Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова т. LXI, вып. 2, 1971 г.

МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКОЙ СЛОЖНЫХ СТРУКТУР ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ КОНСОЛИДИРОВАННОЙ КОРЫ МАТЕРИКОВ

И. В. Литвиненко

На основании огромного опыта сейсморазведочных работ в нефтегазоносных районах хорошо разработаны и в настоящее время продолжают совершенствоваться методика и системы наблюдений отраженными и преломленными волнами применительно к изучению пологих структур осадочных пород. Наряду с этим, в последние годы сейсмический метод разведки все чаще применяется для исследования консолидированной коры и, в частности, структур, сложенных сильно метаморфизованными и кристаллическими породами, в регионах, где ведутся поиски рудных месторождений. В этих условиях перед сейсморазведкой ставятся задачи изучения очень сложных складчатых и сильно дислоцированных структур, образованных относительно слабо дифференцированными по значениям скорости распространения упругих волн горными породами.

Геологическое строение таких регионов на больших глубинах мало изучено. На какую глубину прослеживаются сложные структуры в консолидированной коре, обнажающейся на древних щитах,— вопрос, имеющий принципиальное значение для выяснения истории развития коры и распределения в ней месторождений полезных ископаемых. До последнего времени он решался геофизическими методами весьма приближенно из-за больших методических трудностей и не вышел из стадии гипотез. Выделение и прослеживание на глубине различных тектонических нарушений является одной из наиболее трудных задач. Определение этих нарушений в метаморфизованных толщах даже вблизи дневной поверхности по совокупности геологических и геофизических данных в ряде случаев проводится далеко неоднозначно. Не менее трудно определять без бурения и морфологию отдельных интрузий.

Для изучения структур, образованных кристаллическими и метаморфическими породами на больших глубинах, нельзя просто использовать методику и, в частности, системы наблюдений сейсморазведки, разработанные для пологозалегающих сейсмических границ в нефтегазоносных районах. Необходимо предусмотреть такие приемы наблюдений, которые позволили бы прослеживать различно ориентированные, не выдержанные по простиранию и по падению крутопадающие сейсмические границы, отражающие сложное складчатое строение разрезов с многочисленными тектоническими нарушениями.

Выбор систем наблюдений в сейсморазведке, как известно, определяется многими факторами, основными из которых являются характер решаемых задач и строение среды. Кроме них, важное значение имеют условия возбуждения и регистрации упругих колебаний, аппаратура и экономические факторы. Некоторые из особенностей применения сейсморазведки в сложных условиях рудных регионов и при изучении консолидированной коры неоднократно обсуждались [1—6]. На основании этих данных и опыта работ на Балтийском щите можно кратко охарактеризовать сейсмогеологические особенности разрезов древних щитов и других регионов, где обнажаются кристаллические и метаморфизованные комплексы горных пород.

1. Кристаллические и метаморфизованные породы вблизи дневной поверхности различаются по значениям скорости V, которая зависит от многих факторов: минералого-петрографического состава, степени метаморфизма, пористости, трещиноватости, выветрелости, влажности. Для продольных волн V иногда изменяется от 3 до 7 *км/сек*, однако чаще колеблется от 5 до 6,5 *км/сек*, что соответствует слабо дифференцированным средам $\left(\text{отношение значений скорости } n = \frac{V_1}{V_2} \geqslant 0{,}8\right)$. Повышенные V свойственны основным и ульраосновным породам, пониженные — гранитоидам. Скорости для метаморфизованных пород изменяются в широких пределах.

Изменения V в горизонтальном направлении вдоль дневной поверхности более значительны при пересечении контактов пород существенно различного состава, часто соответствующих переходу от одной структурно-фациальной зоны к другой.

2. Заметные изменения скорости по вертикали для одних и тех же пород установлены лишь в верхних частях разрезов до глубины 1—3 *км*. Вертикальные градиенты скорости β быстро убывают с глубиной, неодинаковы для различных пород и определяются, помимо факторов, указанных для V, также давлением и температурой пород. Максимальные градиенты ($\beta = 0{,}5$ *сек*$^{-1}$) отмечены до глубин первых сотен метров для гранитоидов и других пород с пониженными начальными значениями V, меньшие — для основных и ультраосновных пород. Следовательно, градиенты β, как и скорости, изменяются вдоль профилей, пересекающих различные комплексы пород.

3. Контакты пород различного состава имеют сложную конфигурацию по падению и простиранию, обусловленную складчатостью, тектоническими нарушениями, магматизмом и метаморфизмом. Связанные с геологическими контактами сейсмические границы характеризуются невыдержанным простиранием, изменяющимися большими углами падения. Они прослеживаются в ряде случаев от дневной поверхности на глубины свыше 10—15 *км* и отмечают сложное складчатое и блоковое строение, по крайней мере, верхней трети всего разреза коры [3, 6]. Не исключено, что и в нижних частях коры имеются крутопадающие сейсмические границы, однако прослеживание их затруднено.

4. Помимо крутопадающих отражающих границ, в коре намечаются пологие слабо волнистые сейсмические границы (обычно преломляющие). Точность определения преломляющих границ невысока, а природа их недостаточно ясна. Многие исследователи придерживаются мнения, что такие границы связаны с фронтами различных фаций метаморфизма [5], тогда при сейсморазведке они могут рассматриваться как переходные слои с повышенными значениями вертикального градиента скорости. Подобное предположение высказывается и для подошвы земной коры — поверхности М.

Переходные градиентные крутопадающие слои, возможно, связаны и с зонами контактового метаморфизма в верхних частях разрезов коры.

Таким образом, есть некоторые основания предполагать наличие пересекающихся сейсмических границ: крутопадающих, связанных с контактами пород различного состава, а также пологих, обусловленных, вероятно, фронтами различных фаций регионального метаморфизма.

5. Коренные породы перекрыты прерывистым чехлом рыхлых отложений мощностью до десятков метров с малыми значениями скорости. Эрозионная поверхность этих пород является резкой сейсмической границей ($0{,}1 < n < 0{,}5$) со значительными скачкообразными изменениями скорости по площади.

6. Возбуждение упругих волн взрывами вблизи резкой границы у дневной поверхности способствует проявлению направленного воздействия, вызывающего интенсивные волны не только продольные, но и поперечные и, возможно, обменные. Условия установки сейсмоприемников в летнее время мало благоприятны; они резко изменяются даже на небольших участках профиля (болота, скальные выходы и т. д.) и ухудшают запись полезных волн.

Перечисленные особенности указывают на исключительно сложное строение рассматриваемых разрезов, для которых непригодна слоистая модель с горизонтальными сейсмическими границами. Для верхних частей консолидированной коры характерны среды со скачкообразными и плавными изменениями скорости в пространстве $V(x, y, z)$, содержащие сейсмические границы с изменяющимися простираниями и углами падения вплоть до вертикальных, и возможно, переходные слои. С известным приближением при региональных исследованиях такую сложную модель можно определить как блочную, считая, что в пределах отдельных ее блоков, соответствующих обычно определенным структурно-фациальным зонам, разрезы очень слабо дифференцированы по скорости и имеют сравнительно выдержанный по площади вертикальный градиент скорости, быстро убывающий с глубиной. Для большинства сейсмических границ, даже разграничивающих блоки-структуры с существенно различным составом пород, изменения V невелики ($n \geqslant 0{,}8$).

Блоковое строение разрезов установлено не менее чем для 1/3 мощности консолидированной коры (10—15 *км*). В нижних ее частях закономерности изменения V (наличие переходных слоев и др.) изучены очень слабо. Можно предполагать, что здесь дифференциация различных блоков, если таковые сохраняются, также имеется, но по сравнению с верхними частями коры значительно меньшая за счет нивелирующего влияния термодинамических условий.

Сложная форма сейсмических границ обусловливает совершенно иной, по сравнению с горизонтально-слоистой моделью среды, характер наблюдаемых волновых полей. Для таких границ типичны прерывистые дискретные волновые поля, что объясняется не только сложной формой границ, но и неоднородностями покрывающей среды, а также невыдержанными условиями возбуждения и регистрации упругих волн.

Основным методом изучения слабо дифференцированных сред со сложной зависимостью $V(x, y, z)$ и дискретным характером волновых полей должен быть метод отраженных волн (МОВ), а не метод преломленных волн (КМПВ). Известно, что отраженные волны (особенно закритические) по интенсивности обычно превышают головные. Кроме того, МОВ, используя меньшие базы наблюдений, позволяет более точно определять элементы залегания сейсмических границ на глубине. Как будет показано ниже, МОВ, по сравнению с КМПВ, имеет и бóльшие возможности для выделения на глубине крутопадающих границ, характеризующих складчатые структуры.

Волновое поле необходимо изучать в широком диапазоне частот с тем, чтобы иметь возможность исследовать нерезкие границы — переходные слои, существование которых весьма вероятно. При этом требуется регистрация низких частот ($f < 10$ *гц*). Новые данные сейсморазведки в нефтеносных районах указывают на важную роль тонких слоев и сравнительно небольших неоднородностей среды в формировании волнового поля. В ряде случаев [1, 2, 3] в рудных районах также удалось проследить отдельные маломощные дайки и тектонические трещины. Эти результаты стали возможны при регистрации относительно высоких частот ($f > 50 — 70$ *гц*). Таким образом, одним из путей повышения эффективности сейсмического метода при изучении консолидированной коры является расширение диапазона регистрируемых частот с применением промежуточной магнитной записи, ставшее вполне реальным.

В условиях хорошо обнаженных районов, для которых имеются детальные геологические карты, при сейсморазведке необходимо использовать дополнительные возможности: а) детально изучить изменения начальной скорости в самых верхних частях разрезов с помощью простых методик, использующих слабо рефрагированные волны; б) геологически объяснить наклонные сейсмические границы, приближающиеся к дневной поверхности; в) использовать известные по геологическим и геофизическим данным направления простирания геологических контактов вблизи дневной поверхности не только для выбора положения сейсмических профилей, но и для интерпретации (решения пространственных задач и др.).

Исходя из сложной блоковой модели среды, важно оценить разведочные возможности МОВ и выбрать оптимальные системы наблюдений для прослеживания различно ориентированных сложной формы отражающих границ, которые типичны для складчатых сильно дислоцированных структур.

При полном отсутствии или очень неточных сведениях о глубинном строении территории следует считать, что в каждой точке пространства вероятен отражающий элемент с углом наклона от $-\frac{\pi}{2}$ до $+\frac{\pi}{2}$. В действительности отражения наблюдаются не повсеместно, а лишь от определенных границ или от их отдельных элементов.

Если имеются предварительные данные о примерном положении на глубине основных геологических границ, предположения о сейсмической модели среды становятся более определенными, и системы наблюдений в этом случае должны обеспечить выделение отражающих границ с ожидаемым диапазоном углов падения в нужном интервале глубин.

Еще определеннее формулируются требования к системам наблюдений, если задачей исследований является прослеживание на глубину одного или нескольких контактов с предполагаемыми простираниями и значениями углов падения φ.

Возможность выделения отражающих элементов, которые в общем случае вероятны в каждой точке среды и с любой ориентировкой, нетрудно оценить для различных систем наблюдений, считая, что на записях могут быть выделены все продольные отраженные волны в интервале $t =$ и среда имеет постоянную скорость.

Как было показано выше, дифференциация горных пород, слагающих консолидированную кору, по скорости обычно мала ($n \geqslant 0{,}8$). Поэтому условие $V = \text{const}$ для отдельных блоков коры может быть приемлемым в отношении средней скорости как первое приближение при обсуждении принципиальных вопросов о разведочных возможностях МОВ. Содержащиеся в такой среде реальные отражающие границы или отдельные отражающие элементы связаны со слабыми изменениями V или в отдельных

случаях с резкими, но тонкими слоями, мало влияющими на величину средней скорости.

Условие выделения всех продольных отраженных волн позволяет оценить максимальные возможности применяемых систем наблюдений. В действительности из-за наличия волн-помех, малой интенсивности и интерференции отраженных волн на записях удается выделить далеко не все отражения.

Рассмотрим двухмерную задачу для профиля, расположенного в направлении падения отражающих элементов с разными углами наклона, но с единым простиранием. Если в заданной точке разреза m (x, z) имеется отражающий элемент R (рис. 1), то соответствующая ему отраженная волна может быть прослежена в точке наблюдения M $(x_0, 0)$ при условии, если угол наклона элемента R равен $\varphi = \frac{\alpha - \beta}{2}$.

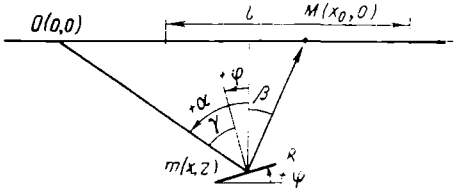


Рис. Траектория сейсмического луча

Определяя углы α и β через координаты точек m и M, получим

$$\varphi = \frac{1}{2}\left(\operatorname{arctg}\frac{x}{z} - \operatorname{arctg}\frac{x_0 - x}{z}\right)$$

Данную зависимость можно представить как функцию двух переменных $\frac{x}{z}$ и $\frac{x_0}{z}$ (рис. 2, *а*).

При непрерывном профилировании из одного пункта взрыва ПВ (о, о) на конечном интервале профиля $l = x_{0_2} - x_{0_1}$ отражения могут быть получены при различных углах наклона φ элемента R, расположенного в точке m (x, z). Диапазон доступных изучению углов φ определяется в этом случае интервалом l, т. е. двумя абсциссами $\frac{x_0}{z}$ (рис. 2, *а*) или двумя графиками с этими же параметрами (рис. 2, б). Таким образом, решается вопрос о пределах φ_1 и φ_2 изменения угла наклона сейсмической границы в точке m, при которых отраженный луч попадет в интервал профиля l. В случае, когда непрерывные наблюдения ведутся в интервале l, примыкающем к ПВ, как это часто бывает на практике,

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg}\frac{x}{z}, \tag{1}$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{2}\left(\operatorname{arctg}\frac{x}{z} - \operatorname{arctg}\frac{l - x}{z}\right) \tag{2}$$

Если же непрерывное профилирование проведено по обе стороны от ПВ в интервалах $\pm l$,

$$\varphi_{1,2} = \frac{1}{2}\left(\operatorname{arctg}\frac{x}{z} \pm \operatorname{arctg}\frac{l - x}{z}\right)$$

На основании установленных зависимостей можно сделать выводы для пределов φ_1 и φ_2.

1. Существуют названные предельными углы наклона отражающих элементов (рис. 2, *а*), которые практически доступны изучению при заданном относительном положении источника и точки отражения m. Прослеживание отражающего элемента с углом падения, большим чем предельный, практически не осуществимо. Для этого требуется очень большое удаление пункта регистрации M, при котором точность построения отражающего элемента снижается из-за малейших ошибок в выборе скорости.

2. Значения предельных углов существенно зависят от взаимного положения источника и точки отражения. Большие предельные углы падения отражающих границ (более 60°) свойственны только точкам m, которые характеризуются параметром $\frac{x}{z} > 1$, что соответствует пологим падающим

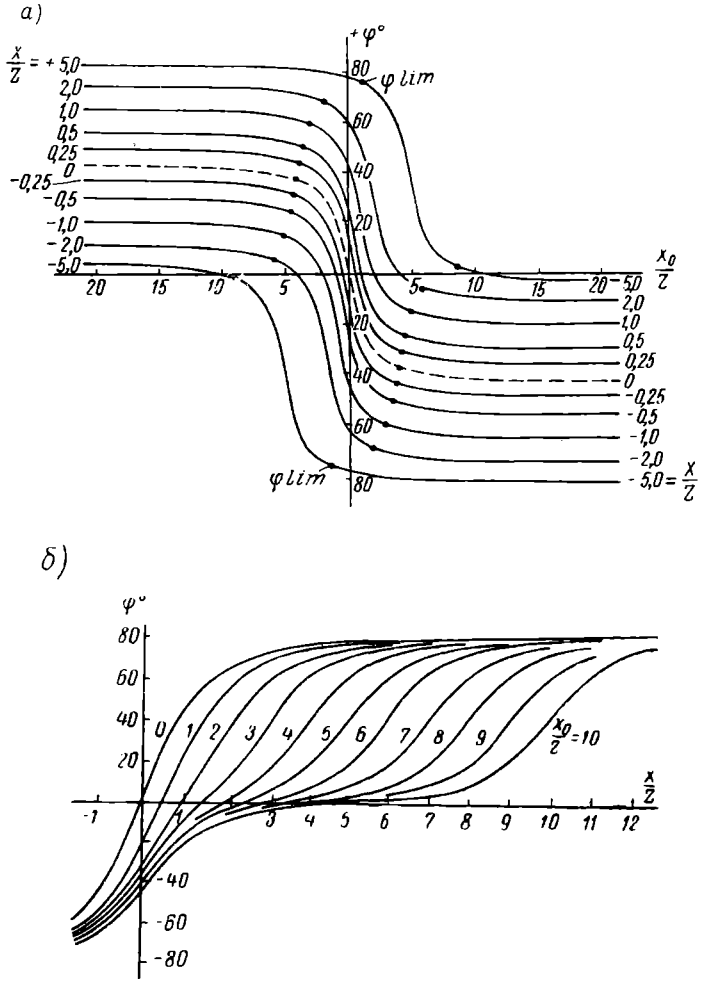


Рис. 2. Графики изменения углов наклона φ отражающих элементов, доступных разведке:

а — в зависимости от длины интервала непрерывного профилирования $\frac{x_0}{z}$ для различных точек разреза $\frac{x}{z}$ *б* — вдоль профиля на глубине z при различном положении концов $\frac{x_0}{z}$ интервала непрерывного профилирования

лучам, образующим с линией наблюдения углы менее 45° Так, если для точек разреза m, расположенных под источником $\left(\text{параметр } \frac{x}{z} = 0\right)$, предельные углы едва превышают 40 то для точек на удалении $x = 2z$ они достигают более 70° (рис. 2, *а*).

3. Графики (рис. 2, *б*) показывают изменение диапазона доступных изучению углов наклона φ отражающих элементов, расположенных на

постоянной глубине $z = \text{const}$ вдоль профиля при различных длине и положении интервала l, в котором проводится непрерывное профилирование. При одностороннем годографе диапазон углов φ достаточно широк при $x > 0$ и резко сужается для точек с x 0. Важно отметить, что в интервале профиля $-1 < \frac{x}{z}$ 0 могут прослеживаться весьма крутые углы падения.

Наблюдения вблизи ПВ ($l < z$) позволяют проследить крутопадающие отражающие границы, но на большом удалении ($x > 2z$) и в очень узком диапазоне углов (рис. 2, *б* — интервал φ между графиками $\frac{x_0}{z} = 0$ и $\frac{x_0}{z} =$ 1). С увеличением длины интервала l диапазон доступных углов существенно расширяется, что приводит к выводу о целесообразности применения достаточно длинных годографов.

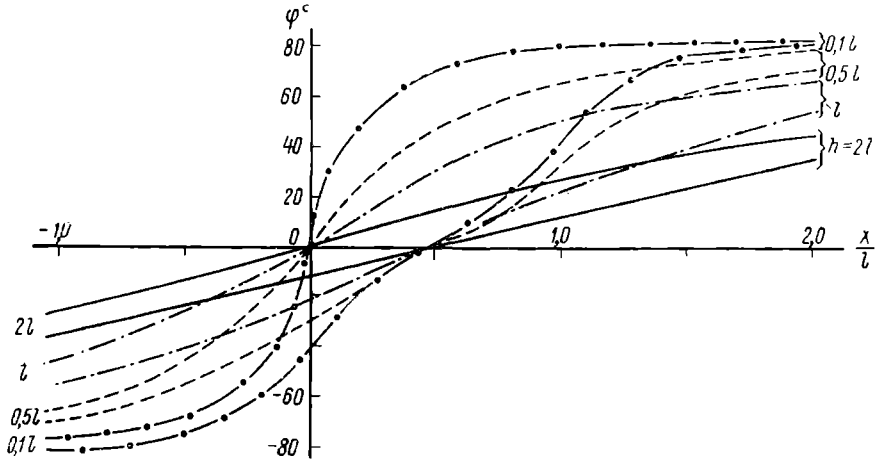


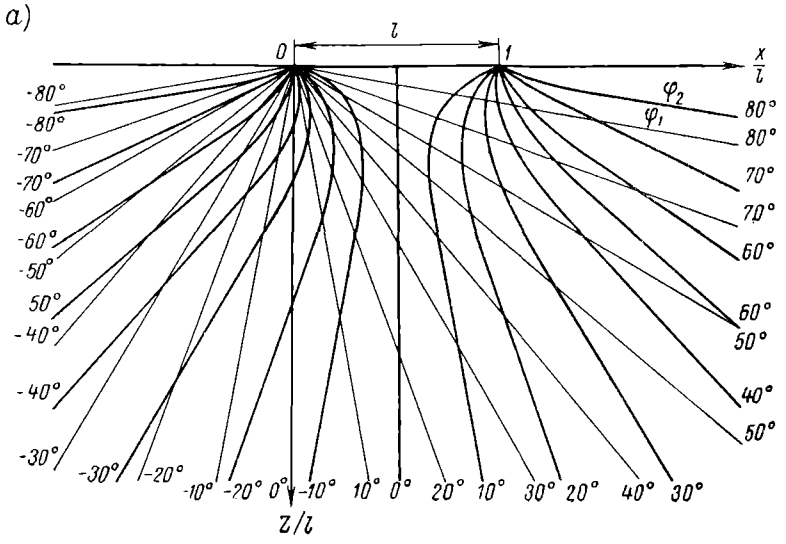
Рис. 3. Диапазоны изменения углов наклона φ отражающих элементов вдоль профиля доступных изучению при постоянной длине интервала непрерывного профилирования l на различных глубинах ($z = 2l$; l; $0{,}5l$; $0{,}1l$)

4. Если задать максимальную глубину разведки z_{max}, можно определить необходимую длину одиночного годографа — интервала непрерывного профилирования l, при котором окажется возможным изучение почти предельных углов наклона на этой глубине в определенном интервале профиля. В соответствии с рис. 2, *а*, для интервала профиля $-2z_{max} \leqslant x \leqslant 2z_{max}$ она может быть принята равной $4z_{max}$. В этом случае доступные изучению углы φ на концах этого интервала меньше предельно возможных лишь на $10° — 15°$

5. Длина годографа $4z_{max}$ обеспечивает прослеживание в вышележащей области разреза ($z < z_{max}$) крутопадающих отражающих элементов с углами наклона в более широком диапазоне, который на многих участках достигает предельных значений.

При больших глубинах ($z > 2l$) наблюдается почти линейное изменение положения интервала $\varphi_2 — \varphi_1 \cong \text{const}$ в зависимости от удаления от ПВ (рис. 3). Изучение очень крутых границ при годографах длиной $l < z$ возможно только на больших удалениях от источника ($x \gg l$).

Выводы об избирательном выделении отражающих элементов в разрезе в зависимости от их положения и углов падения при непрерывном профилировании из одного ПВ в интервале l иллюстрируются рис. 4, *а*, получен-



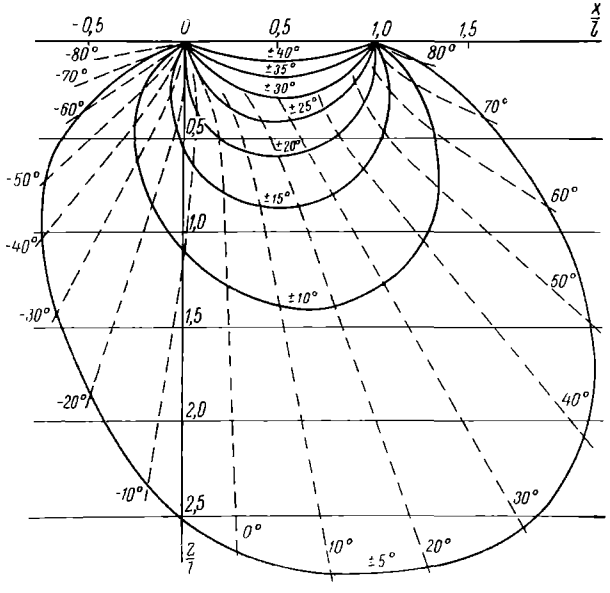


Рис. 4. Пределы изменения φ_1, φ_2, средние значения $\frac{\varphi_1 \quad \varphi_2}{2}$ и м мально возможные отклонения от них $\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}$ для углов клона отражающих элементов, доступных изучению (плоскость разреза, один ПВ):

$\varphi_1 = \text{cons}$, $_2 = \text{const}$ (а); $\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} = \text{const}$, $\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} = \text{const}$ (б)

ным из предыдущих графиков. За единицу масштаба x и z принят интервал l, примыкающий к ПВ. В плоскости разреза в соответствии с формулами (1) и (2) построены два семейства изолиний углов φ_1 и φ_2, ограничивающих диапазон доступных разведке углов наклона отражающих элементов.

Изолинии минимальных углов φ_2 могут рассматриваться как линии равных углов наклона касательных, проведенных к семейству всех возможных эллипсов, с фокусами, закрепленными в точках $x = 0$ и $x = l$. Проводя интерполяцию, можно в любой точке разреза определить φ_1 и φ_2 — пределы изменения доступных изучению углов падения отражающего элемента при заданном интервале непрерывного профилирования.

Для большей наглядности избирательного освещения разреза МОВ при одном ПВ рис. 4, *а* трансформирован следующим образом (рис. 4, *б*): по двум семействам изолиний φ_1, φ_2 построены изолинии углов $\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}$ и $\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}$. Первые дают «среднее» значение угла наклона, доступного разведке в данной точке, а вторые — максимальные отклонения от «среднего» значения угла, при которых прослеживание их еще возможно.

Рис. 4, *а, б* может быть использован для любого сейсмического разреза при соответствующем изменении масштаба (длина интервала непрерывного профилирования должна быть принята за единицу).

В средней части рассматриваемого профиля при изучении его из одного ПВ на глубинах $z \geqslant l$ можно проследить отражающие элементы лишь с небольшими значениями φ. Причем с увеличением глубины диапазон углов φ резко уменьшается. Так, например, на глубине $z = 2{,}5\ l$ колебания в наклонах отражающих границ относительно средних значений φ не могут превышать $\pm 5°$ Подобные случаи наблюдаются при сейсморазведочных работах во многих нефтегазоносных районах, когда глубина разведки существенно превышает длину годографа, и построения обычно ведутся из каждого ПВ в интервале профиля $0 \leqslant x \leqslant l$.

При переходе от центральной к краевым частям рис. 4, *а, б* появляется возможность прослеживать крутопадающие отражающие элементы, но также в очень узком диапазоне изменения углов падения.

Для небольших глубин $z < l$ и $0 \leqslant x \leqslant l$ пределы φ_1 и φ_2 расширяются, но оказываются существенно различными для отдельных частей разреза.

Таким образом, при наблюдениях из одного ПВ разрез освещается МОВ весьма неравномерно: прослеживаются лишь те участки отражающих границ, углы наклона которых находятся в определенном диапазоне $\varphi_1 - \varphi_2$, существенно неодинаковом для различных точек разреза. Целесообразно ввести понятие о характеристике избирательного освещения разреза (избирательности) как функции координат точки разреза при непрерывном профилировании МОВ. Характеристика направленности $F = \varphi_1\left(\frac{x}{l}, \frac{z}{l}\right) - \varphi_2\left(\frac{x}{l}, \frac{z}{l}\right)$ не играет существенной роли при изучении пологих структур, но исключительно важна при исследовании сложных структур, характерных для консолидированной коры.

Следует иметь в виду, что полученные количественные оценки для доступных изучению крутопадающих отражающих границ являются максимально возможными. В действительности из-за помех, малых протяженности и интенсивности многие из отраженных волн на записях проследить трудно, в результате чего соответствующие им отражающие элементы в различных частях разреза не будут выделены даже в случае, когда углы их наклона доступны разведке.

Для рассматриваемых слабо дифференцированных сред, как известно, закритические отраженные волны могут быть существенно интенсивнее

докритических и вероятность прослеживания их большая, чем докритических отражений. Поэтому определение характеристик избирательного освещения разреза по закритическим отраженным волнам имеет важное практическое значение.

Углы падения лучей на отражающую границу γ зависят от положения точки отражения m, т. е. от значения α и от угла наклона границы φ (рис. 1)

$$\gamma = |\alpha - \varphi|. \tag{3}$$

Для закритических отражений необходимо принимать во внимание значения угла γ где критический угол $i = \arcsin \frac{V_1}{V_2}$ соответствует перепаду скоростей на отражающей границе с V_1 на V_2.

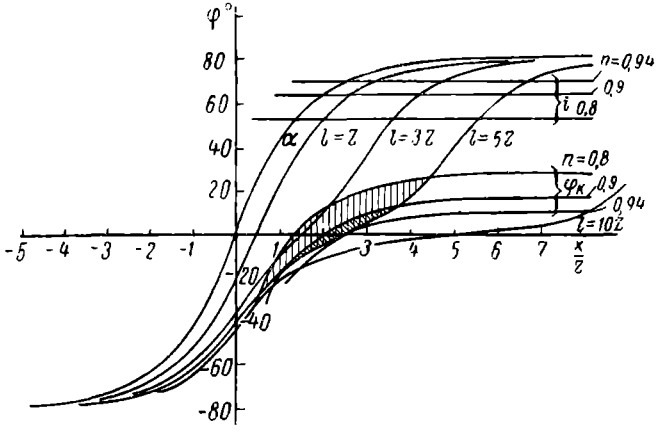


Рис. 5. Диапазоны изменения вдоль профиля α и $\varphi_к$ углов наклона φ отражающих элементов на глубине z, при которых могут быть получены закритические отражения ($i = 53, 64, 70°$; $l = z, 3z, 5z$; $n = 0{,}8; 09; 0{,}94$)

При заданной величине i можно определить для каждой точки m угол $\varphi_к$, при котором будет получен луч, отраженный под критическим углом,

$$\varphi_к = \alpha - i.$$

Закритические отражения ($\gamma \geqslant i$) могут быть получены при углах наклона границы φ $\varphi_к$, т. е. φ $\alpha - i$ или φ $\operatorname{arctg} \frac{x}{z} - \arcsin \frac{V_1}{V_2}$ (рис. 5).

Другим пределом, ограничивающим возможные наклоны отражающего элемента в точке m, являются установленные выше минимальные углы наклона φ_2, определяемые длиной интервала непрерывного профилирования l (рис. 2, *б*; 5). Таким образом, диапазон углов наклона отражающего элемента в текущей точке разреза m, при которых могут быть получены закритические отражения, определяется условием

$$\varphi_2 \leqslant \varphi \leqslant \varphi_к$$

или

$$\frac{1}{2}\left(\operatorname{arctg}\frac{x}{z} - \operatorname{arctg}\frac{l_0 - x}{z}\right) \leqslant \varphi \leqslant \left(\operatorname{arctg}\frac{x}{z} - \arcsin\frac{V_1}{V_2}\right)$$

На рис. 5 заштрихованы диапазоны углов, при которых могут быть получены закритические отражения, определяемые положением графиков $\varphi_к$ и φ_2 (при принятых значениях $n = 0{,}8$; 0,9 и 0,94 и $l = 3z$, $5z$).

В зависимости от соотношения углов φ и α и их знаков, значения угла наклона границы φ, доступной разведке по закритическим отражениям, находятся в весьма узком диапазоне, существенно изменяющемся вдоль профиля.

Угол α вдоль бесконечного профиля изменяется в пределах

$$-\frac{\pi}{2} \leqslant \alpha \leqslant \frac{\pi}{2}$$

Однако при конечной длине интервала непрерывного профилирования α для удаленных точек m ($x > 4z$) в лучшем случае достигает 80° (рис. 5).

Для слабо дифференцированных сред обычно $n = \frac{V_1}{V_2} \geqslant 0{,}8$, что соответствует минимальным критическим углам $i_{\min}$ 53° В условиях таких сред закритические отражения могут быть получены только от сравнительно пологих отражающих элементов, ограниченных углами наклона φ 27°

Изучение более крутых отражающих границ практически невозможно, так как для этого требуются трудно выполнимые годографы протяженностью $x_0 \gg 10z$.

Из рис. 5 следует, что на глубине z при длине годографа l $5z$ закритические отражения при $n = 0{,}8$ могут быть получены только для тех отражающих элементов, углы наклона которых находятся в интервале $\pm$ 27° и в ограниченном интервале профиля $0{,}25\ z \leqslant x \leqslant 4{,}5z$. При $n = 0{,}9$ этот интервал уменьшается до $\pm$ 13°, а при $n = 0{,}94$ сокращается до единственной точки ($x = 2{,}5\ z$), в которой еще можно выделить закритическое отражение при горизонтальной границе раздела. При более коротком годографе, например, $l = 3\ z$, возможности выделения закритических отражений сохраняются лишь для случая $n = 0{,}8$ и $-13° < \varphi < 13°$ При дальнейшем сокращении длины годографа выделение закритических отражений в слабо дифференцированных средах становится невозможным.

Таким образом, при слабо дифференцированных средах более интенсивные закритические отраженные волны можно прослеживать только от границ, близких к горизонтальным ($\varphi < 30°$). В результате этого в средней части профиля, изученного из одного ПВ, отражающие элементы с небольшими углами наклона могут быть ошибочно отнесены к более резким границам ($n < 0{,}8$), так как они будут характеризоваться доминирующими отраженными волнами.

Анализ избирательного освещения структур слабо дифференцированных сред закритическими отраженными волнами целесообразно распространить и на случай, когда в геологических разрезах могут быть встречены отражающие элементы резких границ ($n < 0{,}5$).

Интересно выяснить возможность выделения закритических отражений для разных значений критического угла i при различной длине интервала непрерывного профилирования l (рис. 6).

Для бесконечного профиля ($l = \infty$) из условия параллельности отраженного луча линии наблюдения (при $\varphi < 0$) следует (рис. 1)

$$\gamma + |\varphi| = \frac{\pi}{2}$$

или, с учетом формулы (3),

$$= \gamma = \frac{\pi}{4} + \frac{\alpha}{2}$$

Из рис. 6 видно, что на удалении от ПВ ($x \geqslant 4z$) диапазон изменения критических углов практически одинаков (от 0 до 85°). С приближением к ПВ и при переходе через него этот диапазон резко уменьшается до 0—5°. Таким образом, от этой части разреза даже при бесконечном профиле закритические отражения могут быть выделены только от очень резких сейсмических границ.

Для конечных интервалов непрерывного профилирования предельные значения критических углов, при которых отраженные лучи могут быть еще зарегистрированы в изучаемом интервале профиля, существенно из-

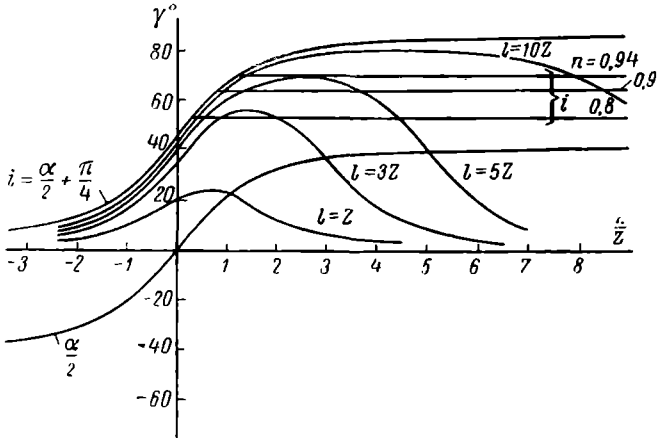


Рис. 6. Пределы возможных изменений критических углов вдоль профиля на глубине $z = \text{const}$ (максимально возможные углы падения γ при $l = z$; $3z$; $5z$; $10z$)

меняются в зависимости от l. В соответствии с рис. 1 и формулами (1), (2)

$$i = \frac{\alpha - \beta}{2} = \frac{1}{2}\left(\operatorname{arctg}\frac{x}{z} + \operatorname{arctg}\frac{l-x}{z}\right)$$

Если влево от ПВ пределы изменения i близки к $i_{\lim}$, то в правой части профиля они весьма различны. Так, например, при $l = 1z$ в пределах изучаемого интервала $\left(\frac{x}{z} \leqslant 1\right)$ могут быть прослежены закритические отражения от границ, характеризующихся критическими углами $i > 23°$ Из рис. 6 видно также, что разведка закритическими отраженными волнами сейсмических границ с малым перепадом скорости ($n \geqslant 0{,}8$) принципиально возможна при $l > 3z$. Практически же необходимо иметь для этой цели годографы длиной не менее 5 z, с тем чтобы проследить очень слабые границы ($n > 0{,}9$). Однако и при этом остаются в силе сделанные заключения о доступности разведке лишь пологих границ.

Полученные выводы для двухмерной задачи обобщаются для аналогичной объемной модели среды, в каждой точке m (x, y, z) которой можно предполагать наличие отражающего элемента любого простирания (азимута линии падения относительно профиля в пределах $0 \leqslant \delta \leqslant 2\pi$) и с любым углом падения $0 \leqslant \varphi \leqslant \frac{\pi}{2}$.

Приведенные выше формулы (1), (2) в этом случае могут быть использованы для определения пределов кажущихся углов падения ψ, доступных изучению при заданных положениях источника и длине годографа l. При этом следует вместо z рассматривать глубину $h = \sqrt{y^2 + z^2}$ до текущей точки m (x, y, z) в наклонной плоскости сейсмических лучей. Тогда пределы изменения доступных изучению углов наклона отражающих элементов будут

$$\psi_1 = \operatorname{arctg} \frac{x}{\sqrt{y^2 \quad z^2}},$$

$$\psi_2 = \frac{1}{2}\left(\operatorname{arctg} \frac{x}{\sqrt{y^2 - z^2}} - \operatorname{arctg} \frac{x_0 + x}{\sqrt{y^2 \quad z^2}}\right)$$

Отсюда следует, что с увеличением y и z, т. е. с удалением отражающего элемента в плоскости сейсмических лучей от профиля происходит явление, аналогичное двухмерной задаче: изучению доступны отражающие элементы только с небольшими кажущимися углами наклона ψ в средней части профиля и с большими углами, но в очень узком диапазоне, вблизи концов годографа и за его пределами ($x \geqslant x_0$ и $x < 0$).

Как известно, между кажущимися углами падения и истинными существует связь

$$\sin \varphi = \frac{\sin \psi}{\cos \delta} \tag{4}$$

или

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{\sin \psi}{\cos \delta}\right),$$

где δ — азимут линии профиля относительно проекции линии падения (дополнительная независимая переменная по сравнению с двухмерной задачей).

Таким образом, определяемые кажущиеся углы ψ близкие к нулю могут характеризовать как действительно горизонтальные границы ($\delta = 0$), так и очень крутые $\left(\delta \to \frac{\pi}{2}\right)$. В последнем случае разведке доступны отражающие элементы с очень крутыми углами падения, вплоть до 90°, но при этом глубина изучения резко уменьшается, так как плоскость сейсмических лучей становится почти горизонтальной.

Разведочные возможности КМПВ в отношении выделения крутонаклоненных преломляющих границ существенно меньше, чем МОВ. Действительно, максимальный угол наклона границы определяется условием

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - i.$$

Для слабых границ, характерных для консолидированной коры, критические углы обычно больше 50—60° Следовательно, в таких условиях с помощью КМПВ принципиально нельзя изучать преломляющие границы в вертикальной плоскости с углами наклона более 30—40° (для МОВ этот предел достигает почти 80°). Возможности исследования КМПВ таких границ в случаях, когда профиль задан не по падению границы, возрастают в отношении углов наклона, но, как и в МОВ, уменьшаются по глубинности разведки.

Разведочные возможности КМПВ, по сравнению с МОВ, снижаются так же, как уже отмечалось, вследствие обычно меньшего количества преломляющих границ по сравнению с отражающими, а также меньшей точности построений при исследовании из-за волнистости границ, наличия вертикальных градиентов скорости, особенно влияющих на наблюдения на больших базах, характерных для КМПВ. При изучении волнистой границы, особенно в направлении ее восстания, даже при одном ПВ может появляться несколько головных монотипных волн, и это следует иметь в виду при интерпретации.

Приведенные выше выводы для МОВ и КМПВ должны быть уточнены с учетом влияния вертикального градиента скорости. Однако расчеты показывают, что реально существующие вертикальные градиенты мало изменяют сделанные количественные оценки.

Полученные данные указывают на избирательное освещение разрезов и всей среды сейсморазведкой любым методом при простейшей схеме наблюдений из одного источника. Эта особенность не влияет на результаты, которые получаются для слоистых сред с горизонтальными границами раздела, однако имеет решающее значение при изучении сложных структур.

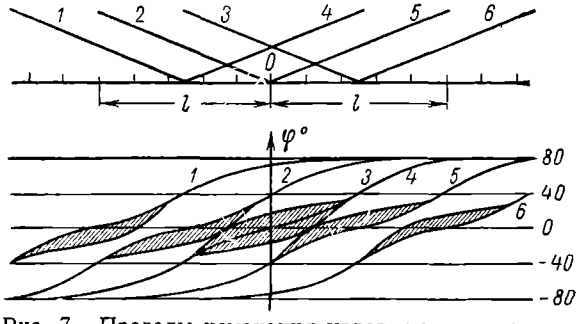


Рис. 7 Пределы изменения углов наклона φ отражающих элементов, доступных изучению на глубине z, при двойном непрерывном профилировании с длиной годографа $l = 2.\ z$ (заштрихованы диапазоны углов φ, соответствующие закритическим отражениям)

Указанный недостаток существенно уменьшается в МОВ при применении более сложных систем наблюдений с использованием нескольких источников. При выборе сложных систем наблюдений необходимо, прежде всего, уточнить общеизвестные положения о корреляционной увязке годографов для различных источников. Рис. 2. *б* можно рассматривать как график углов, позволяющих получить отражения во взаимных точках при различной величине взрывного интервала ($l = z,\ 2z \quad 10z$). Как следует из него, в каждой точке разреза имеется только одно возможное значение угла наклона границы, при котором будут получены корреляционно увязанные во взаимных точках элементы годографа. Если имеется дискретное поле отраженных волн, соответствующее заданному распределению разрозненных отражающих элементов (по положению в разрезе и по углам наклона), получение корреляционно увязанных элементов годографа для всей совокупности площадок практически невозможно. Поэтому вряд ли целесообразно сохранить определение «корреляционно увязанные системы нагоняющих и встречных годографов» для данной модели среды. Эти системы окажутся таковыми лишь для отдельных элементов.

Однако применение более сложных систем наблюдений, состоящих из совокупности разобранных выше элементарных наблюдений из одного ПВ, существенно расширяет возможности МОВ. В этом нетрудно убедиться, если рассмотреть пример непрерывного простого или двойного профилирования (рис. 7). При таких наблюдениях диапазон доступных разведке углов расширяется почти до 80° и, что особенно важно, он становится одинаковым для всего профиля за исключением краевых частей. Возможности выделения закритических отражений, однако, и в этом случае ограничены установленными выше пределами.

Учитывая дискретный характер рассматриваемых волновых полей и отмеченные трудности корреляционной увязки разрозненных отражений, предпочтение следует отдать системам двойного или даже более сложного профилирования. В этом случае можно контролировать правильность определения природы регистрируемых волн и точность построений по независимым исходным данным. Разрез может считаться достоверно построенным, если при двойном профилировании все отражающие элементы (дважды построенные независимо) совпадают между собой с заданной точностью. В настоящее время такое решение представляется единственно обоснованным.

Выводы

1. При наблюдениях МОВ и КМПВ из одного источника разрез (двухмерная задача) и среда (трехмерная задача) освещаются весьма неравномерно: в различных частях разреза, среды разведке доступны отражающие и преломляющие границы с существенно разными углами наклона.

2. Крутопадающие отражающие границы с углами наклона более 45° доступны разведке, если они достаточно удалены от источника в горизонтальном направлении. Это ставит на очередь необходимость более тщательного изучения волн с большими временами прихода и со значениями кажущейся скорости, близкими к скорости первых волн. Этим волнам до сих пор уделялось мало внимания.

3. Более сложные системы наблюдений позволяют устранить отмеченную неравномерность в освещении большей части изучаемого профиля, но не обеспечивают корреляционной увязки большинства разрозненных отраженных волн. Поэтому более рациональной системой наблюдений является двойное профилирование, обеспечивающее контроль за точностью построения разреза.

Применяемые обычно в МОВ стандартные системы наблюдений с короткими годографами $l < z_{max}$ позволяют принципиально прослеживать крутые границы, определять значения скорости. Они удобны для машинной обработки, но достаточно трудоемки из-за необходимости частого перемещения ПВ.

4. Оптимальной системой является двойное непрерывное профилирование с длиной годографа не менее 3—4 z_{max}, где z_{max} — максимальная глубина разведки. При этом обеспечивается выделение отражающих элементов в широком, почти предельном диапазоне углов наклона с минимальными затратами. Рекомендуемая длина годографа в несколько раз превышает годографы, применяемые при изучении платформенных структур.

5. Важно сочетать наблюдения вблизи ПВ и на удалении. Это позволяет прослеживать как докритические, так и закритические отражения и освещать одни и те же отражающие элементы при существенно разных условиях (выбор расчетной скорости, интенсивность волн и др.).

6. В условиях сложных сред продольные наблюдения должны обязательно сочетаться с большим объемом пространственных наблюдений.

7 Необходимо расширить диапазон регистрируемых частот для выяснения избирательности освещения разреза методами сейсморазведки по частоте.

8. В связи со сложным строением изучаемых сред, характерных для консолидированной коры, возникает настоятельная необходимость поэтапного исследования: на первом этапе выделять основные волны, на втором проводить определения пространственного положения сейсмических границ и необходимую детализацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волин А. П. Применение сейсморазведки при решении задач рудной геологии. Наука, 1969.
2. Вопросы разведочной геофизики. Сейсморазведка. Докл. I Всес. совещ. по рудной сейсморазведке. Недра, 1966.
3. Геология и глубинное строение восточной части Балтийского щита. Наука, 1968.
4. Глубинное сейсмическое зондирование земной коры в СССР. Гостоптехиздат, 1962.
5. Косминская И. П. Метод глубинного сейсмического зондирования. Наука, 1968.
6. Материалы международного совещания экспертов по взрывной сейсмологии. Наукова думка, 1969.