость редукции численно равна кажущейся скорости годографа, то редуцированный годограф головной волны для плоской границы будет представлять собой постоянное значение времени  $t_{0np}$  в источнике (см. формулу (2.1)):

$$t_R(L) = (t_{0np})_H = \frac{2h_H \cos i}{V_1}$$

Редуцированный годограф ОСТ головных волн спрямляется (соответствует постоянному значению времени), если в качестве скорости редукции использовать скорость ОСТ преломленных волн (см. формулу (2.4)):

$$t_R(L) = \frac{(t_{0\text{пр}})_и}{2} + \frac{(t_{0\text{пр}})_п}{2}.$$

При редукции годографа с граничной скоростью его наклон зависит от угла наклона преломляющей границы:

$$t_R(L) = \frac{(t_{0\text{пр}})_и}{2} + \frac{(t_{0\text{пр}})_п}{2} - \frac{L(1 - \cos \varphi)}{V_r}.$$

Ввод кинематических поправок в МПВ также можно одновременно выполнять для всех преломленных волн и для различных наборов записей: для сейсмограмм ОТВ, ОТП и ОСТ (см. рис. 7.6). Для плоских границ и головных волн в первом случае (для сейсмограмм ОТВ) время редуцированного годографа соответствует  $t_0$  для источника, во втором — для приемника, в третьем — для средней точки между источником и приемником (рис. 7.18).

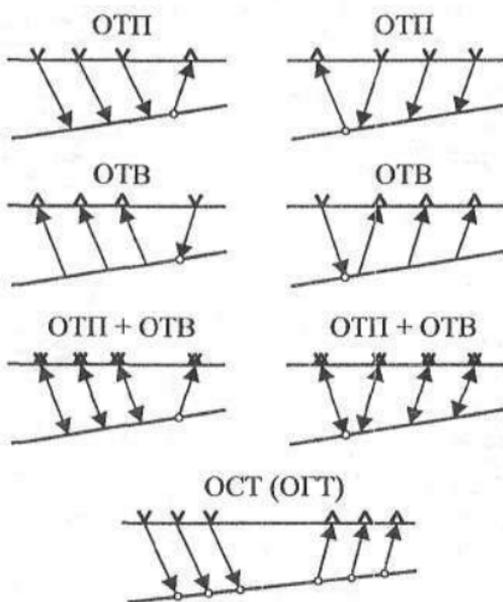


Рис. 7.18. Схемы получения разрезов ОТП, ОТВ и ОСТ по преломленным волнам.

Кружком на преломляющей границе отмечены точки входа волн в пласт и выхода из него, к которым относятся суммотрассы разрезов.

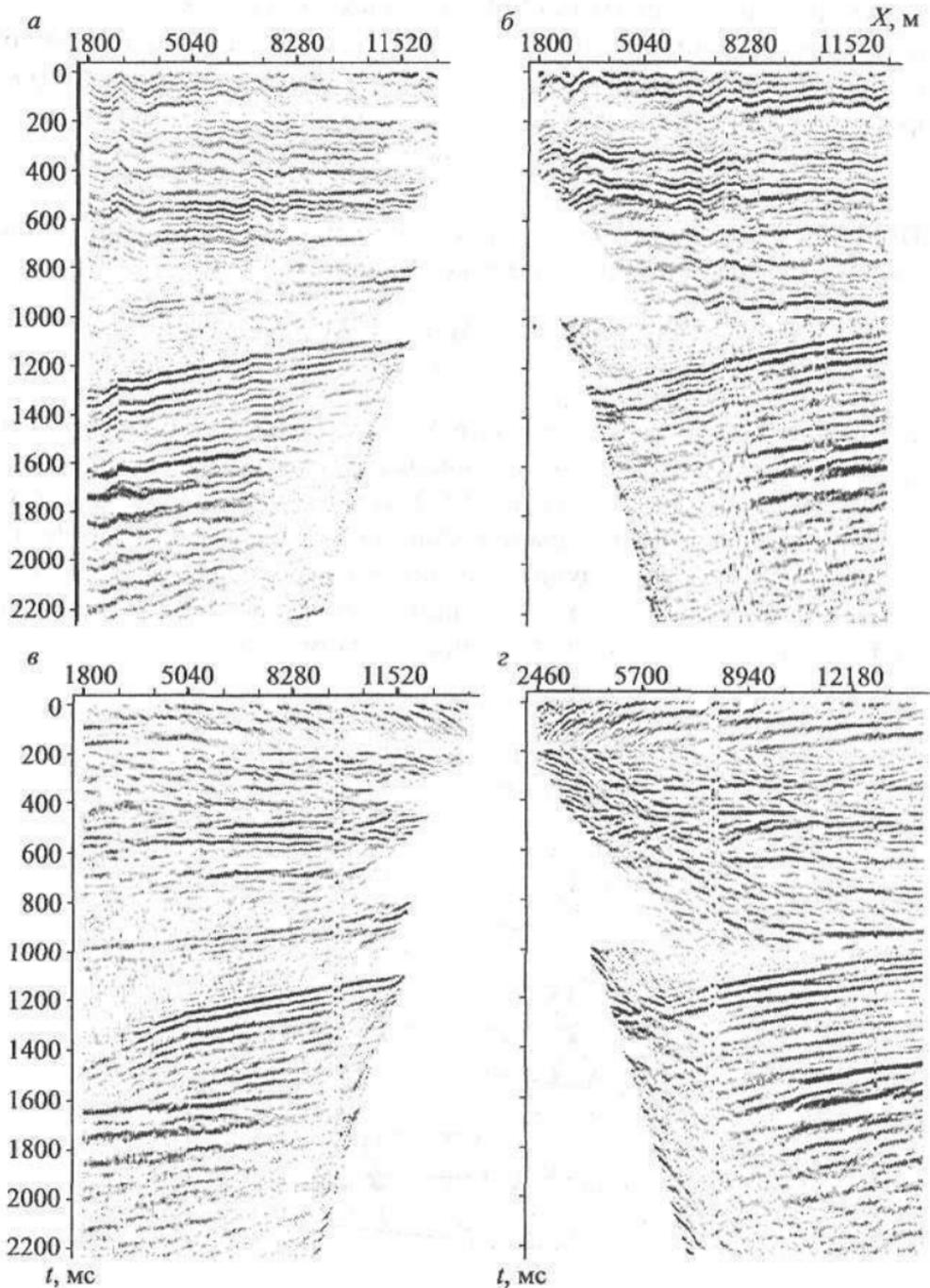


Рис. 7.19. Временные разрезы ОТП и ОТВ, полученные в соответствии со схемой на рис. 7.18.

а — разрез ОТП (левый фланг); б — разрез ОТВ (левый фланг); в — разрез ОТП (правый фланг); г — разрез ОТВ (правый фланг).

Если эту операцию выполнить отдельно по флангам встречной многократной системы наблюдений и редуцированные записи суммировать, то получится четыре разреза: по два ОТВ и ОТП различных флангов без учета сейсмического сноса волн (рис. 7.19). При этом разрезы ОТВ динамически соответствуют точке входа преломленной волны в пласт, а ОТП — точке выхода из пласта. Разрезы ОТВ и ОТП, составленные из взаимных записей разных флангов, можно просуммировать на совпадающих пикетах, так как у них одинаковый сейсмический снос. При суммировании разрезов ОТВ и ОТП одна и та же точка среды является точкой входа в преломляющий пласт (для ОТВ) и выхода из него (для ОТП). В результате получатся только два динамических временных разреза, смещенные друг относительно друга на двойной сейсмический снос преломленных волн.

Так как временные разрезы ОТП и ОТВ смещены по точкам входа и выхода, то без учета сейсмического сноса их суммировать нельзя, объединить можно только после миграции. По динамическим разрезам ОТП и ОТВ, смещенным на двойной сейсмический снос, можно выполнить миграцию. Разрезы ОТП и ОТВ после миграции преломленных волн представляются одинаково — в удвоенных вертикальных временах до границ и их можно сложить, в результате получится окончательный динамический разрез преломленных волн в линейном масштабе вертикального времени и с учетом сейсмического сноса (рис. 7.20). Разрезы МПВ и МОВ с учетом физических особенностей образования и распространения преломленных и отраженных волн после миграции становятся одинаковыми, и для плоских границ соответствуют разрезам, полученным при миграции исходных записей. Конечно, можно учитывать сейсмический снос отдельно по всем четырем сейсмическим разрезам и только после этого их объединить. Накапливание записей от разных приемников и источников возбуждения позволяет не только улучшить соотношение сигнал — помеха (ослабить помехи), но и осреднить строение покрывающей среды.

Изложенная технология получения динамических разрезов преломленных волн аналогична получению временных разрезов ОСТ в МОВ, но с учетом специфики распространения преломленных волн. В рамках плоских границ и головных волн временные разрезы ОТП и ОТВ аналогичны разрезам ОСТ в МОВ (т. е. без учета сейсмического сноса) и отличаются величиной сейсмического сноса. Различие между временными разрезами МОВ и МПВ возникает

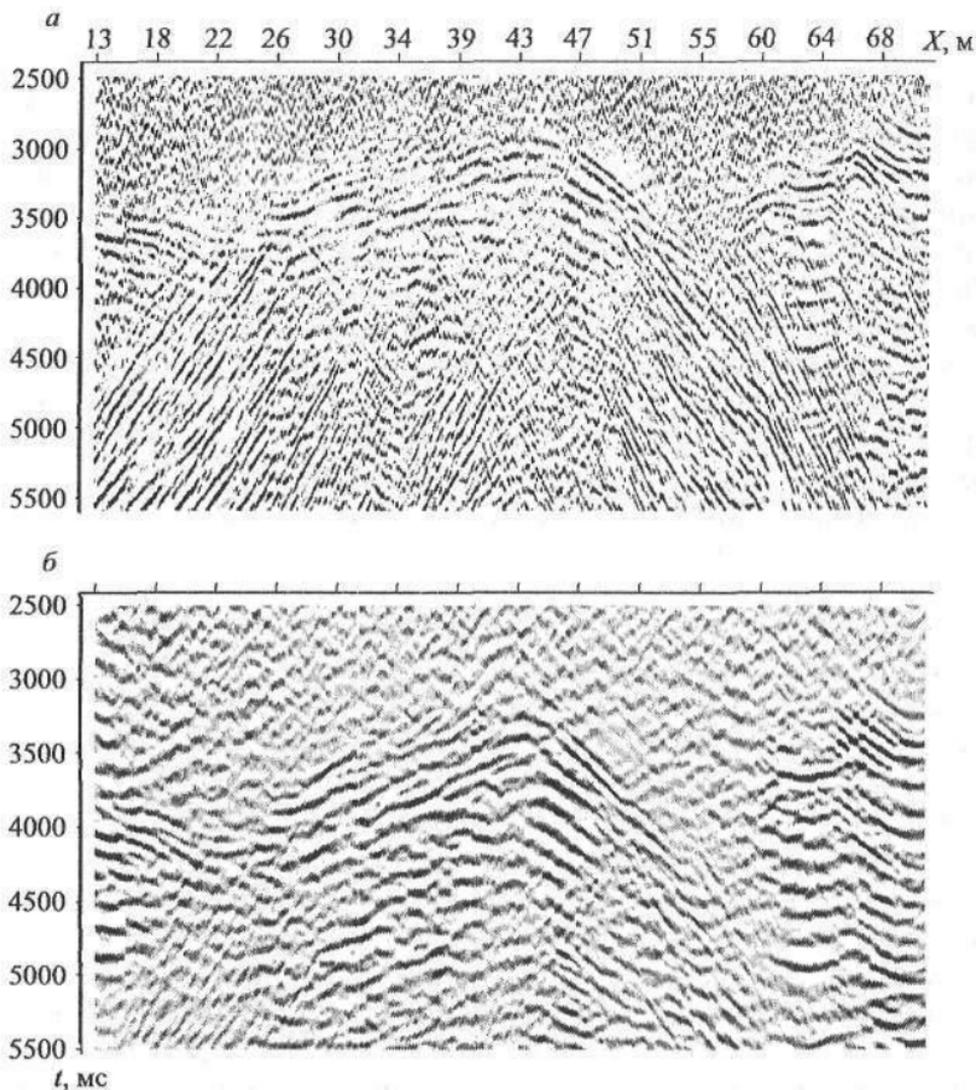


Рис. 7.20. Временной разрез ОТП преломленных волн до миграции (а) и после миграции (б).

с кривизной границ. В МОВ при криволинейных границах можно осуществить синфазное суммирование годографов ОСТ, хотя появляется их неоднозначность, которая устраняется с помощью кинематических поправок, учитывающих наклон границ (процедура ДМО). В МПВ ввод кинематических поправок для синфазного суммирования волн в случае криволинейных границ резко осложняется, кроме того, происходит проницание волн и тогда необходимо

переходить непосредственно к миграции исходных записей преломленных волн, минуя этап получения временных разрезов.

В МПВ временные разрезы ОТП и ОТВ представляются в масштабе  $t_0$  преломленных волн, в МОВ разрезы ОСТ соответственно в масштабе  $t_0$  отраженных волн. Для одних и тех же границ  $t_0$  преломленных волн всегда меньше, чем отраженных волн. Кроме того,  $t_0$  отраженных волн зависит от глубины и угла наклона границ, а  $t_0$  преломленных волн — еще и от соотношения скоростей, т. е. от критического угла.

Миграция временных разрезов МПВ в масштабе времени  $t_0$  преломленных волн аналогична миграции временных разрезов СЦЛ или ОСТ (ОГТ) в МОВ и выполняется по формуле:

$$t = \sqrt{1 - (V_1/V_2)^2} * \sqrt{t_w^2 + (\Delta X/V_1)^2}.$$

Для сравнения приведем формулу для миграции временных разрезов в МОВ [28, 31, 33]:

$$t = \sqrt{t_w^2 + (\Delta X/V)^2},$$

что соответствует только второму множителю формулы для миграции временных разрезов в МПВ, первый множитель которой учитывает отличие  $t_0$  преломленных волн от  $t_0$  отраженных волн.

При такой последовательности обработки уменьшается растяжение записей по сравнению с миграцией исходных материалов, так как при получении временных разрезов кинематические поправки вводятся способом, при котором нет растяжения записей [27, 38], понижение частоты происходит только за счет эффекта суммирования, как при получении временных разрезов, так и при их миграции.

Использование сейсмограмм ОСТ для получения динамических разрезов преломленных волн копирует схему получения разрезов ОСТ в МОВ, но для МПВ эта схема не оптимальна. Применительно к МПВ при этом часто говорят об общей глубинной площадке (ОГП) [7, 15], хотя и этот термин не совсем корректен, поскольку отсортированные по принципу ОСТ трассы для различных баз наблюдений отвечают разным по длине перекрывающимся участкам преломляющей границы (см. рис. 7.18).

Сейсмограммы ОСТ МПВ можно сформировать при многократных системах наблюдений из записей, координаты пунктов возбуждения и приема которых удовлетворяют условию  $X_{\text{ОСТ}} = (X_{\text{и}} +$

$X_n)/2$ . Годограф ОСТ МПВ также обладает симметрией (вследствие принципа взаимности) относительно координаты  $X_{\text{ОСТ}}$ . Кажущаяся скорость годографа ОСТ головной волны (см. формулу (2.7))  $V_{\text{ОСТ}} = V_r / \cos \varphi$ , и если ее использовать в качестве скорости редукции, редуцированный годограф также будет иметь постоянное время  $t_{\text{опр}}$ , но на среднем пикете — в ОСТ.

Обработка сейсмических записей МПВ по способу ОСТ осуществляется по стандартной технологической схеме: скоростной анализ — определение скоростей ОСТ, получение временных разрезов суммированием записей ОСТ с вводом кинематических поправок, учет сейсмического сноса — миграция разреза ОСТ. Отличия от МОВ связаны со спецификой кинематики головных волн.

Образование и распространение преломленных волн не укладывается в схему ОСТ (ОГП), так как не учитывает различие пути волны в расширяющейся расстановке. Получаемый при этом разрез отображает лишь кинематику плоской преломляющей границы (для головных волн), ее динамика всегда будет размазана (осреднена). Для МПВ нет общей глубинной точки (или площадки) даже в случае горизонтальных границ. Схеме образования головных волн больше соответствует суммирование по ОТП (или ОТВ) редуцированных записей. Если в МОВ временной разрез ОСТ наиболее оптимальное представление волновой картины без учета сейсмического сноса, то в МПВ таким представлением являются разрезы ОТП или ОТВ. И наоборот, получение разреза ОСТ в МПВ с кинематических и динамических позиций аналогично получению разрезов ОТП и ОТВ в МОВ.

Как уже отмечалось выше, получение разреза ОСТ в рамках схемы головных волн может выполняться на основе алгоритма сопряженных точек, при использовании совпадения кинематики отраженных и преломленных волн в начальных точках преломленных волн, т. е. фактически в рамках схемы отраженных волн. Для учета сейсмического сноса необходимо выполнить миграцию разреза ОСТ (как и в МОВ).

При кинематической обработке широко используется редукция отдельных сейсмограмм ОТВ (без суммирования) — получение фрагментов однократных временных разрезов. По редуцированным записям упрощается визуальная корреляция волн для считывания времен их прихода в кинематических способах обработки. С помощью редукции можно изменить на бесконечную кажущуюся скорость любой волны, но редукция не меняет соотношения кине-

матических параметров волн, в то время как миграция даже оди-  
ночных сейсмограмм резко меняет взаимоотношение преломленных  
волн (см. рис. 7.12). Различие времен редуцированных и мигриро-  
ванных сейсмограмм объясняется тем, что при редукации получает-  
ся  $t_0$  преломленных волн, а при миграции — удвоенные вертикаль-  
ные времена до преломляющей границы.

Выше рассмотрены способы получения волнового изображения  
преломляющих границ по сейсмическим записям преломленных  
волн с использованием их кинематических и динамических пара-  
метров точными и приближенными приемами. Их аналоги исполь-  
зуются при кинематической обработке годографов преломленных  
волн.

Миграция временных полей (годографов) реализуется на основе  
решения уравнения эйконала различными способами, в частности,  
конечных разностей [18, 19, 25], но может также осуществляться и  
на основе интеграла Кирхгофа. Миграция выполняется обычно в  
рамках головных волн, но можно при этом учитывать и явление  
проникания.

Для построения преломляющих границ по годографам чаще  
всего используется ряд способов: метод полей времен, способ сопря-  
женных точек, способ  $t_0(\pm)$  и др. Они многократно опубликованы,  
их использование зависит прежде всего от систем наблюдений, обу-  
словливающих применимость того или иного способа, а также от  
сложности изучаемого разреза.

### 7.3.3. Выделение полезных волн

Выделение полезных волн — основная и наиболее трудная опера-  
ция обработки сейсмических материалов. Задача операции — осла-  
бить сейсмические помехи и при этом не исказить их свойства по-  
лезных волн. В последовательном решении обратной задачи сей-  
сморазведки выделение полезных волн позволяет перейти от слож-  
ной реальной волновой картины к полю полезных волн, т. е. к иде-  
ализированной физической модели геологической среды и далее  
иметь дело уже только с полезными волнами. В общем случае в  
результате выделения полезных волн из площадных многократных  
записей в каждом бине получается только одна запись, на которой  
изменено соотношение сигнал/помеха.

В методике работ мы рассмотрели принципы ослабления помех  
и выбор оптимальных параметров методики работ для решения

этой задачи. Здесь рассмотрим способы ослабления волн-помех.

Ослабление помех (или выделение полезных волн) заключается в таком преобразовании зарегистрированной волновой картины, которое меняет соотношение сигнал/помеха в пользу полезных волн. В МПВ полезными волнами являются преломленные и преломленно-дифрагированные продольные или поперечные. Все способы разделения сейсмических волн основаны на различии кинематических и динамических свойств.

Для разделения волн в основном используются интерференционные системы на основе набора записей, принцип их действия изложен в гл. 4, здесь рассматривается их оптимальное использование. Вначале оценим возможности разделения волн с помощью интерференционной системы по волновой картине на некотором наборе записей (рис. 7.21).

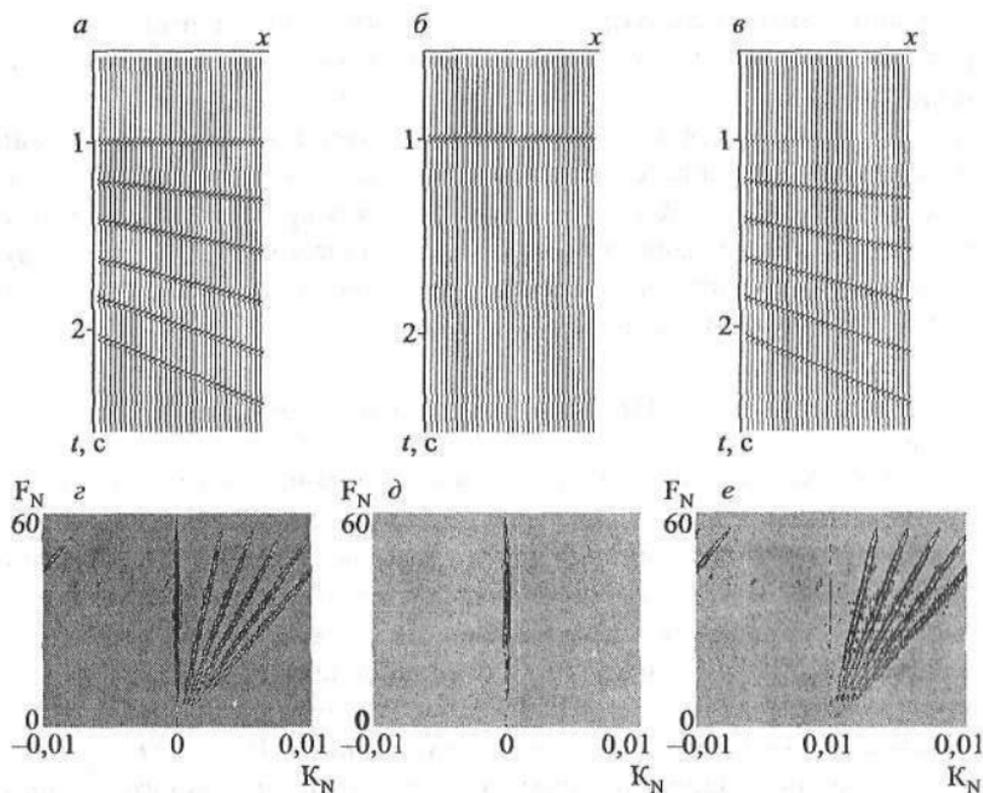


Рис. 7.21. К разделение волн интерференционной системой.

*а* — исходная (синтетическая) сейсмограмма; *б* — сейсмограмма после суммирования (ослабления помех); *в* — сейсмограмма волн-помех; *г-е* — двумерные ( $f$ - $K$ ) спектры соответственно.

Интерференционные системы по волновой картине на наборах записей имеют принципиальные недостатки, как в МПВ, так и МОВ. В частности, в МПВ при этом не учитывается проницающие волн, а в МОВ, при сложном строении среды, происходит потеря информации об отражающих границах [26, 29, 30]. Основное условие эффективного использования интерференционных систем — синфазное суммирование полезных волн. Для большинства наборов записей обеспечить синфазное суммирование полезных волн просто не реально, или технологически сложно. Поэтому используют такие наборы записей, по которым проще обеспечить синфазное суммирование полезных волн: в МОВ суммирование сейсмограмм ОСТ после ввода кинематических поправок, а в МПВ — суммирование сейсмограмм ОТП (или ОТВ) после редукции, при этом синфазное суммирование можно обеспечить только для головных волн.

Гораздо проще и эффективнее использовать интерференционные системы не по волновой картине, а по волновому изображению границ после миграции исходных записей. В этом случае удастся минимизировать искажения кинематики и динамики границ, даже при сложном их рельефе. Так, в МОВ после миграции исходных записей независимо от конфигурации границ они суммируются (геометрически) в одной точке и не искажаются, нет и потери информации о границах, происходит только осреднение покрывающей среды в конусе с вершиной на границе. В МПВ после миграции записей многократных наблюдений учитывается сейсмический снос и проницающие волн и проще обеспечить синфазное суммирование границ.

Таким образом, наиболее строгий способ использования интерференционных систем с минимальными искажениями упругих свойств изучаемой среды в МПВ — суммирование преломляющих границ после миграции исходных записей многократных наблюдений. В приближенном варианте интерференционную систему можно осуществить суммированием сейсмограмм ОТП или ОТВ (до миграции), но в случае сложного рельефа границ трудно осуществить синфазное суммирование преломленных волн.

В том и другом случаях (при разделении волн и границ) необходимо обеспечить синфазное суммирование полезных волн и истинных границ, т. е. расположить их спектры вдоль оси частот, а спектры помех и ложных границ не должны проектироваться на ось частот. Чем сложнее рельеф преломляющих и отражающих гра-

ниц, тем труднее обеспечить суммирование волновой картины на наборах записей МПВ и МОВ.

При миграции исходных записей кинематика преломленных волн (форма годографов) переводится в форму границ истинных и ложных, а динамика (амплитуды) пропорциональна коэффициентам преломления, суммирование выполняется уже по границам. Кинематическое различие границ в процессе миграции увеличивается по сравнению с волновой картиной (рис. 7.22).

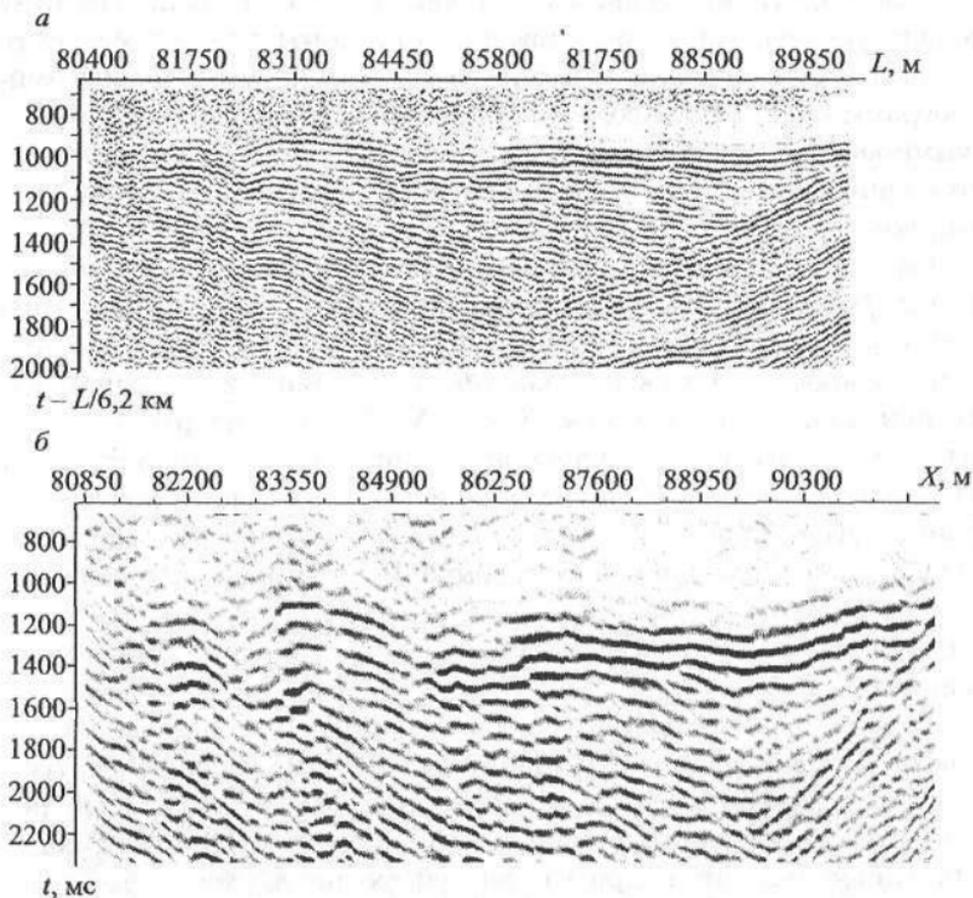


Рис. 7.22. Сравнение редукции (а) и миграции (б) преломленной волны от фундамента.

При миграции исходных записей преломленных волн в каждой точке разреза должны синфазно суммироваться по кратности наблюдений истинные преломляющие границы, а ложные — ослабляться, это соответствует наиболее оптимальной интерфе-

ренционной системе для разделения волн и ослабления помех. В МПВ по своим кинематическим и динамическим свойствам наиболее близки к полезным преломленным волнам закритические отражения, их разделение и представляет наиболее трудную задачу, аналогичную разделению однократных и многократных волн в МОВ.

В процессе миграции ослабляются также низко- и среднескоростные волны-помехи, у которых кажущиеся скорости меньше кажущихся скоростей годографа преломленно-дифрагированной волны.

Операция суммирования имеет наиболее острую частотную характеристику при разделении волн или границ. Поэтому предварительное применение любой двумерной фильтрации к тому же набору записей до его суммирования не имеет смысла [30]. Предварительное ослабление некоторых помех можно осуществить по другому набору записей с меньшим шагом между ними и соответственно меньшим эффектом эляйсинга.

Возможности разделения волн определяются параметрами методики работ, в частности параметрами сейсмограмм ОТП и ОТВ. Эта возможность может использоваться различным образом: при строгой обработке — с помощью миграции исходных записей, а в случае приближенной обработки — суммированием волновой картины. Если не обеспечено получение сейсмограмм ОТП или ОТВ в каждой точке изучаемого разреза, нет возможности разделения волн и ослабления помех по записям МПВ без искажения свойств полезных волн независимо от геологического строения территории.

Выделение полезных волн и ослабление помех в МПВ происходит при суммировании преломляющих границ по кратности наблюдений в процессе их миграции. Встречные записи определяют одну сопряженную точку и дают двухкратное наблюдение преломляющих границ. Динамические разрезы получаются по точкам приема или возбуждения и кратность суммирования определяется соответственно по количеству записей в сейсмограммах ОТП или ОТВ, кроме того, возможно суммирование этих разрезов, поэтому максимальная кратность  $K_{\max} = N_{\text{отп}} + N_{\text{отв}}$ .

При получении временных разрезов по сопряженным точкам или суммированием сейсмограмм ОТП и ОТВ разделение волн происходит по волновой картине, без учета сейсмического сноса преломленных волн и справедливо только для плоских границ и го-

ловных волн. Для криволинейных границ и в случае прощипывания волн синфазное суммирование полезных волн обеспечить практически не возможно и направленность интерференционной системы по разделению волн снижается. Совершенно аналогичная ситуация существует и в МОВ: для плоских границ можно учесть кинематику волн при получении разрезов ОТП или ОТВ, хотя их динамика при этом искажается, но с усложнением рельефа границ не обеспечить даже кинематического представления временных разрезов ОТП или ОТВ, не говоря о динамике волн.

По отдельным сейсмограммам и однократным системам наблюдений возможности разделения волн ограничены, хотя происходит некоторое ослабление волн-помех (см. рис. 7.4), резко отличающихся по своим кинематическим и динамическим свойствам от полезных волн.

В рамках кинематической обработки разделение волн происходит в процессе снятия времен прихода (кинематики) волн. Иногда при этом применяют частные случаи миграции записей — пересчет волновой картины на некоторый уровень (продолжение волнового поля) для упрощения корреляции волн в зонах интерференции.

#### 7.3.4. Повышение разрешенности записей и расчет акустического разреза

Повышение разрешенности записей преломленных волн также выполняется обычным образом с помощью процедур обратной фильтрации (деконволюции), она может применяться в процессе обработки несколько раз: к исходным записям и к разрезам.

Форма импульса преломленных волн зависит, кроме коэффициентов преломления, от целого ряда причин: формы импульса в источнике, фильтрующих свойств геологической среды при распространении колебаний (т. е. от поглощения и рассеивания энергии и т. п.). Кроме того, использование интерференционных систем для ослабления сейсмических волн-помех не проходит бесследно и для полезных волн. Все интерференционные системы являются фильтрами низких частот или полосовыми фильтрами и в результате их применения помимо ослабления помех снижается разрешенность полезных волн. В результате действия всех этих явлений частотный спектр полезных волн резко сужается. Однако для определения детальной характеристики упругих свойств среды необхо-

дим компенсировать фильтрующее действие геологической среды и операций обработки, так, чтобы амплитуды волн определялись только коэффициентами преломления. Для этого необходимо расширить полосу частот полезных волн, т. е. повысить их разрешенность.

За коэффициент разрешенности ( $K_p$ ) сейсмических записей принято отношение площади реального амплитудного спектра ( $S_p$ ) к полной площади спектра ( $S_n$ ), ограниченного частотой Найквиста  $K_p = S_p / S_n$  [22, 33, 36, 39]. Если на сейсмической трассе зарегистрирована волновая картина, которая имеет узкополосный (резонансный) спектр и соответственно длительную форму импульсов, то возникает вопрос: как расширить этот спектр или уменьшить длительность импульсов? В спектре сейсмической трассы, в рамках динамического диапазона, присутствуют не только преобладающие частоты, но также высокие и низкие гармоники, которые значительно слабее преобладающих частот. Если к этой трассе применить фильтр режекторного типа, то можно ослабить резонансные частоты и спектр сейсмической трассы соответственно расширится, а импульс сожмется. Таким образом, произойдет повышение разрешенности записи. Конечно, расширение спектра происходит фактически за счет относительного ослабления преобладающих частот и общего снижения энергии. Подобную операцию называют деконволюцией — обратной фильтрацией, так как частотная характеристика режекторного фильтра имеет обратную форму по сравнению с обычным полосовым фильтром.

В отсутствие помех частотная характеристика идеального обратного фильтра простая:

$$H(\omega) = 1/S(\omega),$$

где  $S(\omega)$  — амплитудный спектр полезных волн. В зависимости от динамического диапазона в идеальном случае можно добиться расширения спектра записи и повысить разрешенность волн. Это идеализированное представление обратного фильтра и на практике такой фильтр не используется. Возможности обратной фильтрации ограничиваются существованием помех и применяются только оптимальные обратные фильтры с характеристиками вида

$$H(\omega) = S^*(\omega)/((S(\omega))^2 + a^2 B(\omega)),$$

где  $S^*(\omega)$  — комплексно-сопряженный спектр полезных волн, а

$B(\omega)$  — спектр помех. Практически возможно расширение спектра полезных волн только в полосе частот, где они по интенсивности превышают помехи, выход за пределы этой полосы при повышении разрешенности записи приводит к резкому увеличению интенсивности помех и приходится выбирать между разрешенностью записи и соотношением сигнал/помеха. Поэтому чаще используют корректирующую обратную фильтрацию, ограничивая спектр выходного сигнала определенной полосой частот, т. е. приводя спектр результирующего сигнала к заданному спектру:

$$H(\omega) = S^*(\omega)S_a(\omega)/((S(\omega))^2 + a^2B(\omega)),$$

где  $S_a(\omega)$  — заданный спектр сигнала.

Существует большое количество алгоритмов для выполнения процедуры обратной фильтрации. Если операция дековолюции выполняется относительно спектра полезных волн, она повышает их разрешенность. В том случае, когда волны-помехи имеют резонансные спектры, применение дековолюции позволяет уменьшить их интенсивность, например, ослабить промышленные гармонические и квазигармонические наводки. Решение последней задачи особенно важно при сейсмических работах на море и учете явления реверберации волн [10, 36, 39].

В МОВ амплитуды отраженных волн на волновом изображении пересчитываются в изменение акустической жесткости в геологической среде, используя известную зависимость коэффициента отражения (амплитуды) от перепада акустической жесткости на отражающей границе. Подобная процедура возможно и в МПВ, хотя примеров выполнения этой процедуры пока мы не имеем, ее применение в МПВ в будущем вполне возможно.

Время распространения преломленной волны определяется прохождением ее в покрывающей среде и преломляющем пласте, а амплитуда зависит также от коэффициентов прохождения в точках входа в преломляющий пласт и выхода из него. По сравнению с МОВ ситуация значительно усложняется.

Для анализа динамики головной волны используем ее спектральное представление в сопряженных точках [12, 29]. Обозначим спектр преломленной волны при возбуждении в точке  $Q$  и регистрации в точке  $X_1$  (см. рис. 2.1) через

$$S_{QO X_1}(\omega) = S_Q(\omega)H_{QO}(\omega)H_{OX_1}(\omega)H_{X_1}(\omega),$$

где  $S_Q(\omega)$  — спектр сигнала в источнике;  $H_{QO}(\omega)$  и  $H_{OX_1}(\omega)$  — частотные характеристики среды при распространении преломленной волны на отрезках пути  $QO$  и  $OX_1$  соответственно (включая и коэффициенты преломления);  $H_{X_1}(\omega)$  — частотная характеристика приемника. Аналогичным образом определим спектр волны при возбуждении в источнике  $P$  и регистрации в точке  $X_2$  через  $S_{POX_2}(\omega)$ . Примем для простоты одинаковыми спектры волн в источниках и частотные характеристики приемников, в результате будут одинаковыми и спектры волн на взаимных записях:

$$S_{QOP}(\omega) = S_{POQ}(\omega) = S_Q(\omega)H_{QO}(\omega)H_{OP}(\omega)H_P(\omega) = \\ = S_P(\omega)H_{PO}(\omega)H_{OQ}(\omega)H_Q(\omega).$$

В таком случае спектр преломленной волны при возбуждении в точке  $X_2$  и регистрации в точке  $X_1$  можно определить через спектры сейсмических записей в сопряженных и взаимных точках следующим образом:

$$S_{X_2OX_1}(\omega) = S_{QOX_1}(\omega)S_{POX_2}(\omega)/S_{QOP}(\omega).$$

Для перехода к амплитудам волн необходимо применить обратное Фурье-преобразование полученного спектра. Последнюю формулу можно использовать для учета изменения амплитуд преломленных волн при суммировании записей различных удалений источник-приемник.

Как уже отмечалось, амплитуды динамического разреза, полученного в результате миграции преломленных волн, зависят от коэффициентов прохождения в точках входа волн (с осреднением коэффициентов прохождения в точках выхода) или от коэффициентов прохождения в точках выхода волн (с осреднением коэффициентов прохождения в точках входа волн). Влияние покрывающей среды и преломляющей границы на амплитуды преломленных волн можно учесть, используя характеристики взаимных записей [12, 29], или осреднить за счет многократных наблюдений. Поэтому амплитуды на волновом изображении, полученном в результате миграции исходных записей, обусловлены изменением упругих свойств на преломляющих границах.

Коэффициенты прохождения в точках входа в преломляющий пласт и выхода из него определяются следующими выражениями

(см. гл. 1):

$$K_{\downarrow} = K_{\downarrow 0} + \left( \frac{V_2 - V_1}{V_1 + V_2} \right) \operatorname{tg}^2 i -$$

для точки входа в преломляющий пласт,

$$K_{\uparrow} = K_{\uparrow 0} + \left( \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} \right) \operatorname{tg}^2 i -$$

для точки выхода из преломляющего пласта,

где  $K_{\downarrow 0}$  и  $K_{\uparrow 0}$  — коэффициенты прохождения по нормали к границе в точках входа в преломляющий пласт и выхода из него соответственно;  $V_2$  — скорость в преломляющем пласте;  $V_1$  — скорость в покрывающей среде.

Так как углы входа в пласт и выхода из него меняются мало, амплитуды динамического разреза пропорциональны коэффициентам прохождения

При отнесении амплитуды преломленной волны к точке входа в преломляющий пласт и осреднении влияния на амплитуду точек выхода волны из пласта изменение амплитуды будет определяться коэффициентом прохождения в точке входа. В обратном случае при осреднении влияния точек входа волны в преломляющий пласт изменение амплитуды будет обусловлено коэффициентами прохождения в точках выхода волны из преломляющего пласта.

В процессе суммирования разрезов по точкам входа в преломляющий пласт и выхода из него изменение амплитуды преломляющей границы будет обусловлено произведением коэффициентов прохождения преломленной волны по нормали к границе в точках входа в преломляющий пласт и выхода из него.

## 7.4. ПРАКТИЧЕСКИЙ ГРАФ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ МПВ

Возможности обработки материалов МПВ полностью зависят от используемой системы наблюдений и ее параметров. Максимальный граф обработки может быть применен только к материалам многократных наблюдений с использованием кинематики и динамики преломленных волн на основе миграции записей. Он включает в себя определение скоростей распространения преломленных

волн в преломляющем пласте в зависимости от вертикального времени до преломляющих границ, построение преломляющих границ (учет сейсмического сноса преломленных волн, при этом происходит ослабление помех), повышение разрешенности записей и расчет акустической жесткости. Возможности обработки записей преломленных волн однократных наблюдений резко ограничены, в частности ограничены возможности наиболее важной операции выделения полезных волн.

В относительно простых геологических условиях: плоские границы и головные волны обработку также можно упростить, используя получение временных разрезов ОТП и ОТВ (без учета сейсмического сноса) с последующей их миграцией. Для построения временных разрезов не требуется знание граничных скоростей, а только кажущихся скоростей преломленных волн на сейсмограммах ОТП и ОТВ. Такой подход аналогичен получению временного разреза ОГТ в МОВ. Значения граничных скоростей необходимы для последующей миграции временных разрезов. Усложнение рельефа границ (и проникание волн) требует применения графа обработки на основе миграции исходных записей. В случае криволинейных границ упрощенный подход приводит к потере информации об упругих свойствах изучаемой среды и искажению получаемых результатов.

Между максимальным и минимальным возможны различные варианты графа обработки.

Основное отличие обработки МПВ от МОВ (в рамках рассматриваемого подхода) заключается в изучении скоростей. В МПВ определяются граничные (пластовые) скорости в среде (по профилю или площади) в зависимости от вертикального времени или  $t_0$  преломленных волн, что значительно усложняет технологию определения скоростей по сравнению с МОВ. Все остальные операции аналогичны МОВ, но с учетом схемы распространения преломленных волн.

Повышение разрешенности записей — многократная операция и может применяться как к исходным записям, так и к разрезам.

Основная операция ослабления помех происходит в процессе миграции записей многократных наблюдений, но предварительно могут ослабляться некоторые помехи с помощью одноканальной и многоканальной фильтрации исходных записей.

В результате обработки материалов МПВ получают значения граничных скоростей и динамический разрез, амплитуды которого

пропорциональны изменению упругих свойств на преломляющих границах. Графики граничных скоростей можно приводить в виде скоростных колонок над разрезом, аналогично тому, как в МОВ приводятся скоростные колонки.

Расчет акустического разреза в МПВ пока не выполняется, но препятствий к его получению нет. По преломленным волнам можно определить более низкочастотную составляющую изменения акустической жесткости, чем МОВ.

Выбор графа обработки зависит также от рельефа преломляющих границ и скоростной модели изучаемой геологической среды. Скоростная модель изучаемой среды определяет точность расчета кинематики волн в процессе миграции или построения временных разрезов. В сложных неоднородных геологических средах, когда скорости резко меняются по глубине и площади исследований, необходимо использовать пластовую модель скоростей в покрывающей среде, для простых сред достаточно применять значения средних или эффективных скоростей.

Автоматизация процесса обработки сейсмических записей МПВ и переход от определения природы и корреляции преломленных волн на исходных записях к корреляции и определению природы преломляющих границ на динамических разрезах упрощает и ускоряет обработку, делает ее более объективной. В сейсморазведке МОВ подобный переход произошел в конце 60-х годов прошлого века. Результаты обработки используются для прогнозирования как структурного характера (изучения пликативных и дизъюнктивных дислокаций), так и вещественного состава геологического разреза. Кроме того, упрощается сопоставление и совместное использование результатов МОВ и МПВ в концепции многоволновой сейсморазведки геологических сред.

Кинематическая обработка выполняется также по общей схеме, при этом динамика волн используется только при считывании времен их прихода, последующие операции осуществляются уже по годографам волн или полям времен: определение граничных скоростей и построение преломляющих границ. Это наиболее популярный граф кинематической обработки преломленных волн, который широко используется при изучении ВЧР, фундамента и решении других задач.

В процессе интерпретации выполняются различные преобразования результатов обработки, но они направлены в основном на разделение полученной информации, не изменяя ее объема. К таким

преобразованиям относятся, например, преобразования Гильберта, спектральные преобразования и т. п.

Ввиду различия физических особенностей образования и распространения преломленных и отраженных волн их совместная обработка не проводится. Материалы этих методов обрабатываются раздельно даже в случае их комбинированной постановки на одной площадке. При комплексировании МОВ и МПВ обязательно последующее сопоставление результатов обработки материалов обоих методов и совместная их интерпретация.

## Глава 8

# ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ МПВ

Геологическая интерпретация — процесс прогнозирования геологического разреза изучаемой среды по ее упругим свойствам. Она основана на связи упругих и геологических свойств. В результате интерпретации получают прогнозный геологический разрез и оценивают возможность существования месторождений полезных ископаемых, в частности залежей нефти и газа.

По своему определению геологическая интерпретация зависит не только от результатов сейсмических работ, но и от априорных сведений о геологическом строении изучаемой территории, поэтому результаты интерпретации могут пересматриваться каждый раз с получением новых геологических данных, например при бурении дополнительных скважин.

Следует различать обработку сейсмических данных и геологическую интерпретацию: в результате обработки получают разрез упругих свойств, а в процессе интерпретации по нему прогнозируют геологический разрез. Иногда обработку называют геофизической, или предварительной интерпретацией, а собственно геологическую интерпретацию — окончательной интерпретацией.

### 8.1. ТРЕБОВАНИЯ К ИСХОДНЫМ МАТЕРИАЛАМ ДЛЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Окончательным результатом обработки сейсмических материалов любого метода является распределение упругих (акустических) свойств изучаемой геологической среды с некоторым шагом по  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  (акустическая «фотография» геологической среды), он и

подлежит геологической интерпретации. Акустический разрез содержит информацию о распределении скоростей распространения продольных ( $V_p$ ) и/или поперечных ( $V_s$ ) волн и об изменении упругих параметров, в частности, акустической жесткости — произведения плотности на скорость.

При любой обработке ее результатом является разрез упругих свойств, но его детальность и представительность информации может быть различной.

В частных случаях при интерпретации могут использоваться не только окончательные, но и промежуточные результаты обработки. Так, в МПВ, кроме акустического изображения, может использоваться волновое изображение геологической среды — сейсмический разрез без пересчета амплитуд в изменение акустической жесткости, амплитуды которого пропорциональны изменению упругих свойств на преломляющих границах, т. е. с учетом сейсмического сноса. Также могут использоваться динамические разрезы ОТП и ОТВ преломленных волн без учета сейсмического сноса, наконец, результаты кинематической обработки сейсмических записей МПВ или просто исходные сейсмограммы. В любом случае при интерпретации используются некоторые сейсмические данные, связанные с изменением упругих свойств, но в этом случае интерпретация усложняется по сравнению с использованием акустического разреза.

При интерпретации одной из основных операций является корреляция упругих свойств геологической среды по разрезу или площади исследований. Волновая картина всегда сложнее распределения упругих свойств, даже в случае горизонтально слоистой среды происходит интерференция волн и интерпретация волновой картины неоднозначна. При сложной конфигурации отражающих и преломляющих границ (узкие синклинали, антиклинали и разрывные нарушения) волновая картина настолько усложняется, что корреляция становится слишком неоднозначной: появляются петли в волновой картине, присутствуют дифрагированные волны и т. п. Интерпретацию волновой картины (например, исходных сейсмограмм или сейсмограмм с редукцией) можно сравнить с попыткой определения объекта по голограмме в оптической голографии.

По работам МПВ окончательным результатом (как и в МОВ) должен быть детальный акустический разрез изучаемой геологической среды: граничные скорости и изменение акустических параметров в среде. Графики граничных скоростей можно помещать в

виде скоростных колонок над разрезом, аналогично тому, как приводятся скоростные кривые в МОВ.

Совместное рассмотрение граничных скоростей, определенных по материалам МПВ, и эффективных скоростей или скоростей ОСТ, найденных по МОВ, дает дополнительную информацию для прогнозирования изучаемой геологической среды.

Конечно, наиболее общим видом результатов сейсмических работ являются материалы площадных (3D) работ — куб акустических свойств изучаемой геологической среды. При его использовании получается наибольшая точность и надежность интерпретации. Использование акустических разрезов профильных наблюдений уже снижает точность и надежность геологических построений. Использование при интерпретации некоторых промежуточных результатов обработки также приводит к ее усложнению, снижению точности и надежности. Часто при интерпретации используют не акустическое изображение, а волновое изображение геологической среды. В этом случае прогноз структурных дислокаций остается простым, а прогнозирование вещественного состава пород становится сложнее по сравнению с акустическим разрезом. Переход на использование сейсмических результатов без учета сейсмического сноса имеет принципиальное значение, их можно использовать только в случае пологого или моноклиального залегания изучаемых пород.

В общем случае исходные данные для интерпретации должны отражать истинное распределение упругих свойств (без искажения полезных волн) при высоком соотношении сигнал/помеха и требуемой разрешенности записей по площади и глубине. Для получения таких результатов необходимо использовать оптимальную методику полевых работ и оптимальный граф обработки получаемых материалов.

Результаты кинематической обработки материалов МПВ обычно представляются в виде положения преломляющих границ и значений граничных скоростей в виде толсто-слоистой модели.

Разрешающая способность сейсмического метода по вертикали и горизонтали для конкретных значений скоростей распространения упругих волн определяется преобладающей частотой сейсмических волн. Длина волны определяет размер первой зоны Френеля (разрешенность по площади) и минимальную мощность пласта, выделяемого по сейсмическим данным (разрешенность по глубине).

## 8.2. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ СКОРОСТЯМИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН И АКУСТИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТЬЮ ПОРОД

Упругие свойства в геологических средах сложным образом изменяются по глубине и площади; литологические неоднородности могут иметь размеры от сантиметров до километров. Изменение акустических свойств по глубине можно представить в виде ступенчатых функций различной амплитуды. В этом случае спектральный состав изменения упругих свойств по глубине геологического разреза также аналогичен спектру ступенчатой функции в широком диапазоне частот.

В реальных условиях изменение упругих свойств по глубине и площади исследований имеет произвольный характер: при общем нарастании значений упругих свойств с глубиной имеются локальные изменения для отдельных литологических разностей.

По временам распространения упругих волн или по форме годографов определяются скорости их распространения. В методе преломленных волн определяется распределение граничных (пластовых) скоростей по глубине разреза; их можно использовать для геологической интерпретации и пересчитать в средние или эффективные скорости. Поэтому по временам прихода волн можно изучить только низкочастотную составляющую изменения упругих свойств или определить толстослоистую модель скоростной среды.

С другой стороны, интенсивность и форма сейсмических волн динамического разреза позволяют определить коэффициенты преломления, которые, в свою очередь, связаны с изменением упругих свойств (акустической жесткости) на преломляющих границах. Изучаемый диапазон изменения акустической жесткости обусловлен полосой частот или разрешенностью сейсмических записей. Таким образом, по временам распространения волн (кинематике) и их амплитудам (динамике) определяются различные составляющие изменения упругих свойств геологического разреза. Методика работ и обработка материалов должны обеспечить изучение упругих свойств, найденных по кинематике и динамике волн, так, чтобы они вместе перекрывали большую часть информативного диапазона изменений упругих свойств изучаемого геологического разреза. Для прогноза геологического разреза и месторождений полезных ископаемых наибольший интерес представляют средне- и высокочастотная составляющие упругих свойств, найденные по амплиту-

дам волн, они характеризуют детали изменения упругих свойств.

Конечно, для геологической интерпретации желательны определять абсолютные значения упругих свойств, но не меньшее значение имеют и их относительные изменения: в частности, перепады на акустических границах, а также вариации упругих свойств по площади исследований.

### 8.3. СВЯЗЬ УПРУГИХ (АКУСТИЧЕСКИХ) И ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

В основе разделения геологического разреза по свойствам лежит слой, ограниченный поверхностями, который обычно имеет одни и те же геологические и физические свойства (состав, текстуру и т. п.) и отличается по свойствам от выше и ниже залегающих пород. Образование слоистости геологических отложений обусловлено изменением условий их образования и источников сноса.

Причин изменения условий накопления осадков и формирования слоистости отложений много и основная из них — изменение уровня моря в процессе развития Земли, которое происходит в виде циклов различной длительности. На общей кривой изменения уровня моря в течение геологического времени можно выделить по величине и времени повторения циклы различного порядка — от глобальных до локальных [6, 24]. При повышении уровня моря происходит отложение более тонкозернистых глубоководных осадков, например глин и, наоборот, при понижении уровня моря — грубозернистых пород. Последующими тектоническими движениями первичное залегание пластов нарушается, они подвергаются метаморфическому изменению и внедрению изверженных пород. За счет совместного действия различных геологических процессов создано многообразие строения геологических сред, которое наблюдается в природе.

Геологические разрезы различных площадей сложены породами с различными геологическими свойствами: составом, пористостью, проницаемостью, цветом, и т. п. Вместе с тем результаты сейсморазведочных работ определяют упругие свойства этих пород: скорость распространения волн и акустическую жесткость. Так как плотность пород изменяется в узких пределах  $1,6-3,5 \text{ г/см}^3$ , то основные изменения обусловлены скоростями распространения волн, которые изменяются в земной коре, включая и осадочные отложе-

ния, от 1,5 до 8 км/с для продольных и от 1,0 до 5–6 км/с для поперечных волн. Значения акустических свойств равномерно распределены по составу и условиям образования отложений.

Хотя такие физические свойства горных пород, как электрическое сопротивление или магнитная восприимчивость, изменяются в очень широких пределах, но эти свойства распределены неравномерно по породам различного состава, в частности, в осадочных отложениях изменения их малы, например, магнитная восприимчивость резко увеличивается для изверженных пород основного состава и мало различается для осадочных отложений. Поэтому магниторазведка эффективна для поиска магнитных руд (можно сказать, для «прямых» поисков магнетитов) и гораздо менее эффективна в осадочных бассейнах. Диапазон изменения упругих свойств невелик, но их значения равномерно распределены по отложениям и породам, поэтому они весьма чувствительны к изменению литологического состава отложений и заполнению пористых пород. В сейсморазведке к «прямым» поискам относят прогнозирование газовых залежей по характерному изменению амплитуд над коллектором, заполненным газом или водой: существование так называемых «ярких» или «тусклых» пятен [24]. Реже подобный эффект проявляется над нефтяной залежью, где он в большей степени обусловлен не различием свойств заполнителя (нефть или вода), а изменением самого коллектора под действием нефти.

#### 8.4. ОБЩАЯ СХЕМА ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Полная информация о геологических свойствах изучаемой среды содержится в акустическом разрезе, но иногда существует более тесная связь между отдельными параметрами акустического разреза и некоторыми геологическими свойствами. С позиций теории информации это означает, что из большого объема информации о геологических свойствах, содержащейся в акустическом разрезе (или в волновом изображении) бывает полезным выделить некоторую ее часть, связанную с конкретными геологическими свойствами. Для такого разделения используют параметры спектрального представления с помощью Фурье-анализа сейсмических результатов или преобразования Гильберта. При использовании Фурье-анализа результаты могут быть искажены длиной интервала ана-

лиза, особенно при малых его значениях, поэтому более обосновано использование преобразования Гильберта, результаты которого не зависят от длины интервала преобразования и содержат мгновенные значения различных параметров: амплитуды, фазы, частоты и других.

Связь между некоторыми сейсмическими параметрами и геологическими свойствами приведена в табл. 8.1.

Таблица 8.1. Связь между сейсмическими признаками и геологическими свойствами

Сейсмические признаки	Геологические свойства
Существование и число преломляющих границ (преломленных волн)	Степень неоднородности разреза (существование слоистости отложений, поверхностей несогласия, фундамента и др.)
Конфигурация преломляющих границ (форма залегания и взаимоотношение границ)	Пликативные и дизъюнктивные дислокации, соляные купола и др.
Характер корреляции сейсмических границ	Выдержанность геологических поверхностей
Значения граничных скоростей $V_p$ и $V_s$	Оценка литологического свойства толстых слоев (геологических толщ) и пород
Изменение акустической жесткости $\Delta\rho V_p$ и $\Delta\rho V_s$ (амплитуды отражений)	Литологические особенности отложений и состав пород
Мгновенные значения $\rho V$ (или параметров волн): амплитуды; фазы; частоты; производная от мгновенной амплитуды по профилю	Состав пород и условия осадконакопления: смена условий осадконакопления; степень корреляции слоев; характер слоистости разреза; разрывные нарушения и резкие изменения геологических свойств

По результатам сейсмических работ прогнозируются различные особенности геологического строения района: глубина залегания отложений, пликативные и дизъюнктивные дислокации, условия осадконакопления (перерывы, несогласия, врезы, рифы, бары, соляные купола), состав пород (песчанистость, глинистость, пористость, проницаемость), заполнение пор (нефтью, газом, водой).

Изучение последовательности напластования отложений, поверхностей несогласия, разделение на комплексы и определение состава пород относится к стратиграфии — разделу геологии. Все эти особенности геологического разреза могут прогнозироваться и по

акустическим разрезам, в таком случае говорят о сейсмостратиграфии, сейсмофациях (сейсмостратиграфические комплексы и т. п.).

Важной особенностью сейсморазведки (МОВ, МПВ) являются возможность изучения некоторого элементарного объема акустической среды, связанного с распространением полезных волн, и их полная независимость от свойств остальной среды. Поля, регистрируемые другими геофизическими методами, имеют интегральный характер, например, поле силы тяжести, интенсивность магнитного поля и другие, обусловлены всем объемом окружающей породы.

## 8.5. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

При геологической интерпретации используют ряд технологических приемов.

1. В случае объемного представления результатов сейсмических работ при интерпретации получают вертикальные разрезы, горизонтальные срезы и любые сечения куба акустических свойств. Особенно широко используются горизонтальные срезы с сечением по времени или глубине, равным шагу дискретизации — они дают детальное представление об изменении акустических свойств в объеме среды. Кроме того, рассматриваются структурные схемы по отдельным горизонтам с изображением на плоскости или в трехмерном пространстве.

2. Для подчеркивания особенностей акустического разреза при прогнозировании различных геологических структур часто прибегают к искажению вертикального и горизонтального масштабов; обычно горизонтальный масштаб резко уменьшают по сравнению с вертикальным. Этот прием особенно широко используется при геологической интерпретации с решением задач региональной геологии: при выделении стратиграфических комплексов, поверхностей несогласия и перерывов в осадконакоплении.

3. В МОВ широко используется зависимость коэффициентов отражения с удалением источник-приемник (с увеличением угла падения) от изменения акустической жесткости на границах пластов для прогнозирования коллекторских свойств пород. Коэффициенты преломления зависят от перепада акустической жесткости и угла падения волны на границу. В МПВ углы подхода волн к преломляющей границе изменяются мало, поэтому нельзя использо-

вать зависимость коэффициентов преломления с изменением угла преломления.

4. При интерпретации широко используется решение прямых задач с построением синтетических временных разрезов для прогнозирования деталей геологического разреза: наличие тонких слоев, выклинивание пластов, разрывные нарушения, рифы и др.

5. Для стратиграфической оценки отложений изучаемого региона полезной оказывается палеотектоническая реконструкция разрезов — последовательное (сверху вниз) выравнивание некоторых поверхностей разреза и построение карт равных мощностей (изопахит) некоторых пачек.

6. Для оценки изменения мощности отдельных пластов и толщ строятся схемы изопахит.

7. Снятие регионального структурного фона или определение угла наклона границ.

Иногда на сейсмические разрезы смотрят как на геологические, но это только акустические «фотографии» геологических разрезов или некоторых производных от акустических свойств; прогнозирование по ним геологических разрезов всегда носит вероятностный характер.

Неоднозначность геологической интерпретации определяется рядом причин: сложностью акустического строения реальных сред по сравнению с принятыми физическими моделями распространения волн, неоптимальностью используемой методики работ и обработки материалов. Кроме того, при геологическом истолковании существует неоднозначность в прогнозировании разреза по значениям скорости, характеру слоистости и т. п. Связь между скоростью, акустической жесткостью и составом пород неоднозначна: одни и те же породы в зависимости от глубины залегания меняют значения пористости, проницаемости и соответственно акустические свойства. Совершенно разным породам могут соответствовать одинаковые значения акустических параметров.

При выполнении геологической интерпретации результатов сейсмических работ необходимо знать физические основы сейсмического метода, особенности методики работ и обработки материалов, а также геологию изучаемого района. Интерпретатором может быть геолог, в достаточной мере знакомый с особенностями применения сейсмического метода, или геофизик, хорошо знающий особенности геологии района. На практике трудно оценить отдельно взятую эффективность геофизических работ, поскольку она .тес-

но связана с общим состоянием разведки площади в данное время.

Существует множество примеров успешного прогноза различных геологических явлений и месторождений полезных ископаемых по результатам сейсмических работ МПВ в кинематическом представлении полученных результатов [1, 11, 14, 16], использование же динамических разрезов для интерпретации пока ограничено.

В МПВ всегда ниже разрешенность записей и соответственно детальность изучения геологического разреза, чем в МОВ, в реальных геологических средах гораздо меньше преломляющих границ, чем отражающих.

Геологическая интерпретация временных динамических разрезов МПВ может проводиться совместно с разрезом МОВ (ОГТ). Так как различаются физические основы методов, они дают дополняющие друг друга сведения о распределении упругих свойств в изучаемой геологической среде. В частности, по кинематике волн в МПВ определяются пластовые (граничные) скорости, а в МОВ — толстослоистая модель скоростей в покрывающей среде. По амплитудам волн в МОВ и МПВ изучается изменение акустической жесткости среды.

## Глава 9

### ПРИМЕНЕНИЕ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ МПВ

В настоящее время МПВ относительно мало используется как самостоятельный метод для решения различных геологических задач. Основные объемы работ выполняются для обслуживания МОВ: определение априорных статических поправок и скоростей распространения упругих волн, в частности, данные МПВ широко используют в томографической обработке при определении скоростной модели среды для глубинной миграции записей МОВ. Самостоятельное применение МПВ ограничено в основном изучением верхней части разреза при решении инженерных и экологических задач и земной коры. Даже такие специфические для МПВ объекты, как изучение поверхности фундамента и соляных куполов, решаются в настоящее время методом отраженных волн. Это обусловлено двумя основными причинами: жесткими требованиями МПВ к характеру изменения упругих свойств геологической среды (которые не всегда выполняются в реальных средах) и неоптимальной методикой работ, что на практике ограничивает возможности динамической обработки материалов, получаемые результаты и соответственно использование их при геологической интерпретации.

Применение оптимальной методики работ и использование кинематических и динамических свойств преломленных волн в процессе обработки и представления результатов позволят расширить геологические возможности метода и повысят эффективность его использования. Результаты обработки могут быть использованы для изучения как структурных особенностей разреза, так и вещественного состава слагающих его пород.

## 9.1. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МПВ

Сейсмические работы методом преломленных волн могут применяться для решения различных геологических задач — от инженерных и экологических (на очень малых глубинах) — до изучения внутреннего строения Земли. Ниже дан краткий обзор геологических задач, при решении которых метод преломленных волн давно успешно применяется, и определены задачи, которые могут решаться по динамическим разрезам преломленных волн.

При строительстве промышленных зданий и сооружений необходимо знать прочностные (деформационные) свойства грунта. МПВ является одним из основных геофизических методов инженерной геологии при определении глубины залегания коренных пород (мощности зоны выветривания) и их «сохранности» — прочности. Начиная от дневной поверхности, с глубиной происходит нарастание скоростей распространения упругих волн в породах, часто в виде границ первого рода — со скачком скорости, поэтому образуются преломленные волны и по ним можно найти значения скоростей распространения продольных и поперечных волн. По значениям скоростей рассчитываются прочностные свойства пород, в частности, модуль всестороннего сжатия, необходимые для выбора глубины заложения и конструкции фундамента. Получение динамических разрезов преломленных волн позволит определять некоторые детали изменения упругих свойств преломляющего пласта по амплитудам волн.

В гидрогеологии сейсморазведка МПВ используется для определения уровня грунтовых вод, разделяющего сухие и обводненные породы; скорости последних заметно выше, что приводит к образованию преломленных волн.

Наибольшие объемы МПВ на суше в настоящее время приходятся на изучение ВЧР с целью вычисления априорных статических поправок для МОВ, некоторые считают это основной задачей МПВ. Для изучения ВЧР используется однократная встречная система наблюдений, обеспечивающая изучение ЗМС и ЗПС, и кинематическая обработка записей. В результате определяются мощность и скорости ЗМС, ЗПС и коренных пород, по этим данным рассчитываются статические поправки. При морских сейсмических работах, в отличие от наземных работ, для изучения глубины моря используются отраженные волны от его дна.

Основные геологические задачи сейсморазведки связаны с поисками месторождений нефти и газа в осадочных отложениях и здесь в настоящее время господствует МОВ, преломленные волны используются только для его обслуживания; однако есть ряд задач, которые можно решать и методом преломленных волн.

Среди этих задач — изучение рельефа поверхности известняков. В большинстве геологических разрезов известняки отличаются повышенной скоростью распространения упругих волн по сравнению с терригенными породами, поэтому их поверхность является преломляющей границей. С другой стороны, известняки — хороший коллектор и при благоприятных структурных условиях с ними связаны залежи углеводородов. Особый интерес представляют рифовые образования — локальные увеличения мощности известняков. Сейсморазведка МПВ использовалась и ранее при поисках залежей, связанных с известняками, в частности, крупных рифов. Получение динамических разрезов преломленных волн расширяет возможности метода в этом направлении.

Вторая геологическая задача для МПВ — изучение соляных куполов, с ними также связано образование месторождений нефти и газа, их поиски и изучение имеют большое значение в нефтяной геологии. Хотя МПВ был первым сейсмическим методом поиска соляных куполов, в последнее время эти задачи решаются только МОВ. Однако проблема изучения соляных куполов пока не решена. Для МПВ соляные купола являются классическим случаем проникания волны, и учет этого явления возможен только на основе миграции записей. По динамическим разрезам преломленных волн после миграции возможно повышение эффективности изучения поверхности соли, особенно положения бортов купола, которые могут контролировать залежи нефти и газа.

В осадочном разрезе присутствуют толщи с непрерывным отложением осадков — так называемые сейсмостратиграфические комплексы (ССК), которые ограничены поверхностями несогласия, перерыва и возможного размыва части отложений геологического разреза. В настоящее время поверхности несогласия между ССК выделяются только по данным МОВ. ССК различаются по скоростям распространения упругих волн и их поверхности могут быть также преломляющими границами. Динамические разрезы МПВ содержат дополнительные сведения об этих поверхностях, особенно в случаях видимого согласия в залегании отложений выше и ниже поверхности перерыва в накоплении осадков.

Наиболее типичная геологическая задача для МПВ — изучение глубины залегания и рельефа поверхности фундамента, которая почти всегда является преломляющей границей. Знание мощности осадочного покрова и рельефа поверхности фундамента необходимо по ряду причин, начиная от общей оценки перспектив осадочного разреза на нефть и газ, и поисков залежей в базальной толще, обусловленных блоками и рельефом фундамента, а иногда и выветрелой части самого фундамента. Сейчас положение фундамента определяется по выделению отраженных волн от пачки отложений, залегающих непосредственно на его поверхности, и результаты не всегда однозначны. В ее решении дальнейшее развитие МПВ может дать наибольший эффект, особенно в определении сложного рельефа поверхности и расчленения по составу пород фундамента за счет детального изучения граничных скоростей и использования динамики преломленных волн.

Остаются традиционными для МПВ задачи изучения эффузивных покровов внутри осадочной толщи, а также обнаружение интрузивных тел.

Значительные объемы сейсмических работ, в технологии ГСЗ, проводятся для изучения земной коры: ее строения и мощности (глубины залегания и рельефа поверхности Мохоровичича). Сейсмические работы ГСЗ проводятся на суше и на море по редкой сети опорных профилей. С самого начала применение ГСЗ было рассчитано на использование преломленных волн, хотя переход земная кора—мантия оказался сложным. Не всегда удается зарегистрировать преломленные волны от поверхности М, чаще регистрируются закритические отраженные волны.

В меньшем объеме проводятся региональные исследования на шельфе для оценки перспектив территорий на нефть и газ: определение мощности осадков, выделение сейсмостратиграфических комплексов, изучение особенностей тектонического строения.

В глубоководных частях акваторий выполняются отдельные геотраверсы или опорные профили ГСЗ для решения общих вопросов тектоники Земли.

Использование длинных сейсмических кос в МОВ при работах на суше и на море позволяет регистрировать преломленные волны и получать по ним динамические разрезы до глубин, представляющих геологический интерес. В настоящее время наиболее оптимальные по кратности системы наблюдений преломленных волн получаются именно при работах МОВ с длинными косами, но и

они имеют существенный недостаток: для МПВ — все-таки относительно малы удаления источник-приемник и соответственно мала глубина освещения разреза. Обработка с получением динамических разрезов позволяет по преломленным волнам более детально изучить упругие свойства пород (по сравнению с однократными наблюдениями), в частности, определить пластовые (границные) скорости распространения волн и изменение акустической жесткости на преломляющих границах.

МПВ и МОВ дают дополняющие друг друга сведения о распределении упругих свойств в изучаемой геологической среде ввиду различия физических основ. Кроме того, повышается эффективность при сопоставлении и совместной интерпретации результатов этих методов.

Ниже более подробно рассмотрено решение некоторых геологических задач с помощью сейсморазведки методом преломленных волн и приведены примеры динамической обработки сейсмических записей преломленных волн, полученных попутно при работах МОВ на мелководье Каспийского и Азовского морей, а также при работах ГСЗ на опорных профилях в Баренцевом, Карском и Средиземном морях.

## 9.2. СЕЙСМИЧЕСКИЕ РАБОТЫ В ТРАНЗИТНОЙ ЗОНЕ СУША–МОРЕ

Основные задачи и объемы морских сейсмических работ связаны с поисками месторождений нефти и газа на шельфе. Российский шельф занимает обширные акватории северных, восточных и южных морей. Технология работ на шельфе при глубинах моря более 15–20 м хорошо отлажена; сложнее обстоит дело при проведении работ в переходной (транзитной) зоне суша–море.

Под транзитной зоной понимается совокупность участков земной поверхности, существующих на стыке суши и моря, и сочетающих в себе свойства этих двух сред. К таким участкам относятся мелкое море (до 15–20 м), приливные зоны, береговые топи, заливные участки суши, отмели, дельты рек, мелководные рифы и другие. Транзитные зоны существуют в большинстве прибрежных районов, во всех климатических зонах — от тропиков до полярных областей. Многие изученные на суше месторождения нефти и газа продолжают под акватории и возможные объемы работ в транзитных зонах велики.

Освоение транзитных зон является актуальной задачей, поскольку многие из известных районов, перспективных на нефть и газ, имеют продолжение или находятся целиком в транзитных зонах: мелководных областях шельфа, болотах, дельтах рек. Согласно прогнозным оценкам ВНИГРИ, в мелководных областях российского Арктического шельфа содержится до 25% запасов нефти и газа. Особенно перспективны в этом плане Печорская и Хайпудырская губы, относящиеся к Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции, прибрежные участки Обской и Тазовской губы Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, а также российский сектор Каспийского моря.

Месторождения, находящиеся в транзитных зонах, более доступны, нежели чисто морские, для поисково-разведочного бурения и эксплуатации: не требуется также прокладка протяженных морских трубопроводов. Благодаря этому в транзитных зонах рентабельна разработка даже сравнительно мелких месторождений. В то же время проведение поисковых и разведочных работ этих районах по ряду технических и технологических проблем значительно труднее, чем в открытом море или на суше.

Транзитная зона, или мелководье, занимает значительные территории России, включая побережье северных морей, заливы, озера и прочее. Эти участки расположены в различных климатических зонах, но в большинстве случаев работы там лучше проводить в летний период, когда акватории открыты.

Проведение сейсмических работ на мелководье имеет свою специфику. В прибрежных частях многих северных морей зимние сейсмические работы часто затруднены из-за торосов. Иногда мелкие участки заливов и морей зимой промерзают на всю глубину и создают специфические помехи, также затрудняющие проведение сейсмических работ. Часть из них не замерзает и в зимний период, поэтому работы возможны только с использованием специальной сейсмической и транспортной техники. Малые глубины моря и наличие разного рода препятствий, таких, как переменчивые течения, осложняют или делают невозможным применение стандартных морских или наземных технологий. Изучение таких районов в настоящее время сдерживается недостатком специальных технических средств для проведения сейсморазведочных работ.

Донные косы в старт-стопном режиме могут имитировать обычную технологию работ МОВ-ОГТ с плавающей косой, но часто

неровности дна создают препятствия для выполнения подобных работ.

Использование специальной аппаратуры и техники при работах МОВ позволило зарегистрировать за счет больших удалений источник-приемник (до 10–12 км) кроме отраженных и преломленные волны. При обработке отраженных волн информация о преломленных волнах просто выбрасывается. С ростом максимальных удалений источник-приемник количество не используемой информации также увеличивается и доходит до половины от общего объема записей. Обработка с получением динамических разрезов по преломленным волнам представляет интерес, особенно при комплексировании с МОВ. Результаты обработки отраженных и преломленных волн являются исходными данными при геологической интерпретации результатов сейсмических работ.

### 9.2.1 Каспийское море

Обширный мелководный бассейн Северного Каспия занимает площадь 85 000 км<sup>2</sup>, причем более 70% этой площади характеризуется глубинами менее 5 м. Глубины в остальной части — не более 15–20 м. Глубины менее 3 м существуют и на расстояниях 50–60 км от береговой черты.

В качестве примера приведены результаты сейсмических работ на двух участках Каспийского моря: северо-западный участок (Калмыцкий сектор) и северо-восточный участок (Казахский сектор).

При работах МОВ на северо-западном участке Каспийского моря использовалась нестандартная система наблюдений: прием осуществлялся в интервале профиля 1680–12240 м через 60 м, а источники возбуждения в интервале 0–14 340 м параллельно с поперечным выносом от приемной линии на 60 м (рис. 9.1).

Максимальные удаления источник-приемник меняются по профилю: на флангах достигали 12 км, в средней части профиля около 3 км.

Для возбуждения упругих волн использовался групповой пневмоисточник Пульс-6 из семи камер разного объема от 0,3 до 3,5 л, общим объемом 10,3 л. Рабочее давление: 140 атм., глубина подвеса пушек 1,0–2,5 м в зависимости от глубины моря. В качестве

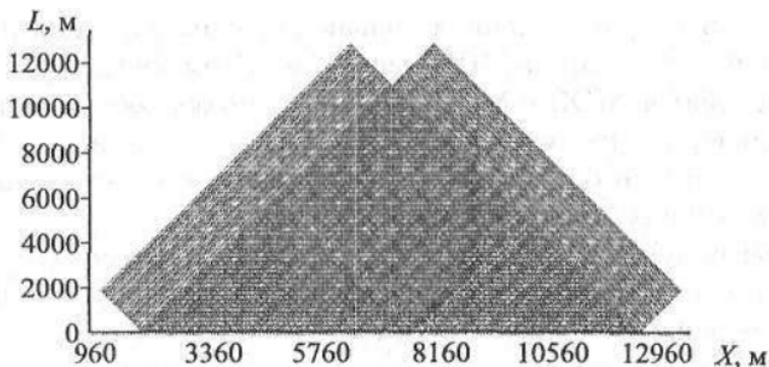


Рис. 9.1. Система наблюдений на мелководье Каспийского моря (на обобщенной плоскости).

приемных устройств применялись гидрофоны МР-24L3. Для регистрации сейсмической информации использовалась система BOX фирмы Fairfield Industries.

Технология работ МОВ по методике ОГТ на мелководье Каспийского моря предусматривала получение записей в широком диапазоне удалений источник-приемник, на которых регистрируются как отраженные, так и преломленные волны (рис. 9.2, а). Ближняя к источнику зона записи (до удалений равных глубине изучения разреза) используется для получения разреза МОВ (рис. 9.2, б), а

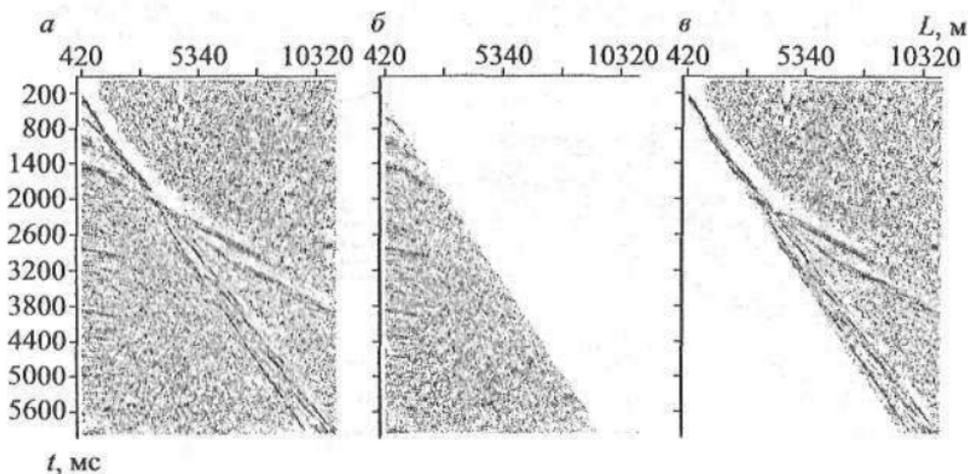


Рис. 9.2. Использование сейсмических записей для обработки отраженных и преломленных волн.

а — исходная сейсмическая запись; б — часть записи, используемая при обработке отраженных волн; в — то же, при обработке преломленных волн.

дальняя зона (на удалениях больше глубины изучения разреза) — для получения разреза МПВ (рис. 9.2, в). Хотя общая схема обработки материалов МОВ и МПВ одинакова, но обработка выполнялась отдельно, так как отраженные и преломленные волны образованы различными физическими явлениями и соответственно имеют разную кинематику и динамику.

При получении разреза МОВ (рис. 9.3, а) в качестве полезных используются только продольные однократно отраженные и дифрагированные волны, все прочие волны относятся к помехам, при получении разреза МПВ (рис. 9.3, б) используются преломленные (с проницанием) и преломленно-дифрагированные волны, все остальные также относятся к помехам. Соответственно различаются и изучаемые упругие параметры среды. По разрезу МОВ определяется положение отражающих границ и скорости в покрывающей среде, а амплитуды волн соответствуют коэффициентам отражения и по ним можно определить изменение акустической жесткости в среде. В МПВ определяется положение преломляющих границ и скорости в преломляющем пласте (граничные скорости) в зависимости от вертикального времени до преломляющих границ.

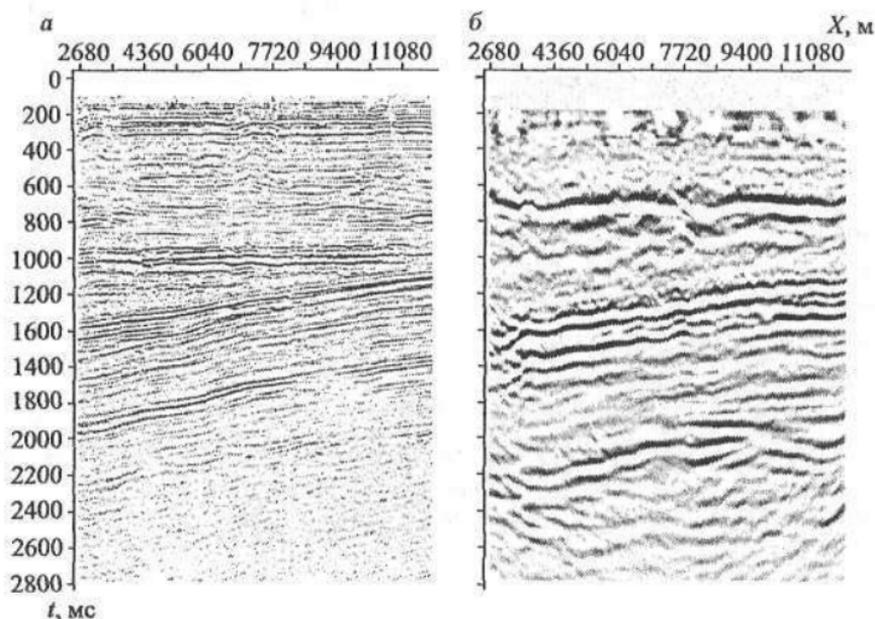


Рис. 9.3. Временные сейсмические разрезы по отраженным (а) и преломленным (б) волнам.

Амплитуды волн на преломляющих границах пропорциональны коэффициентам преломления («головления») и по ним также можно определить изменение акустической жесткости в среде (см. гл. 7). Разрез МОВ получен с обработкой по стандартному графу, обработка преломленных волн выполнена на основе миграции сейсмических записей с перебором граничных скоростей (см. рис. 7.7) и построением всех преломляющих границ (от которых зарегистрированы преломленные волны).

На динамическом разрезе преломленных волн граница на времени около 2,2–2,3 с соответствует поверхности фундамента. Отмечается несовпадение поверхности фундамента по результатам МОВ и МПВ на больших пикетах. Неровная поверхность фундамента заполнена осадками, от которых не везде регистрируются отраженные волны. Так, в правой части разреза МПВ выделяется впадина фундамента, которая не очевидна по разрезу МОВ. Хотя после сопоставления с разрезом МПВ можно и по разрезу МОВ на этом участке предположить существование впадины в фундаменте.

Преломляющие границы в осадочной толще, вероятно, соответствуют поверхностям перерыва в осадконакоплении, в частности, на времени около 0,7 с и на временах 1,2–1,4 с.

Для сравнения приведены результаты кинематической обработки тех же материалов с использованием отраженных и преломленных волн (рис. 9.4).

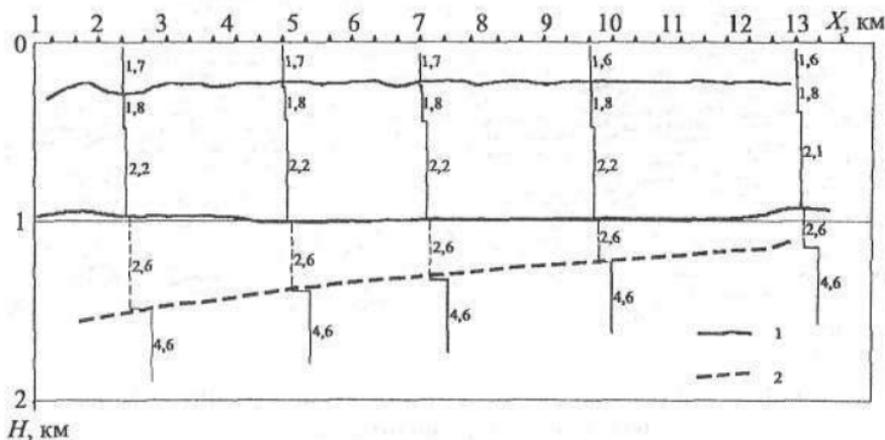


Рис. 9.4. Кинематический разрез по отраженным и преломленным волнам (значения скоростей в км/с).

1 — отражающие границы; 2 — преломляющие границы.

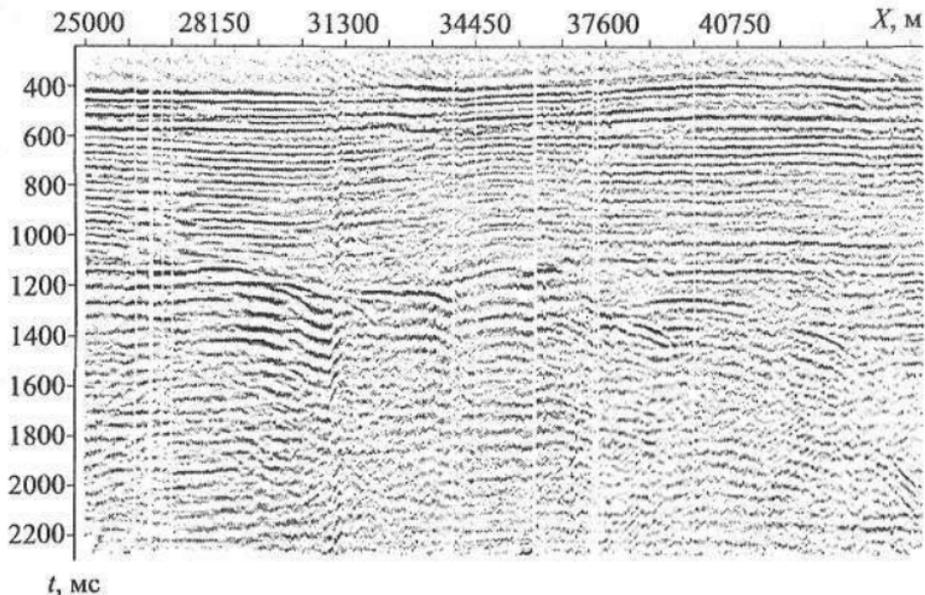


Рис. 9.5. Сейсмический разрез (суммирование по ОТВ) в вертикальном масштабе  $t_0$  преломленных волн.

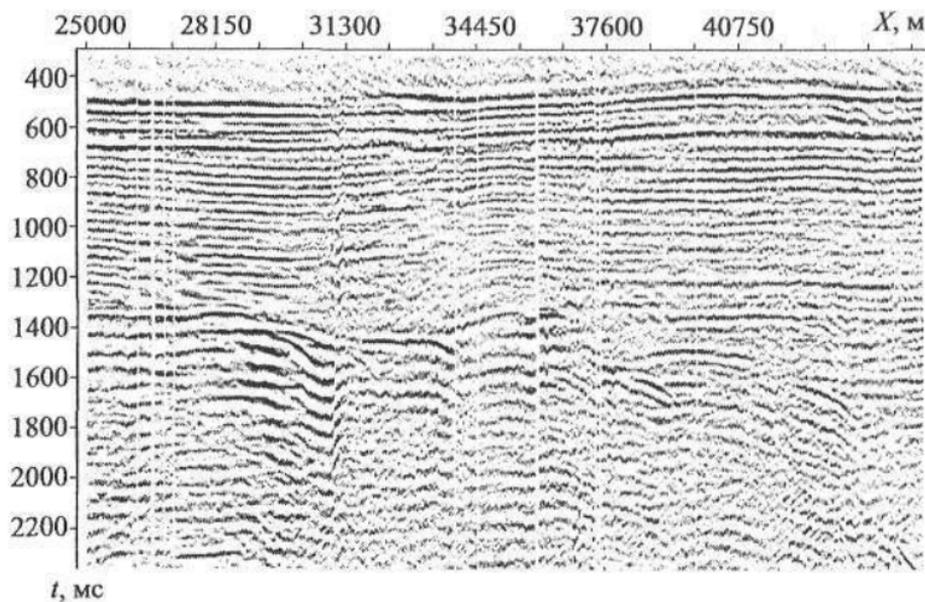


Рис. 9.6. Сейсмический разрез (суммирование по ОТВ) в вертикальном масштабе  $t_0$  отраженных волн.

При проведении сейсмических работ МОВ на северо-восточном участке Каспийского моря применялась фланговая система наблюдений с максимальным удалением источник-приемник до 6 км.

Для возбуждения упругих волн использовался групповой пневматический источник, сейсмическая информация также регистрировалась системой ВОХ фирмы Fairfield Industries. Система наблюдений фланговая с максимальным удалением источник-приемник 6 км.

Обработка выполнялась в приближенном варианте с получением суммарного разреза преломленных волн по ОТВ (рис. 9.5).

Времена сейсмического разреза ОТВ преломленных волн пересчитаны в масштабе  $t_0$  отраженных волн (рис. 9.6). В таком случае можно сопоставлять сейсмические разрезы МПВ и МОВ (рис. 9.7).

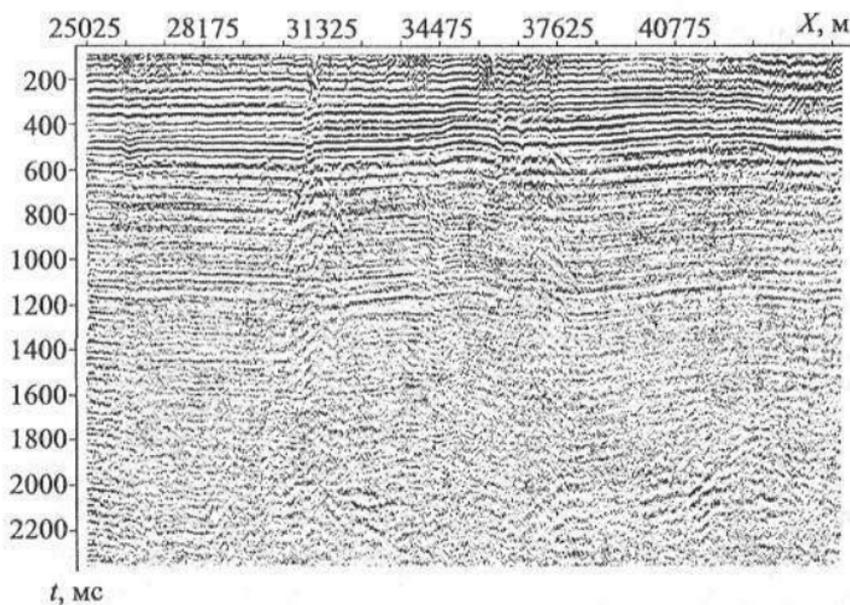


Рис. 9.7. Сейсмический разрез МОВ.

Обработка материалов МПВ и МОВ выполнена по минимальному графу, использовалась только фильтрация и изучение скоростей. Декноволуция и дополнительное ослабление помех, кроме суммирования сейсмограмм ОТВ в МПВ и ОГТ в МОВ, не применялось.

## 9.2.2. Азовское море

Методика, технология и техническое обеспечение работ в Азовском море аналогичны таковым при сейсмических исследованиях в Каспийском море, отличался только шаг между каналами приемного устройства и источниками: в Азовском море он равен 50 м (в Каспийском море — 60 м).

Сейсмический разрез преломленных волн построен в результате миграции исходных записей с шагом, равным шагу между пунктами приема, — это информационно-обеспеченный интервал для преломленных волн (рис. 9.8). Разрез МОВ приведен также по результатам миграции исходных записей отраженных волн. Времена на разрезе МПВ соответствуют двойным временам по вертикали до преломляющих границ и совпадают с временами на разрезе МОВ. Масштабы по горизонтали и по времени примерно одинаковы для обоих разрезов.

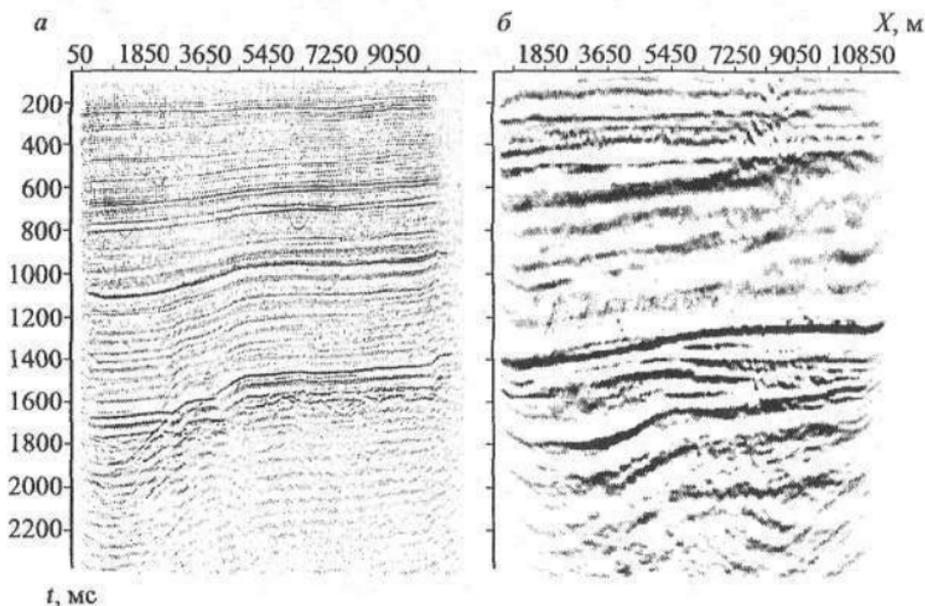


Рис. 9.8. Сейсмические разрезы в Азовском море по отраженным (а) и преломленным (б) волнам.

Преломленная волна от наиболее глубокой преломляющей границы на времени около 2,2 с не выходит в первые вступления (из-за ограниченных удалений источник-приемник) и построена только по фрагментам преломленной волны во вторых вступлениях.

В первые вступления выходит преломленная волна от фундамента и она дает хорошую преломляющую границу на времени около 1,8 с. Изучено небольшое изменение граничных скоростей по фундаменту от 5800 м/с в начале и до 5700 м/с в конце профиля (на разрезе не показано).

Более мелкие преломляющие границы, вероятно, также соответствуют поверхностям несогласия и перерыва в осадконакоплении между сейсмостратиграфическими комплексами (ССК). На разрезе МОВ заметны признаки существования таких поверхностей, по ним можно предполагать скачки скоростей и образование преломленных волн.

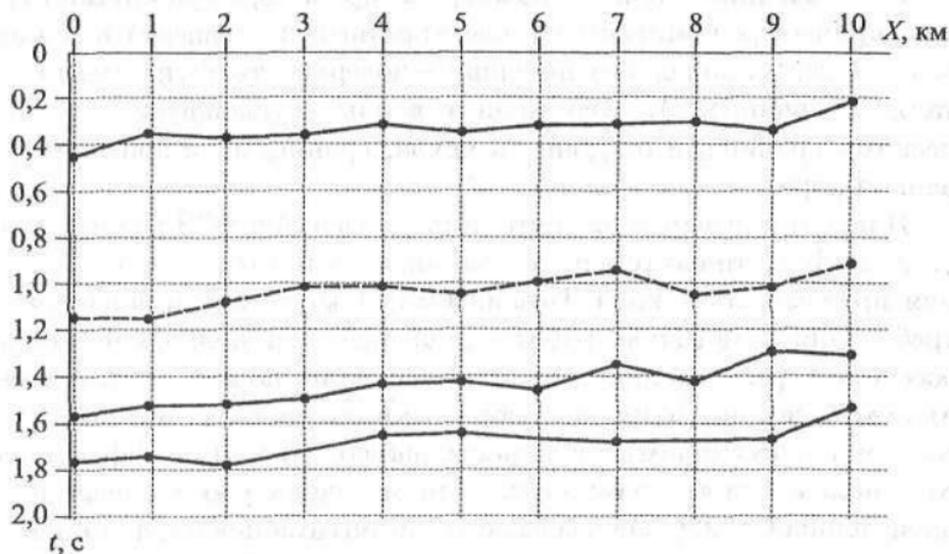


Рис. 9.9. Кинематический разрез в Азовском море по отраженным и преломленным волнам.

Для сравнения также приведен кинематический разрез преломленных волн (рис. 9.9).

### 9.3. ИЗУЧЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ОПОРНЫХ ПРОФИЛЯХ

При проведении региональных работ для изучения земной коры на всю ее мощность широко применяются глубинные сейсмические исследования или глубинные сейсмические зондирования (ГСЗ). Эти исследования исторически ориентировались на изучение зем-

ной коры и верхней мантии с использованием преломленных (головных) волн, и применяемая методика работ была рассчитана на их однократное прослеживание.

Реальная регистрируемая волновая картина значительно сложнее: кроме преломленных волн регистрируются также закритические отраженные волны, а зачастую обменные и поперечные волны. При обработке материалов ГСЗ используется вся зарегистрированная волновая картина: кроме продольных преломленных волн отраженные (закритические отраженные) волны, а при использовании трехкомпонентных регистраторов на суше или на дне моря — еще обменные и поперечные волны.

Преломленные волны связаны, как правило, с границами стратиграфических комплексов (поверхностями несогласия) в осадочном чехле, включая его подошву — поверхность фундамента, — а также с границей  $M$ ; отраженные волны обусловлены литологическими границами осадочного чехла, границами в консолидированной коре и также границей  $M$ .

В целом применяемая система наблюдений в ГСЗ не оптимальна для эффективного использования, как для отраженных, так и для преломленных волн. Независимо от масштаба и задач работ требования к методике работ одинаковы, она должна не только обеспечить регистрацию всех полезных волн, но и создать условия для их выделения в процессе обработки получаемых материалов — обеспечить необходимую кратность наблюдений. Для эффективного использования отраженных волн методика работ очевидно не оптимальна [31, 33], она оказывается не оптимальной и для преломленных волн, это приводит к неоднозначности обработки данных и получаемых результатов. По одним и тем же исходным данным ГСЗ в результате повторной обработки разными авторами получаются сейсмические разрезы, существенно отличающиеся друг от друга. Основная причина такой неоднозначности — применяемые системы наблюдений с малой кратностью, которые не обеспечивают разделения волн (выделения полезных волн), уверенного определения их природы и построения разреза. В качестве аналогии можно вспомнить неоднозначные результаты обработки материалов МОВ, полученных с однократными системами наблюдений, и только с переходом на многократные системы с получением сейсмограмм ОСТ резко повысилась однозначность получаемых результатов.

В Баренцевом и Карском морях отработано два опорных профиля ГСЗ: профиль 1-АР, близкий к меридиональному, проходит от

п-ва Рыбачий на юге до Земли Франца-Иосифа на севере, профиль 2-АР, близкий к широтному, проходит в Баренцевом и Карском морях и пересекает Новую Землю в ее средней части (рис. 9.10).

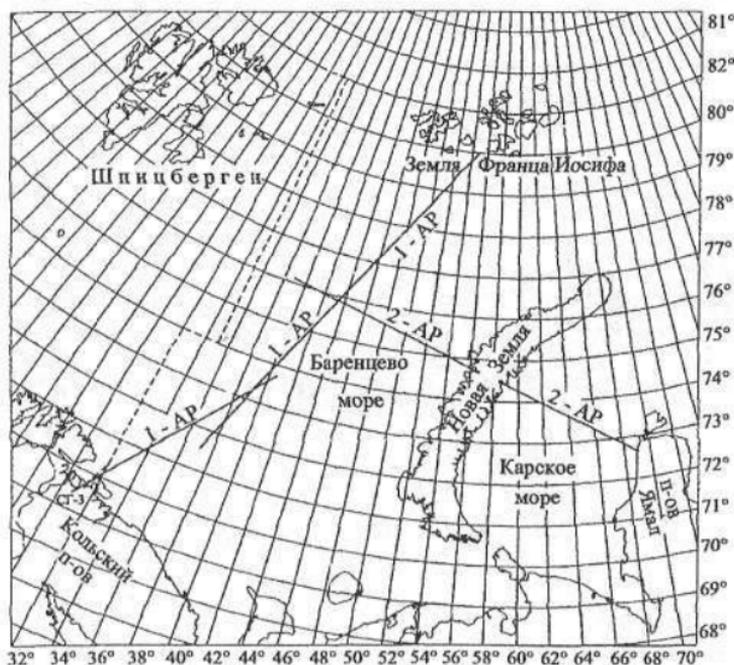


Рис. 9.10. Положение морских опорных геофизических профилей 1-АР и 2-АР.

По опорным профилям 1-АР и 2-АР часть материалов обработана с построением динамических разрезов по преломленным волнам. Весь материал не обрабатывался по методическим и техническим причинам. Мелкие преломляющие горизонты в осадочных отложениях не обеспечены даже однократным прослеживанием. Преломленные волны от горизонтов в земной коре и граница  $M$  обеспечены только двух- трехкратным прослеживанием, а для получения динамического разреза преломленных волн, как и в МОВ, необходимо иметь кратность наблюдений не меньше шести. Технические ограничения связаны с большим различием амплитуд записей разных регистраторов, собственных шумов, динамического диапазона и пр. Поэтому обработаны только отдельные преломляющие горизонты по участкам профилей.

Особенности регистрируемой волновой картины по профилю 2-АР в Карском море можно оценить по сравнению редукции и миграции одного зондирования (см. рис. 7.22).

Определение граничных скоростей пород фундамента осуществлялось на нескольких участках профиля, в качестве примера приведен результат перебора граничных скоростей по одиночным встречным сейсмограммам преломленных волн на общем участке преломляющей границы (поверхности фундамента, рис. 9.11). Значения граничных скоростей для остальной части профиля интерполировались между участками.

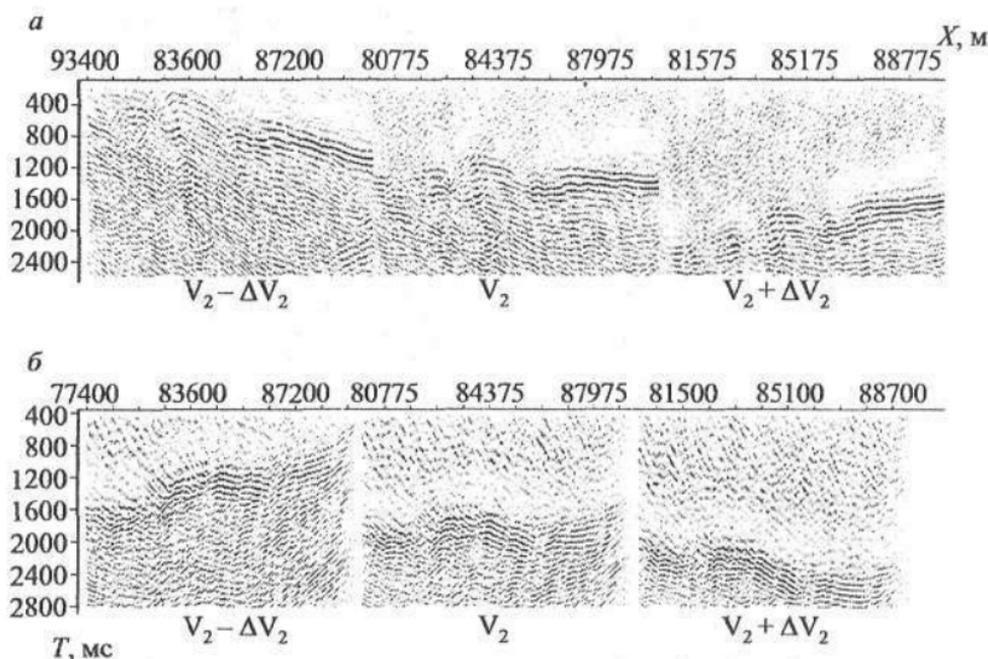


Рис. 9.11. Перебор граничных скоростей по встречным сейсмограммам ОТВ на профиле 2-АР, Карское море: ПК 934000 (а) и ПК 774000 (б).

После определения граничных скоростей корректировались значения времен  $t_{0\text{прел}}$  для каждого пункта возбуждения нахождением среднего значения в предположении их случайного разброса.

По профилю 2-АР динамический разрез по преломленным волнам приведен только по акватории Карского моря (восточная часть профиля 2-АР) по преломляющему горизонту, соответствующему поверхности фундамента со скоростью 5,5–5,8 км/с (рис. 9.12, а). Волна, обусловленная поверхностью  $M$ , по своим кинематическим особенностям, скорее всего, относится к закритическим отраженным волнам.

На динамическом разрезе, прежде всего, отмечается очень сложный рельеф фундамента с впадинами и выступами, которые

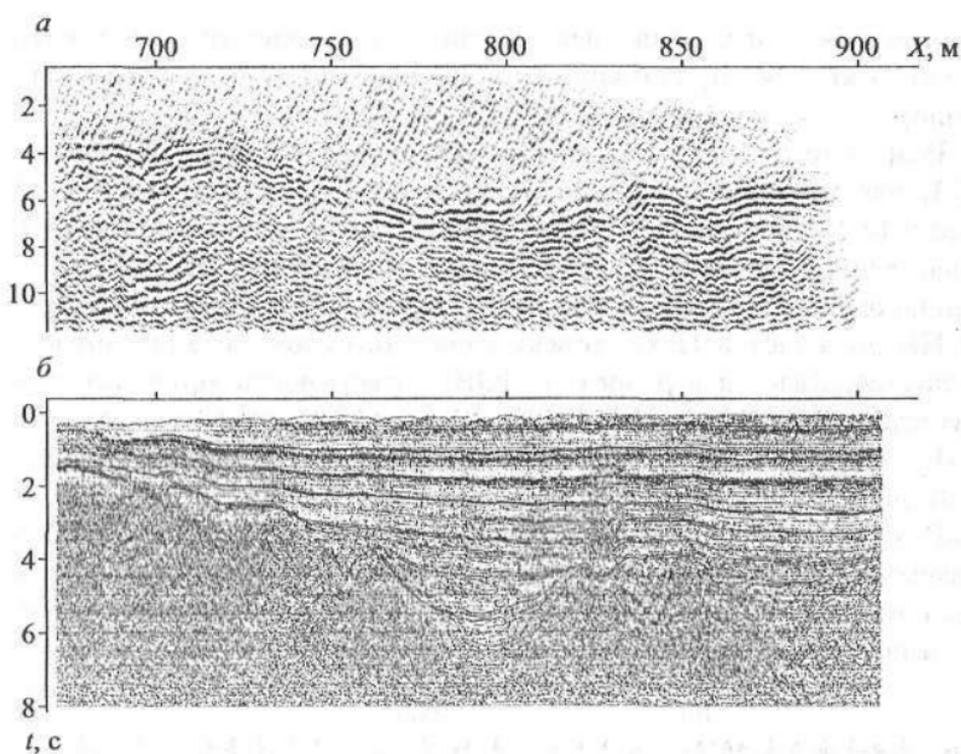


Рис. 9.12. Фрагменты сейсмических разрезов по профилю 2-АР (Карское море).  
*a* — по миграции преломленных волн от поверхности фундамента; *b* — по материалам МОВ-ОГТ.

хорошо заметны уже при редукции сейсмических записей преломленной волны (см. рис. 7.22). Рельеф фундамента не вписывается в концепцию образования головных волн по его поверхности, слишком большую роль играют явления проникания и дифракции. Волновая картина подтверждает сложность рельефа преломляющей границы — происходит очень резкое изменение формы годографов вдоль профиля, которое трудно интерпретировать в представлении головных волн. В процессе миграции отдельных сейсмограмм ОТВ происходит учет сейсмического сноса преломленной волны и структурные формы преломляющей границы принимают свои истинные размеры, в частности, по сравнению с волновой картиной при редукции записей сокращаются размеры поднятий (выступов) и увеличиваются размеры впадин. На сейсмограмме с редукцией сейсмический снос не учтен, и структурные формы фундамента смещены относительно разреза на величину сейсмического сноса. Да-

же построение преломляющей границы — поверхности фундамента с учетом явления проницания (при очень малой кратности наблюдений) — не однозначно.

Разрез преломленных волн получен до проведения работ МОВ-ОГТ, поэтому представляет интерес его сравнение с разрезом МОВ (рис. 9.12,б). Разрезы по преломленным и отраженным волнам хорошо совпадают, хотя разрез преломленных волн несколько сглажен по сравнению с разрезом МОВ. На западном участке профиля по ПВ выделяется Пахмутовский прогиб, существование которого подтверждается и разрезом МОВ — поверхность «фундамента» регистрируется на временах около 4 с.

Результаты кинематической обработки этого участка профиля приведены на рис. 9.13.

В осадочных отложениях преломляющими границами являются поверхности длительного перерыва в накоплении отложений и несогласного залегания, а также кровля известняков, но они не обеспечены непрерывными наблюдениями преломленных волн.

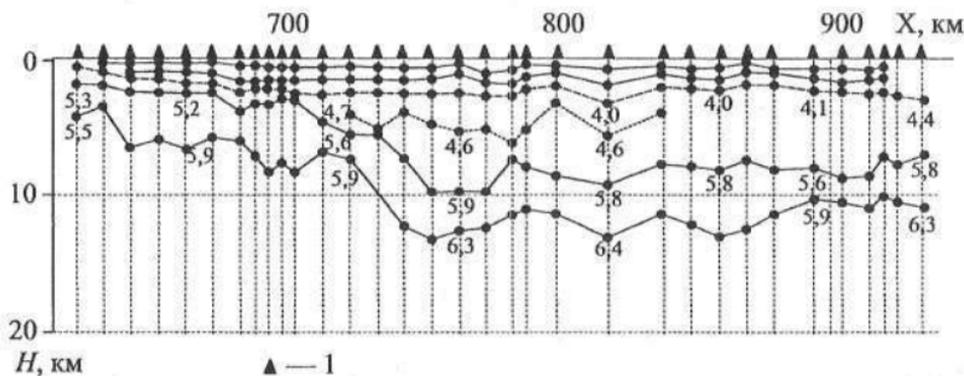


Рис. 9.13. Фрагмент кинематического разреза по отраженным и преломленным волнам (профиль 2-АР Карское море, значения граничных скоростей в км/с).

1 — положение донных регистраторов.

Осложнения отраженных волн от поверхности Мохоровичича в Карском море, вероятно, обусловлены рельефом фундамента, который погружается от Новой Земли на глубину 7–9 км, образуя выступы и впадины с перепадом глубин до 2 км. Относительно низкоскоростные осадочные отложения, залегающие над фундаментом и заполняющие его впадины, действуют на времена проходящих через них волн как ЗМС, создавая задержки времени до 200 мс и об-

разуя дифрагированные волны. Поэтому петли в волновой картине отраженной волны  $M$ , скорее всего, обусловлены не разрывными нарушениями поверхности  $M$ , а рельефом (и разрывами) фундамента. Форма годографов дифрагированных волн также соответствует относительно низким скоростям осадочной толщи, а не скоростям до границы  $M$ . Таким образом, вся сложность волны, отраженной от границы  $M$ , обусловлена не подошвой земной коры, а вышележающими отложениями, в частности фундаментом.

Следует особо отметить влияние газовых залежей Русановского месторождения на амплитуды отраженных волн в районе пикета 830 («яркое» пятно и увеличение времени регистрации), хорошо выраженные на разрезе МОВ-ОГТ (несмотря на мелкий горизонтальный масштаб) Эти явления также заметны и на разрезе МПВ по резкому затуханию амплитуд и увеличению времени регистрации. Влияние газовых залежей отмечается на всех волнах, проходящих через нее, включая и закритические отражения от подошвы земной коры.

Результаты миграции записей преломленной волны от фундамента по однократным наблюдениям в южной части профиля 1-АР показаны на рис. 9.14 в сравнении с разрезом по результатам кинематической обработки. Участок профиля соответствует погружению фундамента при переходе от суши Кольского полуострова к акватории Баренцева моря.

По профилю, расположенному в юго-восточной части Средиземного моря, отработано всего 19 зондирований (рис. 9.15); шаг между источниками — 50 м. Особенностью сейсмических записей являются короткие области прослеживания волн, соответственно малая кратность наблюдений, существование интенсивных кратных волн.

В качестве примера динамической обработки преломленных волн приведено два разреза: сейсмический разрез в масштабе  $t_0$  преломленных волн (рис. 9.16), полученный при суммировании сейсмограмм ОТП с редукцией и разрез с миграцией исходных записей преломленных волн в масштабе двойного вертикального времени до преломляющих границ (рис. 9.17).

Временной разрез ОТП и результаты его миграции по одной преломляющей границе приведены на рис. 7.20.

Анализ полученных результатов на синтетических сейсмограммах и реальных материалах показал, что эффективность использования процедуры миграции преломленных волн зависит от применяемой системы наблюдений и природы регистрируемых волн. Ис-

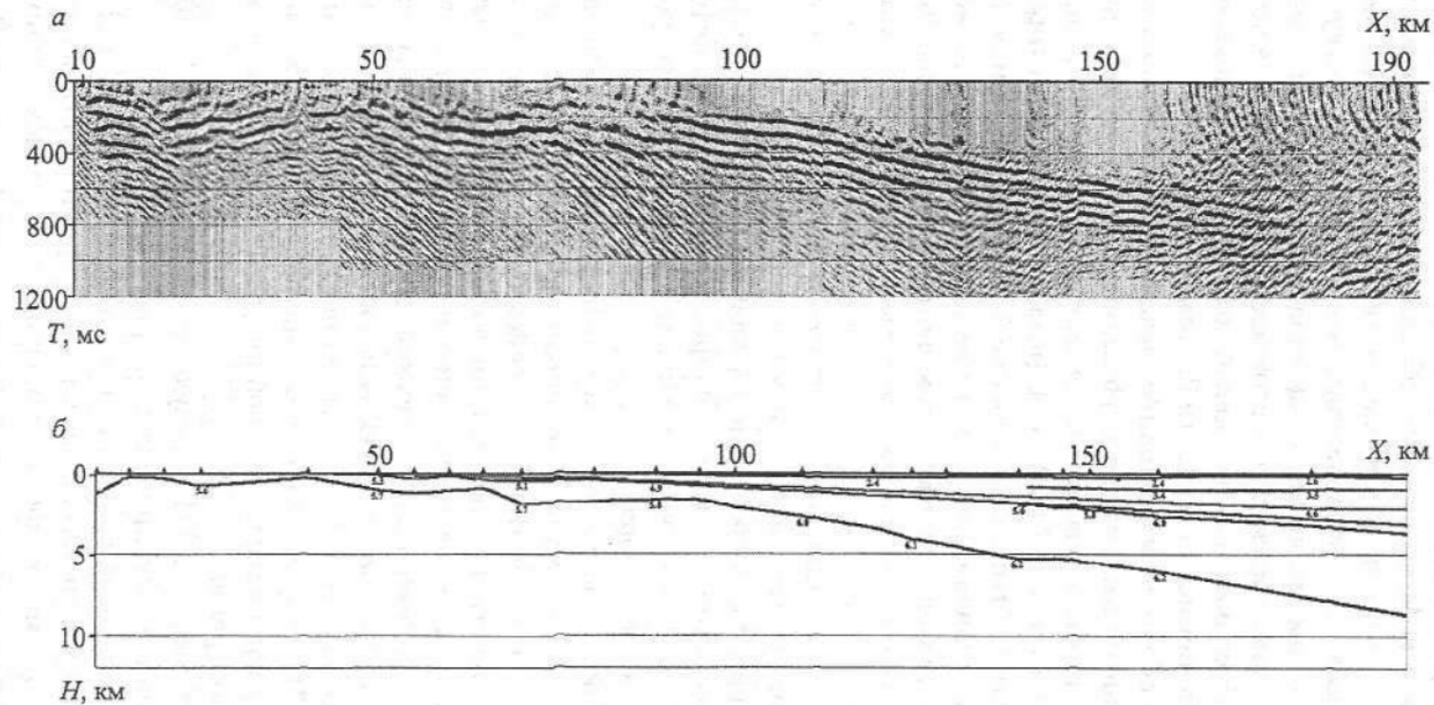


Рис. 9.14. Фрагмент сейсмического разреза по профилю 1-АР.

а — по миграции сейсмических записей преломленной волны от фундамента; б — по результатам кинематической обработки преломленных и отраженных волн (значения пластовых скоростей в км/с).

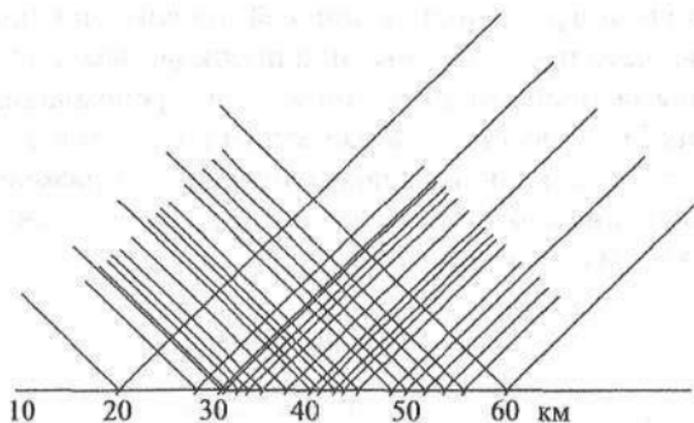


Рис. 9.15. Система наблюдений по профилю ГСЗ в Средиземном море.

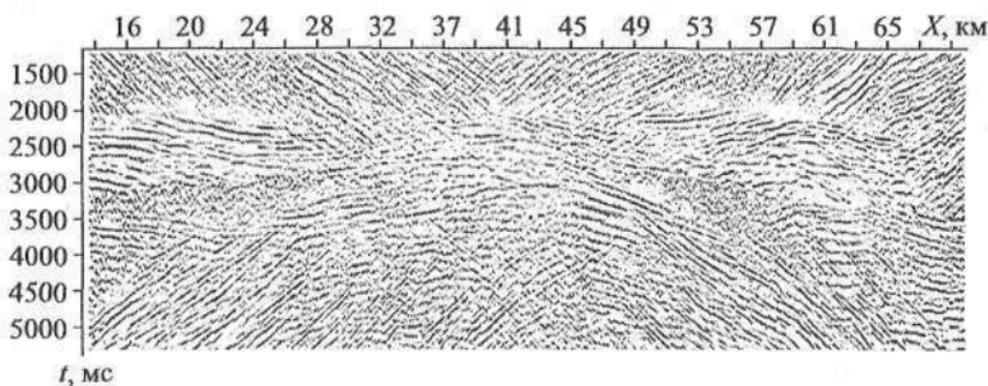


Рис. 9.16. Временной разрез ОТП по преломленным волнам.

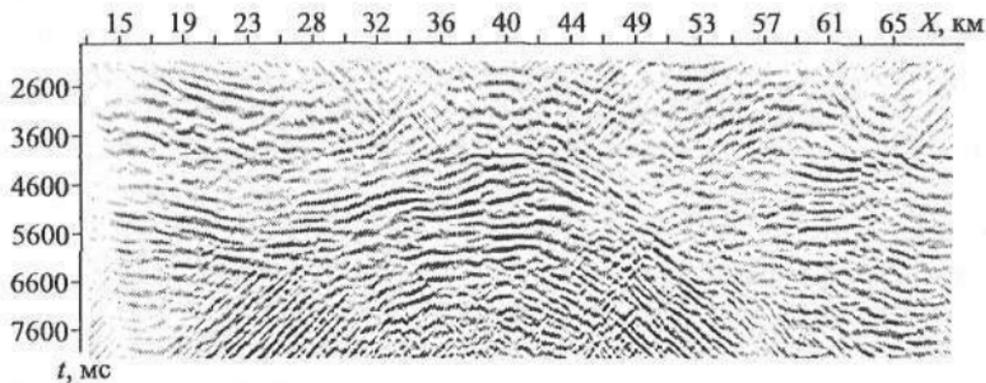


Рис. 9.17. Динамический разрез с миграцией исходных записей преломленных волн.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение сейсморазведки МПВ в геологии началось в 20-х годах прошлого столетия с регистрации первых вступлений волн в виде осциллографических сейсмограмм, вся обработка выполнялась вручную, а результатом работ был сейсмический разрез — нарисованные на бумаге преломляющие границы. При геологической интерпретации учитывались в основном структурные особенности преломляющих границ. По результатам этих работ были открыты многие залежи нефти и газа, связанные с образованием структур в зоне соляных куполов.

Быстрое развитие МОВ в 30–40-е годы XX в. отодвинуло МПВ на второй план, и его развитие ограничивалось совершенствованием кинематической обработки.

Изложенное в книге — это попытка продвинуться на пути совершенствования методики работ МПВ и обработки материалов для получения детального разреза упругих свойств всего объема изучаемой среды, который подлежит геологической интерпретации. При этом необходимо использовать не только рельеф преломляющих границ, но и изменение упругих свойств, прогнозируются не только структурные особенности геологического разреза, но и состав отложений, а также возможные залежи нефти и газа. Динамические разрезы МПВ должны приближаться к результатам, получаемым в МОВ.

По характеру изменения скоростей в реальных геологических средах чаще образуются преломленные волны с проницанием и рефракцией. Строго говоря, в реальных средах почти не существует головных волн без проницания и рефракции. Изложенный подход решает проблему проницания, явление рефракции при известном изменении скоростей также может быть решено на основе этого подхода.

Принципиально новым является обработка на основе миграции исходных записей преломленных волн и ее частные приближенные способы (получение динамических разрезов без учета сейсмического сноса с последующей их миграцией), все остальные разделы пересмотрены с этих позиций. Только на основе миграции возможна полная и строгая обработка отраженных и преломленных волн.

Автор старался рассмотреть все вопросы сейсморазведки МПВ с позиций использования кинематики и динамики волн в процессе обработки на основе миграции записей, но, конечно, ряд из них оказался слабо освещенным. Учет рефракции волн в преломляющем горизонте еще требует технологического решения и, самое главное, определения параметров, необходимых для его решения. Также необходимо разработать технологию глубинной миграции в МПВ при очень сложной модели распределения граничных скоростей. Надеемся, что при широком использовании изложенного подхода на все эти вопросы со временем будут даны ответы.

К сожалению, нам были доступны только материалы ГСЗ с его специфической методикой и технологией работ и записи преломленных волн, полученные попутно при работах МОВ в транзитных зонах на удалениях источник-приемник больших для МОВ и относительно малых для преломленных волн. Не было материалов специальных работ МПВ по методике многократных наблюдений, поэтому не смогли показать все возможности динамической обработки записей МПВ, в частности пересчет амплитуд в изменение упругих параметров разреза. Надеемся, что использование изложенных принципов и технологии обработки материалов МПВ, полученных с оптимальной методикой работ, позволит резко повысить эффективность динамических разрезов преломленных волн.

В МОВ современная технология работ и обработка материалов с получением динамических разрезов — волнового изображения упругих свойств геологической среды, совершенствовались в течение 50 лет. Подобный процесс в МПВ только начинается и можно надеяться, что он будет развиваться и дальше.

Наверное, метод преломленных волн в большинстве геологических сред не может быть эффективнее МОВ, но при решении некоторых частных задач он может оказаться очень полезным, особенно совместно с МОВ. Кроме того, при работах МОВ попутно регистрируется информация о преломленных волнах, которую нельзя просто выбрасывать. Обработка таких материалов должна выполняться

ся с использованием не только кинематических, но и динамических свойств волн.

Эффективность применения сейсморазведки МПВ зависит от сейсмогеологических условий изучаемых территорий и поставленных задач. При сохранении общих принципов в применении метода, параметры методики работ и процедур обработки могут сильно отличаться. Поэтому развитие методики работ и способов обработки получаемых материалов МПВ предоставляет широкое поле для творческой деятельности геофизика. Искусство геофизика заключается в оптимальном применении метода на конкретной территории: выборе оптимальной методики работ, последовательности и способов обработки материалов, а также приемов геологической интерпретации полученных результатов для прогнозирования детального геологического строения района.

## УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авербух А. Г.* Интерпретация материалов сейсморазведки преломленными волнами. М.: Недра, 1975. 223 с.
2. *Аки К., Ричардс П.* Количественная сейсмология: Теория и методы: В 2 т. /Пер. с англ. М.: Мир, 1983. 880 с.
3. *Балашканд М. И., Ловля С. А.* Источники возбуждения упругих волн при сейсморазведке на акваториях. М.: Недра, 1977. 129 с.
4. *Бельфер И. Л., Голошубин Г. М., Щербич А. В.* Использование в сейсморазведке тау-р-преобразования // Разведочная геофизика: Обзор. М.: ВИЭМС, 1987. 55 с.
5. *Витник А. А., Сакулина Т. С., Копылова А. В.* О регуляризации обратной задачи МПВ // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1988. № 11. С. 43-50.
6. *Геологические ловушки в сейсмических волновых полях и прогноз неантиклинальных ловушек: Методология геологической интерпретации данных сейсмической разведки в атласе.* М.: Центр. геофиз. эксп. 1991. 257 с.
7. *Голошубин Г. М., Епинатьева А. М.* Комбинированный метод сейсмической разведки. М.: Недра, 1994. 206 с.
8. *Гольдин С. В., Киселева Л. Г.* Обратная кинематическая задача для головных сейсмических волн (криволинейная преломляющая граница) // Геология и геофизика. 1981. № 6. С. 121-131.
9. *Гольдин С. В., Витгалов В. М.* Применение кинематически эквивалентных продолжений волнового поля для разделения интерферирующих волн // Геология и геофизика. 1986. № 11. С. 83-95.
10. *Гуравич И. И., Богачик Г. Н.* Сейсмическая разведка. М.: Недра, 1980. 551 с.
11. Корреляционный метод преломленных волн. *Гамбурцев А. Г., Ризниченко Ю. В., Берзон И. С.* и др. / Под ред. А. Г. Гамбурцева. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 239 с.
12. *Крылов С. В., Сергеев В. Н.* Свойства головных волн и новые возможности автоматизации их обработки. // Геология и геофизика. 1985. № 4. С. 92-102.
13. *Ляховицкий Ф. М., Шапиро С. А.* Интерпретация данных МПВ на основе автоматизированного определения сейсмического сноса // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1984. № 4. С. 35-45.
14. Метод преломленных волн / *Епинатьева А. М., Голошубин Г. М., Литвин А. Л.* и др. / Под ред. А. М. Епинатьевой. М.: Недра, 1990. 297 с.
15. Методические рекомендации по цифровой обработке и интерпретации данных многократного профилирования МПВ на море / *Богоявленский В. И.,*

Рапопорт М. В., Урунов А. К. и др. М.: МИНХиГП им. И. М. Губкина, 1985. 66 с.

16. Морская сейсморазведка методом преломленных волн / Под ред. А. М. Епинатьевой. М.: Недра, 1984. 173 с.

17. Павленкин А. Д., Сакулина Т. С., Винник А. А. Способ сопряженных точек при интерпретации годографов преломленных волн // Изв. АН СССР. Физика Земли. № 10. 1986. С. 20–31.

18. Пилипенко В. Н. Вопросы интерпретации материалов глубинного сейсмического зондирования на ЭВМ // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1976. № 3. С. 82–88.

19. Пилипенко В. Н. Разностное продолжение временных и волновых полей в задачах формирования изображений среды // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1991. № 9. С. 96–104.

20. Пилипенко В. Н., Павленкова Н. И., Луосто У. и др. Формирование изображений среды по сейсмограммам глубинного зондирования // Изв. РАН. Физика Земли. № 7–8. 1999. С. 164–176.

21. Пузырев Н. П. Методы и объекты сейсмических исследований. Введение в общую сейсмологию // СО Объед. ин-та геологии, геофизики и минералогии. РАН. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997. 301 с.

22. Рапопорт М. В. Вычислительная техника в полевой геофизике: учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1993. 350 с.

23. Робинсон Э. А. Метод миграции в сейсморазведке / Пер. с англ. В. П. Лисина; ред. пер. О. А. Потапов. М.: Недра, 1988. 111 с.

24. Сейсмическая стратиграфия: В 2 ч. / Под ред. Ч. Пейтона / Пер. с англ. А. Д. Левшина, Б. Г. Вукшина, М.: Мир, 1983. 846 с.

25. Старобинец А. Е., Старобинец М. Е. Цифровая обработка и интерпретация данных метода преломленных волн. М.: Недра, 1983. 207 с.

26. Суворов В. Д. Глубинные сейсмические исследования в Якутской кимберлитовой провинции. Новосибирск: Наука, 1993. 136 с.

27. Телегин А. Н., Левый Н. В., Воловик Ю. Н. Кинематические поправки сейсмических записей / Развед. геофизика. Вып. 93. М.: Недра, 1981. С. 17–20.

28. Телегин А. Н. Методика сейсморазведочных работ МОВ и обработка материалов. Л.: Недра, 1991. 239 с.

29. Телегин А. Н., Тихонова И. М. Построение динамических разрезов по сейсмическим записям преломленных волн // Докл. РАН. 1992. Т. 326. № 6. С. 989–993.

30. Телегин А. Н., Тихонова И. М., Сакулина Т. С. Выделение полезных волн при обработке сейсмических материалов многократных наблюдений // Рос. геофизич. журн. 1995. № 5–6. С. 16–21.

31. Телегин А. Н. Сейсморазведка: Учеб. пособие. СПб.: СПбГИ, 1999. 109 с.

32. Телегин А. Н., Тихонова И. М., Сакулина Т. С. Обработка сейсмических записей преломленных волн на основе миграции // Докл. РАН. 2003. Т. 390. № 1. С. 106–108.

33. Уотерс К. Х. Отражательная сейсмология / Пер. с англ. Е. А. Ефимовой. М.: Мир, 1981. 452 с.

34. Харкевич А. А. Спектры и анализ. М.: Физматгиз, 1962. 236 с.

35. Шарифуллин Р. Г., Косов В. В., Иванов В. А. Миграция и сверная фильтрация сейсмограмм на основе преобразования Радона // Научн.-техн. дости-

жения и передовой опыт в области геологии и разведки недр. Вып. 10. М.: ВИАМС 1990. С. 3-15.

36. *Шерифф Р., Гелдарт Л.* Сейсморазведка: В 2 т. М.: Мир, 1987. Т. 1. 447 с. Т. 2. 400 с.

37. *Par Air Gun.* Bolt associates industries. Norwalk, 1974. 32 p.

38. *Rupert G., Chan J.* The block move sum normal move out correction // *Geophysics.* 1975. Vol. 40. N 1. P. 17-24.

39. *Yilmaz O.* Seismic data processing // *Soc. Expl. Geophys.* 1987. 526 p.

*Александр Николаевич Телегин*

**СЕЙСМОРАЗВЕДКА  
МЕТОДОМ ПРЕЛОМЛЕННЫХ ВОЛН**

Редактор *Е. А. Монахова*  
Корректор *Н. В. Лутиц*  
Обложка художника *Е. А. Соловьевой*  
Верстка *Е. М. Воронковой*

Лицензия ИД №05679 от 24.08.2001

---

Подписано в печать 30.12.2004. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 10,93. Тираж 300 экз. Заказ № *109*.

Издательство СПбГУ

199034, С.-Петербург, Университетская наб., 7/9

Тел. (812) 328-77-63; факс (812) 328-44-22

[www.unipress.ru](http://www.unipress.ru)

---

Типография Издательства СПбГУ.  
199061, С.-Петербург, Средний пр., 41

ИЗДАТЕЛЬСТВО САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

А. Н. Телегин

СЕЙСМОРАЗВЕДКА  
МЕТОДОМ  
ПРЕЛОМЛЕННЫХ  
ВОЛН

2 0 0 4

Изложен новый подход к проведению сейсмических работ методом преломленных волн (МПВ). Он аналогичен существующему в настоящее время в методе отраженных волн и особенно касается методики проведения полевых работ и обработки материалов МПВ. Показано, что выбор методики работ определяется оптимальной регистрацией преломленных волн и возможностью их выделения (ослабления помех) в процессе обработки, а обработка материалов МПВ должна выполняться на основе миграции исходных записей, только в этом случае ее результаты содержат всю зарегистрированную информацию об упругих свойствах, определяемую по кинематическим и динамическим свойствам волн. Такой подход позволил пересмотреть соответственно технологию получения данных, последовательность обработки материалов и возможности применения МПВ при решении различных геологических задач.



9 785288 036835 >