

УДК 550.834

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И РАЗВЕДОЧНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБМЕННЫХ ВОЛН, ПРЕЛОМЛЕННЫХ НА КРУТОПАДАЮЩИХ КОНТАКТАХ

Т.Б.ГАВЛОВСКАЯ, М.Д.ЛИЗИНСКИЙ

Важнейшим вопросом интерпретации данных сейсморазведки является определение типа и кинематики регистрируемых волн. Специфика решения этой задачи для рудных районов состоит в том, что волновые поля отличаются высокой сложностью, определяемой большим количеством осей синфазности, пересекающих друг друга и характеризующихся широким диапазоном кажущейся скорости. При интерпретации таких волновых полей далеко не всегда удается использовать традиционные приемы определения типа волн по их кинематическим особенностям.

В сейсмических исследованиях Печенгского района методом отраженных волн (МОВ) изучению природы зарегистрированных волн всегда уделялось первостепенное внимание [2, 3, 4]. Было установлено, что подавляющее большинство волн, регистрируемых в последующих вступлениях, являются отраженными, причем наибольшей интенсивностью характеризуются продольные монотипные отражения; наряду с ними регистрируются обменные волны.

При анализе волновых полей в процессе детальных исследований МОВ выявлены волны, время регистрации которых меньше времени вступлений прямой поперечной волны, а годографы практически смыкаются с годографом прямой поперечной волны. Эти волны относятся к числу самых интенсивных и хорошо коррелирующихся в регистрируемых полях. Их кажущаяся скорость превышает скорость продольных волн. Во многих случаях область сближения годографов рассматриваемых волн и прямой поперечной волны соответствует смыканию годографов вступлений и продольных отраженных волн от крутопадающих контактов. В этой области в большинстве случаев отмечаются аномалии граничной скорости или разностного годографа.

В соответствии с указанными кинематическими особенностями было высказано предположение о природе рассматриваемых волн как проходящих преломленных, которые претерпевают обмен типа SP на крутопадающем контакте, выходящем под наносы. Проверка на прямых задачах не оставляет сомнений в правильности этого предположения. При решении этих задач за исходный

принимался разрез, построенный по отраженным волнам от крутопадающих границ. На этих границах преломлялось с обменом поле времени проходящей прямой поперечной волны. Построенный годограф преломленной волны на дневной поверхности не отличался от экспериментального.

На основе полученных представлений о кинематике волн были проанализированы материалы встречных систем годографов детальных наземных наблюдений в Печенгском районе и выявлены увязанные с волнами SP во взаимных точках волны типа PS с обменом на том же контакте. Динамически волны PS обычно выражены слабее и коррелируются хуже, чем волны SP .

Таким образом, анализ волновых полей в Печенгском районе показывает, что в последующих вступлениях наряду с отраженными регистрируются волны принципиально другой природы - преломленные с обменом на крутопадающих контактах. Кинематические особенности этих волн типа SP и волн, отраженных от пологих границ, практически подобны; отличия состоят в ограниченной области прослеживания преломлений и особенностях увязки во взаимных точках.

В связи с этим к анализу волновых полей в районах, где могут быть встречены выходящие под наносы наклонные контакты, необходимо предъявить новые повышенные требования, связанные с определением природы волн в последующих вступлениях. Ошибка определения природы волн, естественно, приводит к построению ложных границ в разрезе. В то же время правильное решение этого вопроса в случае прослеживания как отраженных, так и прелом-

ленных проходящих волн, связанных с одним и тем же контактом, позволяет изучить его в разрезе путем независимых построений по волнам разной природы.

Для исследования кинематики проходящих обменных преломленных волн и возможности изучения с их помощью разреза на глубину обратимся к лучевой схеме распространения этих волн (рис.1). Предположим, что в разрезе существует наклонная (под углом φ к горизонту) плоская граница двух сред со скоростями упругих волн V_1 и V_2 . На эту границу падает волна, возбужденная источником на поверхности наблюдений, и преломляет-

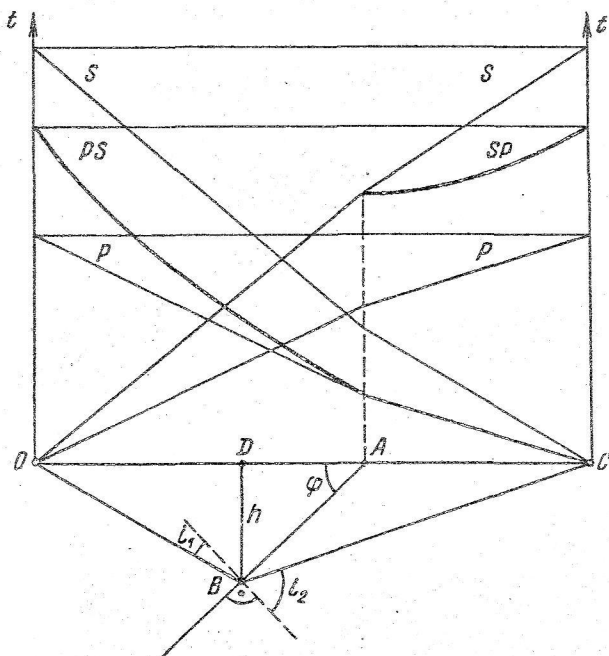


Рис.1. Лучевая схема и годографы проходящих обменных волн, преломленных наклонным контактом

ся с обменом. Выведем условия регистрации обменной волны на плоскости наблюдений по прямолинейному профилю. Решение такой задачи относится в общем случае к лучевой плоскости, но полученные результаты могут быть трансформированы в плоскость падения известными приемами [5].

Из условия преломлений на контакте

$$\sin i_1 / \sin i_2 = V_1 / V_2 = \gamma$$

(здесь i_1 и i_2 - углы падения и преломления) для $\gamma < 1$ следует, что на плоскости наблюдений волны SP могут быть зарегистрированы только из источника, смещенного относительно выхода контакта на поверхность по его падению, а волны PS - по восстанию; в противном случае преломленные лучи не выходят на поверхность наблюдений.

Уравнение годографа обменной преломленной волны можно получить в результате анализа лучевой схемы [1] (рис.1). Время распространения волны из источника (O) до дневной поверхности

$$t = \frac{OB}{V_1} + \frac{BC}{V_2},$$

а после преобразований

$$t = \sin \varphi \left(\frac{OA}{V_1 \cos i_1} + \frac{AC}{V_2 \cos i_2} \right).$$

Для волны SP ($V_1 = V_S$, $V_2 = V_P$, расстояние от источника до контакта $X_0 = OA$, расстояние от источника до точки наблюдения $X = OC$)

$$t_{SP} = \sin \varphi \left(\frac{X_0}{V_S \cos i_1} + \frac{X - X_0}{V_P \cos i_2} \right)$$

или

$$t_{SP} = \sin \varphi \left(\frac{t_{S0}}{\cos i_1} + \frac{\Delta t_{P0}}{\cos i_2} \right),$$

где t_{S0} - время распространения прямой волны S от источника до выхода контакта на поверхность; Δt_{P0} - приращение времени прямой продольной волны от выхода контакта на поверхность до точки наблюдений.

Для годографа волны PS получаются подобные выражения, если переместить источник в точку C . Тогда i_2 и i_1 - соответственно углы падения и преломления, $X_0 = CA$, $X = OC$, и уравнение годографа имеет вид

$$t_{PS} = \sin \varphi \left(\frac{X_0}{V_P \cos i_2} + \frac{X - X_0}{V_S \cos i_1} \right)$$

или

$$t_{PS} = \sin \varphi \left(\frac{t_{P0}}{\cos i_2} + \frac{\Delta t_{S0}}{\cos i_1} \right).$$

Сложность вычислений, связанная с косинусом в знаменателе, возникает только для угла преломления головной волны ($\gamma > 1$), который является предельным в рассматриваемой лучевой схеме проходящих обменных волн.

Пользуясь полученными выражениями для годографов, необходимо выявить пределы изменения углов падения и преломления. Из лучевой схемы для обменных волн, наблюдаемых на поверхности, получим

$$i_1 < \frac{\pi}{2} - \varphi; \quad \frac{\pi}{2} - \varphi < i_2 < \frac{\pi}{2}$$

или

$$\sin i_1 < \cos \varphi; \quad \cos \varphi < \sin i_2 < 1.$$

С учетом условия преломления $\sin i_2 = \sin i_1 / \gamma$

$$\sin i_1 < \cos \varphi; \quad \gamma \cos \varphi < \sin i_1 < \gamma.$$

Кинематический смысл данных неравенств следующий. Ограничение на угол падения для волны SP означает, что на дневной поверхности регистрируются только лучи, преломленные на определенной части контакта, которая во всех случаях снизу ограничена горизонтальным преломленным лучом, а сверху — лучом, падающим под критическим углом или в точку выхода контакта на поверхность в зависимости от угла наклона контакта. Горизонтальный луч, падающий в точку выхода контакта на поверхность, совпадает с критическим для угла наклона $\varphi = \arccos \gamma$. Для меньших углов φ верхняя часть границы расположена в закритической области и не может быть изучена волнами SP . Такого ограничения нет для больших углов наклона применительно к волнам SP и для любых углов наклона применительно к волнам PS . При построении границы методом полей времен важно учитывать рассмотренное ограничение, отделяя изучаемую преломленными волнами SP часть границы критическим лучом.

Глубинность изучения контактов обменными преломленными волнами определяется углом их наклона. Как следует из лучевой схемы (см. рис. I), для волны SP ($\gamma < 1$) глубина h изучения контакта, нормированная расстоянием $X_0 = OA$ от источника до выхода контакта на плоскость наблюдений, определяется из треугольников ODB и ADB :

$$h/X_0 = \operatorname{tg} \varphi / (\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg}(\varphi + i_1) + 1).$$

Для волны PS (источник в точке C) глубина h определяется из треугольников ADB и CDB :

$$h/X_0 = \operatorname{tg} \varphi / (\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg}(\varphi + i_2) + 1),$$

где $X_0 = CA$ — расстояние от источника до выхода контакта на поверхность; i_2 — угол падения луча из точки C на границу.

Можно показать, что имеющее физический смысл положительное значение отношения h/X_0 для волны SP обеспечивается неравенством $\cos(\varphi + i_1) > 0$, из которого следует, что $\varphi + i_1 < \pi/2$, а для волны PS — неравенствами $\cos(\varphi + i_2) < 0$ и $\pi/2 < \varphi + i_2 < \pi$.

Очевидно, что глубина изучения наклонного контакта максимальна, когда преломленный луч горизонтален. Для волны SP ($\gamma < 1$) это требует со-

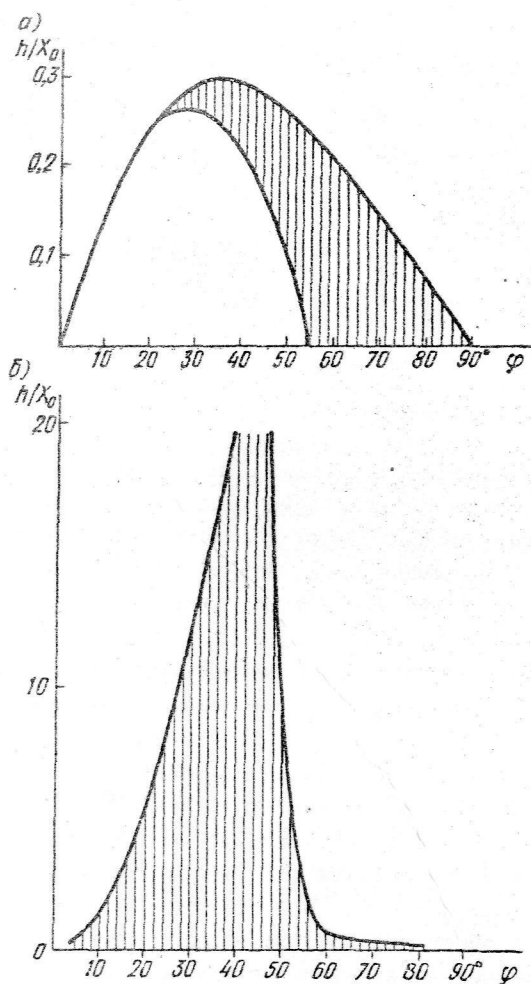


Рис.2. Область прослеживания (показана штриховкой) наклонного преломляющего контакта по обменным волнам SP (а) и PS (б) по параметру $\gamma = 1/\sqrt{3}$. φ - угол наклона контакта; h - глубина прослеживания; X_0 - расстояние от источника до выхода контакта на плоскость наблюдений

блюдения условия $i_1 = \arcsin(\gamma \cos \varphi)$, для волны PS ($\gamma > 1$) - $i_2 = \arcsin(\gamma \cos \varphi)$, откуда $\cos \varphi < 1/\gamma$, $\varphi > \arccos 1/\gamma$. Последнее означает, что горизонтальное положение луча для волны PS достигается только при относительно больших углах падения контакта.

Глубина изучения контактов волнами SP , как указывалось выше, ограничена не только снизу, но и сверху критическим лучом, для которого $i_1 = \arcsin \gamma$.

Максимальная глубина изучения контактов достигается при углах их падения около $40-45^\circ$ (рис.2). Эти оценки устойчивы относительно параметра γ , меняющегося в незначительных пределах.

Можно оценить угол падения контакта по отдельным элементам годографа преломленной волны. В области максимальной глубины изучения контакта, где преломленный луч приближается к горизонтالي, угол наклона может быть оценен по асимптотической части годографа, где кажущаяся скорость преломленной волны приближается

к скорости вступлений. Для волны SP это означает, что в пределе $i_2 = \frac{\pi}{2} - \varphi$, а $\cos i_2 = \sin \varphi$. С учетом $\sin i_1 = \gamma \sin i_2 = \gamma \cos \varphi$; $\cos i_1 = \sqrt{1 - (\gamma \cos \varphi)^2}$

$$t_{SP} = t_{s_0} \frac{\sin \varphi}{\sqrt{1 - (\gamma \cos \varphi)^2}} + \Delta t_{P_0}.$$

Для волны PS может быть получено подобное выражение

$$t_{PS} = t_{P_0} \frac{\sin \varphi}{\sqrt{1 - (\gamma \cos \varphi)^2}} + \Delta t_{s_0}.$$

Относительно угла φ эти уравнения, в которых значения времени и параметра γ известны, решаются графически. При этом для случая $\gamma < 1$ ограничений нет, а для $\gamma > 1$ необходимо выполнение условий $1 - \gamma \cos \varphi > 0$ и $\cos \varphi < 1/\gamma$, которые означают, что для относительно малых углов преломленные лучи не приближаются к горизонтали, а кажущаяся скорость не достигает асимптотического значения.

В области выхода контакта на поверхность угол его наклона в принципе может быть определен по значению кажущейся скорости. Такая возможность имеет практическое значение для волн SP , начало регистрации которых, в отличие от волн PS , не осложнено интенсивным пакетом первых волн. Однако выбор формул зависит от того, относится ли эта область к закритической части контакта. Если относится, то очевидно, что угол выхода $e \rightarrow \varphi$ ($\angle ACB$ на рис. I), а потому $V_p / V^* = \cos \varphi$ (здесь V^* - кажущаяся скорость волны). Если контакт выходит на поверхность в докритической области, угол выхода $e = i_2 - i_1$ и связь угла наклона с кажущейся скоростью усложняется:

$$\gamma \frac{V_p}{V^*} = \cos^2 \varphi + \sin \varphi \sqrt{\gamma^2 - \cos^2 \varphi}.$$

Чтобы воспользоваться этим выражением, его нужно табулировать по параметрам γ и V_p .

Результаты изучения кинематики обменных преломленных волн подобны полученным для проходящих монотипных волн с соответствующим соотношением скоростей на контакте [1]. Поэтому при обработке проходящих преломленных волн, в том числе первых вступлений (например при определении граничной и пластовой скорости), следует учитывать зависимость от угла падения контакта, и в частности, то обстоятельство, что, подобно вертикальным годографам в указанном выше диапазоне относительно малых углов наклона ($\gamma \leq \arccos 1/\gamma$) [6], горизонтальные годографы проходящих преломленных волн, возбуждаемых в среде с большей скоростью ($\gamma > 1$), вообще не имеют асимптотической части с кажущейся скоростью, соответствующей скорости в среде за преломлящим контактом.

Годографы проходящих преломленных и головных волн различаются по кажущейся скорости, а в асимптотической части смещены на постоянную величину. Для ее оценки рассмотрим разность Δt годографа головной волны за преломлящим контактом

$$t_2 = \frac{X_0}{V_1} + \frac{X - X_0}{V_2}$$

и асимптотической части годографа проходящей преломленной волны

$$t_{12} = \frac{X_0 \sin \varphi}{V_1 \sqrt{1 - (\gamma \cos \varphi)^2}} + \frac{X - X_0}{V_2}.$$

где V_1 - скорость в среде, в которой размещен источник колебаний; V_2 - скорость за преломлящим контактом.

Тогда

$$\Delta t = t_2 - t_{12} = \frac{X_0}{V_1} \left[1 - \frac{\sin \varphi}{\sqrt{1 - (\gamma \cos \varphi)^2}} \right].$$

Это соотношение может служить для оценки условий, при которых использование модели головных волн для интерпретации годографов проходящих волн не искажает существенно результатов.

В Печенгском районе, где дифференциация скоростного разреза, как правило, незначительна ($\gamma \approx 0,95$), выражение для разности годографов проходящей и головной волн позволяет охарактеризовать требования к системе наблюдений, в частности, к расстоянию от источника до контакта. Если считать допустимой $\Delta t = 5$ мс, то для диапазона углов падения $\varphi > 40\div 50^\circ$, характерного для района, приемлемо расстояние от пункта взрыва до контакта в несколько сотен метров. Эти условия во многих случаях соблюдаются при выполнении детальных работ и допускают обработку годографов первых вступлений по модели головных волн с целью изучения граничной скорости.

С большей надежностью искажения результатов интерпретации следует оценивать на основе решения прямых задач.

Выводы

1. В волновых полях, зарегистрированных в Печенгском районе, выявлены проходящие обменные волны, преломленные на крутопадающих контактах.

2. Установлено, что кинематика обменных проходящих волн типа *SP*, преломленных на крутопадающих контактах, и продольных отражений от пологих границ подобна. В связи с этим при анализе зарегистрированных волновых полей необходимо дополнительно выявить колебания различной природы.

3. На многих крутопадающих контактах в Печенгском районе образуются как отраженные, так и проходящие преломленные волны. Это позволяет многократно проследивать границы по волнам разной природы.

4. Результаты изучения кинематики обменных волн применимы к проходящим монотипным волнам, преломленным наклонными контактами. В связи с необходимостью учета различия годографов проходящих и головных волн предложены способы оценки условий, в которых эти различия несущественны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авербух А.Г. Интерпретация материалов сейсморазведки преломленными волнами. М., Недра, 1975.
2. Лизинский М.Д. Определение природы сейсмических волн в Печенгском районе с помощью комбинированных систем наземных и скважинных наблюдений. - Зап. ЛГИ, 1976, т.69, вып.2.
3. Методика изучения сейсморазведкой МОВ докембрийских структур Печенгско-Аллареченгского никеленосного района / Л.К.Кокорина, М.Д.Лизинский, М.Х.Меламуд. - В кн.: Разведочная геофизика. М., Недра, 1974. Вып. 64.
4. Методика и результаты изучения скоростного разреза Печенгского рудного района / И.В.Литвиненко, Л.К.Кокорина, М.Д.Лизинский, З.Х.Телякова. - Зап. ЛГИ, 1974, т. 66, вып. 2.
5. Пузырев Н.Н. Интерпретация данных сейсморазведки методом отраженных волн. М., Гостоптехиздат, 1959.
6. Рудницкий В.П. Сейсмические исследования в скважинах. Киев, Наукова думка, 1968.