

УДК 550.84

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ОТРАЖАЮЩИХ ГРАНИЦ  
ПО СЕЙСМОГРАММАМ ФИКСИРОВАННЫХ ТОЧЕК ОТРАЖЕНИЯ****Бондарев В.И., Крылатков С.М., Крылаткова Н.А., Крылевская А.Н.***ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург,**e-mail: Bondarev\_v@mail.ru*

При построении сейсмических изображений геологической среды важно знать как пространственные, так и угловые характеристики сейсмических границ. В настоящее время основным способом получения информации о строении геологической среды является сейсмический метод общей глубинной точки (МОГТ). Этот метод предполагает получение представления о геологической среде на основе цифровой обработки совокупности специальным образом сформированных сейсмограмм, относящихся к равномерно расположенным по профилю общим средним точкам (ОСТ). В результате стандартной обработки каждая сейсмограмма ОСТ превращается в одну суммотрассу – трассу будущего изображения среды – временного разреза или, после пересчетов времени отражения в глубину, глубинного разреза. На получаемых таким способом сейсмических разрезах хорошо прослеживаются изображения сейсмических границ по профилю, дающие объективное представление как о строении геологической среды, так и об углах наклона сейсмических границ, разделяющих отдельные слои в среде. В статье описывается оригинальный способ определения пространственных и угловых характеристик сейсмических границ по динамическим свойствам сейсмических трасс, выбираемых по принципу фиксированной точки отражения. Для реализации способа по профилю и по глубине формируется двумерная детальная сетка возможных точек отражения. В точках этой сетки рассчитываются и накапливаются значения некоторой целевой функции, характеризующей по динамическим признакам принадлежность выбранной точки к одной из сейсмических границ. После построения двухмерного поля целевой функции по ее локальным экстремумам могут быть определены угловые параметры элементов границ, а также полученные изображения функции цели могут интерпретироваться как новые атрибутивные сейсмические изображения среды. Приводятся необходимые элементы теории и результаты моделирования.

**Ключевые слова:** сейсморазведка 2D, отражающая граница, угловые характеристики**DETERMINING THE ANGULAR PARAMETERS OF REFLECTING BORDERS  
BY SEISMOGRAMS OF FIXED REFLECTION POINTS****Bondarev V.I., Krylatkov S.M., Krylatkova N.A., Krylevskaya A.N.***Ural State Mining University, Ekaterinburg, e-mail: Bondarev\_v@mail.ru*

When constructing seismic images of the geological environment, it is important to know both the spatial and angular characteristics of seismic boundaries. In the main method of seismic exploration implemented in practice today – the method of the General deep (middle) point, such angular parameters are not used, but only evaluated from the obtained images. Determining the values of these parameters independently of obtaining images using the OGT method and further using them for image construction promises to increase the resolution of the seismic exploration method. The article describes an original method for determining the spatial and angular characteristics of seismic boundaries based on the dynamic properties of seismic paths selected on the principle of a fixed reflection point. To implement the method, a two-dimensional detailed grid of possible reflection points is formed based on the profile and depth. At the points of this grid, the values of a certain target function are calculated and accumulated, which characterizes the dynamic characteristics of the selected point belonging to one of the seismic boundaries. After constructing a two-dimensional field of the target function, the angular parameters of the boundary elements can be determined from its local extremes, and the resulting images of the target function can be interpreted as seismic images of the environment. The necessary elements of the theory and simulation results are presented.

**Keywords:** 2D seismic survey, reflecting boundary, angular characteristics

Сейсмическая разведка, как метод разведочной геофизики, занимает в настоящее время ведущее место в комплексе работ при поисках и разведке месторождений углеводородного сырья. Важной задачей научных исследований в этой области является совершенствование технологии применения сейсмической разведки для получения максимально объективной информации об изучаемой геологической среде. Один из видов важной информации, которую могут представить сейсмические данные, – это сведения об угловых атрибутах (углах и азимутах наклона) основных геологических напластований. Эта информация открывает

новые возможности сейсмического метода, которые могут быть использованы как в процессе обработки, так и интерпретации экспериментальных данных, позволяя получать более объективное представление о строении изучаемой геологической среды. В частности, количественная информация об угловых атрибутах сейсмических границ позволяет более объективно анализировать историю осадконакопления в изучаемых геологических толщах.

Интерес к определению угловых характеристик отражающих границ (ОГ) по сейсмическим данным появился с самого начала развития сейсморазведки. Однако возмож-

ности сейсморазведки на ранних этапах ее развития ограничивали точность и достоверность решения задачи определения углов наклонов отражающих границ. Основные попытки определения углов наклона проводились с помощью использования кинематических годографов отраженных волн. При этом чаще всего использовались приемы, построенные на нахождении отношения разности времен прихода отраженных волн и разности координат в выбранных особым образом точках базы наблюдений. Технологичность, точность и достоверность таких определений была, как и у всех методов, использующих характерные точки годографов, невысокой.

В методе регулируемого направленного приема (МРНП), разработанного в СССР под руководством Л.А. Рябинкина, предполагалось определение углов подхода отраженных волн к поверхности наблюдений, как следствие, определение углов наклона сейсмических границ. Для этого в методе широко использовались кажущиеся скорости отраженных волн на фиксированных базах приема, что, к сожалению, не обеспечивало достаточной точности вычисления углов.

В настоящее время основным способом получения информации о строении геологической среды является сейсмический метод общей глубинной точки (МОГТ). Основные положения данного способа опубликованы в 1956 г. в патенте США Уильяма Мейна [1]. Этот метод предполагает получение детального представления о геологической среде на основе цифровой обработки совокупности специальным образом сформированных сейсмограмм, относящихся к равномерно расположенным по профилю общим средним точкам (ОСТ).

Сейсмограммы для каждой такой ОСТ подвергаются однотипной обработке с помощью целого ряда процедур, главными из которых являются ввод в трассы сейсмограмм статических и кинематических поправок и последующее горизонтальное суммирование таких трасс. В результате этих действий каждая сейсмограмма ОСТ превращается в одну трассу – суммотрассу будущего изображения среды – временного разреза или, после пересчетов времени отражения в глубину, глубинного разреза [2, 3]. На получаемых таким способом сейсмических разрезах хорошо прослеживаются изображения сейсмических границ по профилю, дающие объективное представление как о строении геологической среды, так и об углах наклона сейсмических границ, разделяющих отдель-

ные слои в среде. Таким образом, в способе ОСТ углы наклона границ определяются опосредованно по получаемым сейсмическим разрезам или структурным картам.

Однако такой способ построения временного (или глубинного) сейсмического изображения геологической среды позволяет получить хорошее представление о среде и об угловых характеристиках границ в разрезе только в том случае, если среда содержит отражающие границы с углами наклона не более 3–5 градусов. При больших углах наклонов отражающих границ способ ОСТ будет давать искаженное представление, как о строении среды, так и об углах наклона границ в среде, и это искажение тем сильнее, чем больше значения углов наклона отражающих границ. В силу этого обстоятельства для получения более правдоподобных сейсмических изображений среды применяют дополнительные специальные методы преобразования глубинных или временных разрезов – миграционные преобразования. В настоящее время разработано много видов миграционных преобразований, отличающихся по сложности и эффективности. Следует сказать, что сложность и трудоемкость этих методов достаточно велика.

Авторами на основе анализа особенностей и недостатков вышеназванных подходов решалась задача разработки нового, более эффективного способа получения высококачественных представлений об углах наклонов отражающих границ в геологической среде по сейсмическим данным, получаемым при выполнении работ методом многократных перекрытий в профильном варианте 2D.

#### **Материалы и методы исследования**

В основе способа лежит использование совокупности сейсмических трасс, объединенных общностью их фиксированных точек отражения (ФТО) на сейсмической границе. В качестве таких фиксированных точек отражения принято чаще всего рассматривать точки на отражающих границах, которые являются основаниями нормалей к каждой конкретной границе, проведенными из специально выбранных на профиле общих расчетных точек (ОРТ). Класс таких волновых полей в сейсморазведке впервые предложил рассматривать и использовать Н.Н. Пузырев. Более подробно кинематические свойства этих волновых полей впоследствии изучали С.В. Гольдин, А.Н. Левин, Г.Н. Яшков и др. [4], а также авторы предлагаемого способа В.И. Бондарев, С.М. Крылатков [5, 6].

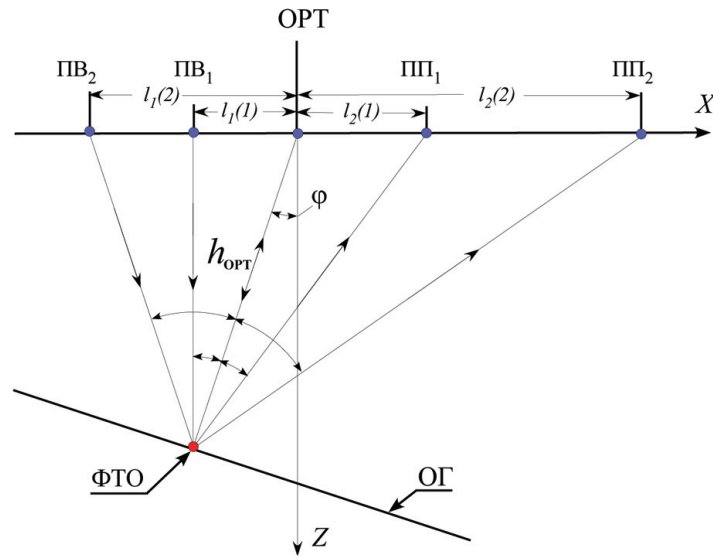


Рис. 1. Лучевая схема траекторий сейсмических волн ФТО. На рисунке показаны: одна из общих расчетных точек (ОРТ) на профиле исследований, отражающая граница (ОГ) с глубиной  $h_{ОРТ}$  под ОРТ и углом падения  $\varphi$ , а также одна ФТО, относящаяся к выбранной ОРТ. На поверхности наблюдений показаны положения двух пунктов возбуждения  $PВ_1$  и  $PВ_2$  и соответствующие им пункты приема колебаний  $ПП_1$  и  $ПП_2$

Рассмотрим лучевую схему траекторий сейсмических волн такого типа для одной отражающей границы и двух пунктов возбуждения  $PВ_1$  и  $PВ_2$  и двух пунктов приема колебаний на поверхности наблюдений  $ПП_1$  и  $ПП_2$ . Схема показана на рис. 1.

Для горизонтально залегающих отражающих границ кинематические свойства таких волновых полей совпадают со свойствами годографов от общих средних (глубинных) точек. Однако для наклонно залегающих отражающих границ годографы волновых полей этого типа существенно отличаются от годографов ОСТ.

Использование волновых полей фиксированных точек отражения при традиционной практике получения сейсмических изображений геологических сред по ряду причин пока не получило широкого распространения. Однако наши исследования показали, что волновые поля, соответствующие фиксированным точкам отражения рассматриваемого вида, можно с успехом использовать в сейсморазведке для решения целого ряда задач, в том числе и для решения задач по определению углов наклонов отражающих границ. Это связано с тем обстоятельством, что при фиксированном положении точки отражения на границе, свойства годографов таких волн начинают существенным образом зависеть от угла наклона отражающей границы. При многократном суммиро-

вании амплитуд сейсмических трасс, полученных при разных положениях ПВ и ПП для соответствующих фиксированных точек отражения (ФТО), появляется возможность построения такого амплитудного функционала, который может быть эффективным динамическим индикатором угловых характеристик отражающих границ. Именно эта особенность волновых полей ФТО и открывает перспективы создания автоматизированного подхода к определению угловых параметров изучаемых сейсмических границ.

Для фактического определения углов наклонов отражающих границ предлагается использовать ранее установленную авторами функциональную связь между координатами фиксированных точек отражения и координатами соответствующих пунктов возбуждения и приема колебаний [6]. Эта связь для ФТО рассматриваемого типа имеет следующий вид:

$$l_2 = \frac{l_1 \cdot h_{ОРТ}}{h_{ОРТ} - 2 \cdot l_1 \cdot \sin \varphi}, \quad (1)$$

где  $h_{ОРТ}$  расстояние от ОРТ до ФТО по нормали к границе,  $\varphi$  – угол наклона отражающей границы в этой точке,  $l_1$  – удаление источника от ОРТ,  $l_2$  – удаление приемника от ОРТ (рис. 1).

Решение поставленной задачи обеспечивается тем, что в выбранных на профиле исследований общих расчетных точках (ОРТ),

как правило, совпадающих с точками ОРТ, при известном по профилю наблюдений характере распределения по глубине численных значений эффективной скорости распространения упругих волн по набору трасс исходных сейсмограмм общих точек возбуждения (ОТВ) можно многократно формировать совокупности специально подобранных сейсмических трасс, объединенных тем, что отраженные волны на них возникают в конкретных фиксированных точках отражения (ФТО) на границе. Эти трассы подвергаются дальнейшему анализу.

Для получения практического результата нами предлагается оригинальная последовательность действий с зарегистрированными сейсмическими трассами, обеспечивающая получение в выбранных общих расчетных точках профиля достоверной динамической информации об углах наклона сейсмических границ в разрезе по результатам стандартных сейсморазведочных работ методом многократных перекрытий 2D.

Сейсмические трассы и сейсмограммы общих пунктов возбуждения, полученные по технологии метода многократных перекрытий МОГТ 2D, предварительно подвергаются стандартной в сейсморазведке обработке (вводу и коррекции статических поправок, компенсирующих влияние неоднородностей верхней части среды в пунктах возбуждения и приема колебаний, фильтрации и регулировке и т.п.). Для этого на профиле, проходящем ортогонально предполагаемому простиранию горных пород, с заданным шагом создают (выбирают) сеть общих расчетных точек (ОРТ), в которых и будет производиться определение угловых параметров отражающих границ. После этого в окрестности каждой выбранной ОРТ в заданной области нижнего полупространства создают регулярную по осям координат  $x$  и  $z$  локальную сеть расположения возможных (виртуальных) фиксированных точек отражения ФТО с заданными интервалами между точками  $\Delta z$  ( $2 \div 20$  м) по вертикали и  $\Delta x$  ( $4 \div 25$  м) по горизонтали (рис. 2).

Через каждую построенную виртуальную фиксированную точку отражения, имеющую заданные координаты  $x_{\text{ФТО}}$  и  $z_{\text{ФТО}}$ , может проходить одна плоская отражающая граница, нормаль к которой совпадает с прямой линией, соединяющей ФТО и ОРТ. Для всех таких точек рассчитыва-

ется кратчайшее удаление этой границы от ОРТ – глубина  $h_{\text{ОРТ}}$  и угол падения этой границы  $\varphi$  в фиксированной точке отражения под выбранной ОРТ (рис. 2):

$$h_{\text{ОРТ}} = \sqrt{x_{\text{ФТО}}^2 + z_{\text{ФТО}}^2},$$

$$\varphi = -\sin^{-1}\left(\frac{x_{\text{ФТО}}}{h_{\text{ОРТ}}}\right). \quad (2)$$

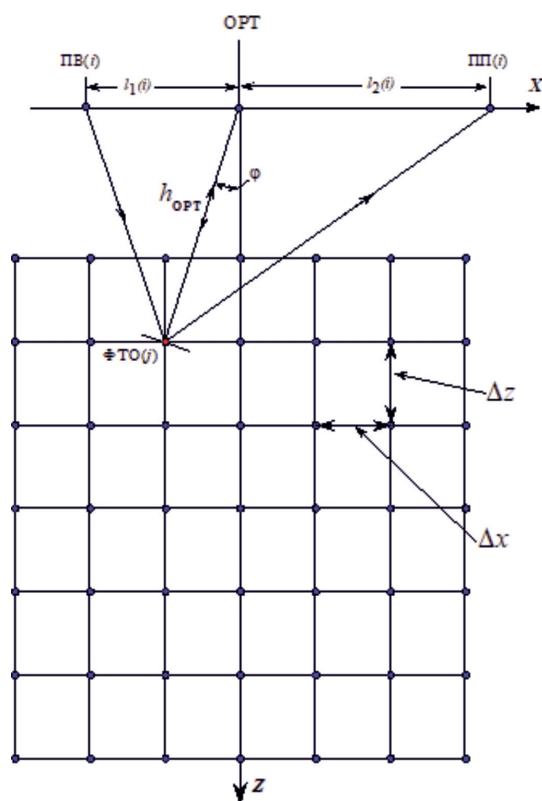


Рис. 2. Схема взаимного расположения пунктов возбуждения и пунктов приема сейсмических волн и точек сети, в узлах которой возможны отражения по принципу ФТО и где формируются значения целевой функции

Выбирают одну из таких возможных фиксированных точек отражения и один из существующих на профиле исследований пункт возбуждения ПВ( $i$ ). По вышеприведенной формуле (1) для этой пары точек рассчитывают координаты точки выхода ПП( $i$ ) отраженной волны на профиль наблюдений. Зная эффективную скорость в среде до глубины залегания конкретной ФТО, рассчитывают время пробега отраженной волны от ПВ до выбранной ФТО и от нее – до пункта ее регистрации ПП на профиле наблюдений:

$$t(l_1, l_2) = \frac{1}{V} \cdot \left( \sqrt{(x_{\text{ПВ}} - x_{\text{ФТО}})^2 + (z_{\text{ФТО}})^2} + \sqrt{(x_{\text{ПП}} - x_{\text{ФТО}})^2 + (z_{\text{ФТО}})^2} \right). \quad (3)$$

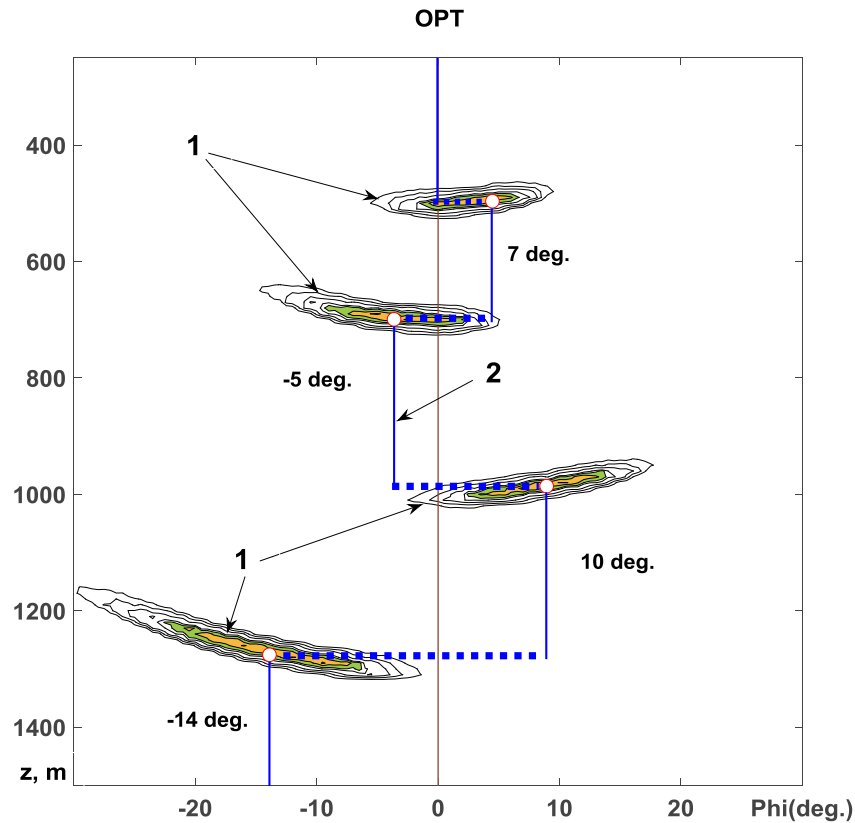


Рис. 3. Проявление наклонов отражающих границ на вертикальном спектре углов (карте значений специальной образом подобранной целевой функции). 1 – изолинии значений функции цели, 2 – график, показывающий характер изменения углов наклона границы по глубине в рассматриваемой точке ОПТ

По рассчитанному времени пробега отраженной волны на найденной наблюдаемой трассе находят значение амплитуды, характеризующее отражательную способность сейсмической границы в данной точке ФТО. Для повышения устойчивости процесса вычисления выбирают определенный ансамбль из нескольких амплитуд в окрестности найденного времени прихода отраженной волны. Сформированный ансамбль значений амплитуд отраженной волны переносят для последующего накопления в предварительно созданный сумматор на каждой ФТО. Аналогичным образом поступают и с амплитудами, полученными из всех других доступных пунктов возбуждения и во всех точках созданной сети ФТО. После накопления амплитуд в сумматоре для каждой ФТО выбирают какой-либо способ формирования из собранных суммарных амплитуд одного численного значения некоторой функции цели (ФЦ), характеризующего интегральную отража-

тельную способность этой ФТО (например, сумму квадратов всех амплитуд). После выбора способа формирования ФЦ во всех точках выбранной сетки по этому правилу рассчитывают значение этой функции для всех возможных ФТО в окрестности каждой ОПТ. Полученное для всех точек ФТО поле значений функции цели (ФЦ) анализируют на предмет обнаружения значимых локальных максимумов ФЦ. Координаты таких точек характеризуют глубину и угол наклона реальных отражающих границ в данной ОПТ.

#### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 3 показаны локальные значения функций цели (ФЦ) в системе координат глубина – угол наклона границ, по теоретическому волновому полю, соответствующему модели среды с четырьмя отражающими границами. Отчетливо видно, что предложенный способ позволяет достаточно уве-

ренно определять углы наклона отражающих границ в диапазоне до 15–20 градусов. Совокупности полученных результатов для ряда соседних ОРТ позволяют построить по сейсмическому профилю ряд графических зависимостей угловых параметров отражающих границ в разных точках изученного профиля [5]. Последующая статистическая обработка этих данных может быть использована как для получения новых сейсмических изображений среды [7], так и для формирования выводов об истории формирования изучаемого геологического разреза.

### Выводы

1. Разработана и обоснована методика определения углов наклона отражающих границ по исходным данным профильных многократных перекрытий МОГТ 2D.

2. В основу предложенной методики положена идея использования волновых полей фиксированных точек отражения.

3. Локализация экстремумов энергии отраженных волн при многократном суммировании отражений в некоторых фиксированных точках сейсмических границ позволяет находить как углы наклонов отражающих границ, так и их глубины залегания с достаточно высокой точностью.

### Список литературы / References

1. Mayne W.H. Seismic Surveying. U.S. Patent No. 2.732.906. 1956.
2. Ермаков А.П. Введение в сейсморазведку. Учебное пособие. Тверь: Изд. ГЕРС, 2012. 160 с.  
Ermakov A.P. Introduction to seismic exploration. Uchebnoye posobiye. Tver: Izd. GERS. 2012. 160 p. (in Russian).
3. Воскресенский Ю.Н. Полевая геофизика. Учебник для студентов высших учебных заведений. М.: Недра, 2010. 478 с.  
Voskresenskiy Yu.N. Field geophysics. Uchebnik dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy. M.: Nedra. 2010. 478 p. (in Russian).
4. Кузнецов В.И. Элементы объемной (3D) сейсморазведки. 2-е изд. Уфа: Информреклама, 2012. 269 с.  
Kuznetsov V.I. 3D seismic survey elements. 2-e izd. Ufa: Informreklama, 2012. 269 p. (in Russian).
5. Бондарев В.И., Крылатков С.М. Новые технологии анализа данных сейсморазведки. Екатеринбург: Изд. УГГУ, 2006. 116 с.  
Bondarev V.I., Krylatkov S.M. New technologies for analyzing seismic data. Ekaterinburg: Izd. UGGU, 2006. 116 p. (in Russian).
6. Бондарев В.И., Крылатков С.М. Способ определения углов наклона отражающих границ в геологической среде по данным профильной сейсморазведки 2D // Патент РФ № 2692001. Опубликовано: 19.06.2019. Бюл. № 17.  
Bondarev V.I., Krylatkov S.M. Method for determining the slope angles of reflecting boundaries in the geological environment based on 2D profile seismic survey data // Patent RF № 2692001. Opublikovano: 19.06.2019. Byul. № 17 (in Russian).
7. Никитин А.А., Петров А.В. Теоретические основы обработки геофизической информации: учебное пособие. 3-е изд., доп. М.: ВНИИгеосистем, 2013. 118 с.  
Nikitin A.A., Petrov A.V. Theoretical bases of processing of geophysical information: uchebnoye posobiye. 3-e izd., dop. M.: VNIIGeosistem. 2013. 118 p. (in Russian).