

А. Н. Никитченко, Д. А. Киященко, Ю. В. Киселев,  
Б. М. Каштан, В. Н. Троян

## МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ РАССЕИВАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ ПО ДАННЫМ ВЕРТИКАЛЬНОГО СЕЙСМОПРОФИЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО СУММИРОВАНИЯ

### Введение

Многие системы регистрации и методы обработки сейсмических данных предназначены для построения отражающих границ, определяющих основные черты геологической модели среды. Однако нередко интерес представляют также и рассеивающие объекты (дифракторы): разломы, неоднородности, соляные включения. Определение местоположения таких объектов может помочь в построении геологической концепции развития исследуемого региона, формировании резервуаров углеводородов и решении ряда задач для повышения эффективности нефтедобычи.

Одна из наиболее серьезных проблем, возникающих в процессе обнаружения дифрактора, заключается в том, что дифрагированные волны, как правило, имеют меньшие амплитуды, чем амплитуды отраженных волн. Это может быть вызвано либо малыми размерами дифрактора, либо слабым контрастом рассеивающей неоднородности. Если рассеянная компонента поля маскируется интенсивным фоном отражений, то требуется предварительное подавление отраженных волн для выделения дифрагированной волны.

Большинство методов определения местоположения дифрактора основано на соответствующих специальных методах предварительной обработки сейсмических данных и последующей обычной миграции. Например, предварительная обработка данных с использованием фильтра плоских волн [4, 7] позволяет подавить отраженные волны с меньшей кривизной годографа и выделить волны с более криволинейным годографом, который характерен для дифрагированных волн. Существует метод обнаружения дифракторов, основанный на фокусировке отраженных волн [5]. Идея данного метода состоит в том, что отраженные волны при определенных условиях могут быть сфокусированы в точечном минимуме источнике. Те волны, которые удается сфокусировать, подавляются при последующей обработке, оставляя только дифрагированные волны. Достаточно полный обзор методов обработки сейсмических данных, имеющих своей целью выделение дифрагированных волн, приведен в работе [2]. Эти методы позволяют в некоторой степени преодолеть трудность, связанную с малой амплитудой дифрагированных волн.

Во многих случаях извлечение информации, содержащейся в рассеянной компоненте поля, обеспечивается обычной глубинной миграцией или ее вариантами, исключая

щими суммирование отраженных волн [6]. Однако результат глубинной миграции напрямую зависит от правильности используемой скоростной модели среды, вследствие чего обычные методы миграции дают искаженное изображение среды, если структура верхних слоев известна с недостаточной точностью. В некоторых регионах приповерхностные слои настолько сложны и неоднородны, что результаты сейсморазведки практически не поддаются интерпретации. Метод виртуальных источников [1] был разработан для решения данной проблемы путем регистрации сейсмических данных в вертикальных, наклонных и горизонтальных скважинах. Целью данного метода является воссоздание данных, которые были бы получены для источника, помещенного на место одного из приемников в скважине. Но диаграмма направленности такого виртуального источника зависит от расположения реальных источников на поверхности. Так, для вертикальной скважины и источников на поверхности основной лепесток диаграммы, скорее всего, будет направлен в глубь среды и неоднородности, расположенные в стороне от скважины, не будут обнаружены.

В работе предлагается для локализации неоднородностей использовать метод кросс-корреляционного суммирования. Данный метод является фактически модификацией метода локализации источника путем дифракционного суммирования [3] для данных вертикального сейсмопрофилирования (ВСП). В работе [3] дифракционное суммирование применяется для поиска микросейсмического источника с неизвестным временем генерации. Дифрактор фактически является вторичным источником, возбуждаемым волнами, приходящими от поверхностных источников. Для построения изображения дифрактора в предлагаемом методе используются только времена хода от приемников до внутренних точек среды, что делает метод более устойчивым к ошибкам в задании скоростной модели в верхней части разреза. Метод опробован на модели со сложным приповерхностным слоем и точечным дифрактором, расположенным в нижележащем однородном полупространстве.

## 1. Метод локализации дифрактора

Основная идея метода определения местоположения дифрактора вблизи от скважины по данным ВСП заключается в следующем. Применяется простейшее описание распространения дифрагированной волны: возбужденная в источнике прямая волна доходит до рассеивающего объекта и порождает дифрагированную волну, которая затем регистрируется вместе с прямой и отраженными волнами приемниками в скважине. Таким образом, время хода дифрагированной волны состоит из двух частей: времени хода от источника до дифрактора  $t_1$  и времени хода от дифрактора до приемника  $t_2$  (рис. 1). Время хода от источника до дифрактора не зависит от положения приемника. В случае фиксированного источника сдвиг трассы по времени на величину  $t_2$  приводит к отсутствию кинематической зависимости рассеянного поля от положения приемника. После такого преобразования суммирование трасс, отвечающих различным приемникам при фиксированном источнике, приводит к когерентному сложению дифрагированных волн (рис. 2).

Если же мы проведем данную операцию для точки пространства, отличной от истинного положения дифрактора, то суммирование по приемникам не будет когерентным. Таким образом, значение суммы дифрагированных волн будет меньше, чем для истинного положения дифрактора.

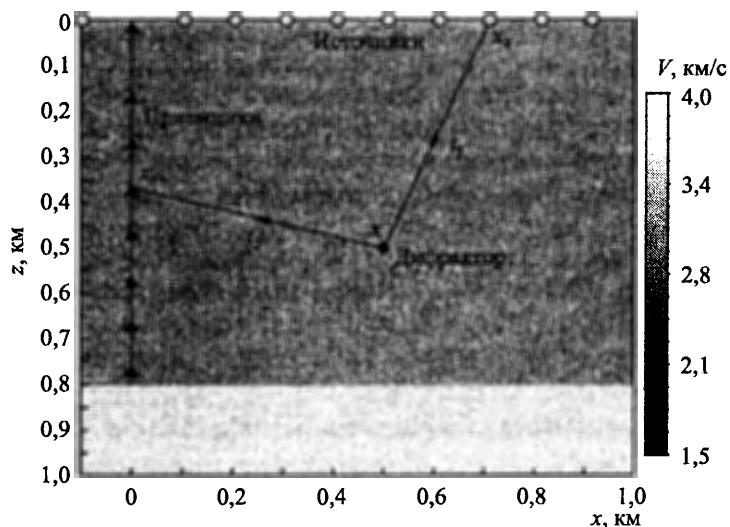


Рис. 1. Схема наблюдений и луч дифрагированной волны

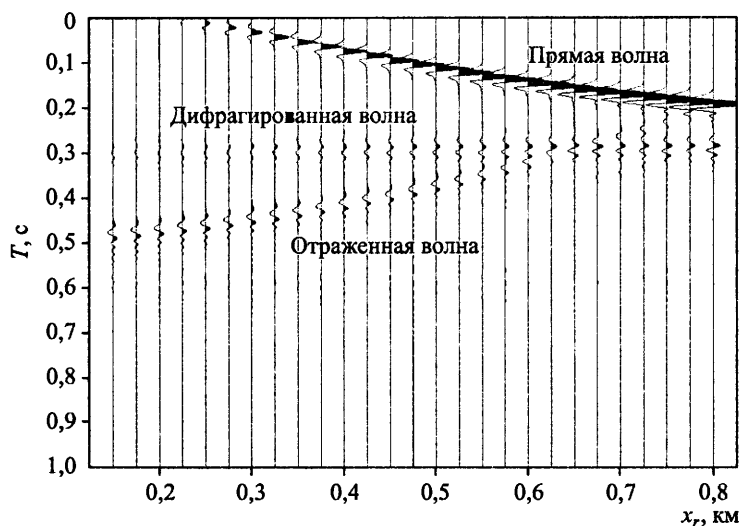


Рис. 2. Сейсмограмма общего пункта взрыва после временного сдвига

Введем временные поправки с помощью операции кросс-корреляции:

$$D(\vec{x}, \vec{x}_s, \vec{x}_r, t) = \int S(\vec{x}_r, \vec{x}, \tau) U(\vec{x}_s, \vec{x}_r, \tau + t) d\tau,$$

где  $U(\vec{x}_s, \vec{x}_r, t)$  — волновое поле, зарегистрированное в точках наблюдения  $\vec{x}_r$ ;  $\vec{x}_s$  — координаты источника;  $\vec{x}$  — координаты внутренней точки среды;  $S(\vec{x}_r, \vec{x}, t)$  — поле волны,

распространяющейся от тестируемой точки среды  $\vec{x}$  до точки наблюдения в скважине  $\vec{x}_r$ . Поле  $S(\vec{x}_r, \vec{x}, t)$  вычисляется конечно-разностным методом с использованием принципа взаимности (фиктивный источник располагается в скважине на месте приемника  $\vec{x}_r$ ). Предполагается, что скоростная модель среды в области поиска дифрактора известна и диаграмма направленности дифрагированной волны не зависит от положения источника  $\vec{x}_s$  на поверхности. Изображение среды строится с помощью следующей формулы:

$$I(\vec{x}) = \sum_{\vec{x}_s} \sum_t \left( \sum_{\vec{x}_r} D(\vec{x}, \vec{x}_s, \vec{x}_r, t) \right)^2,$$

где выполняется суммирование величин кросс-корреляции  $D(\vec{x}, \vec{x}_s, \vec{x}_r, t)$ , соответствующих рассматриваемым точкам наблюдения, с последующим возведением в квадрат. После этого суммирование осуществляется по временным отсчетам и источникам. Использование кросс-корреляции обладает преимуществами в случае более сложной структуры околоскважинного пространства, требующей применения конечно-разностного или иного нелучевого метода расчета волновых полей. Такая необходимость может возникнуть даже в модели слоисто-однородной среды. При построении изображения используются только времена хода от приемников, расположенных в скважине, до внутренних точек среды, что позволяет не учитывать строение среды в верхней части разреза. Этот факт подтверждается результатами численного моделирования.

## 2. Влияние сложного поверхностного слоя

Рассмотрим влияние поверхностного слоя на результаты миграции Кирхгофа и предлагаемого метода локализации дифрактора на примере двух моделей сред: однородной среды с точечным дифрактором и аналогичной среды со сложным приповерхностным слоем (рис. 3, а, б). Мощность приповерхностного слоя 150 м, средняя скорость

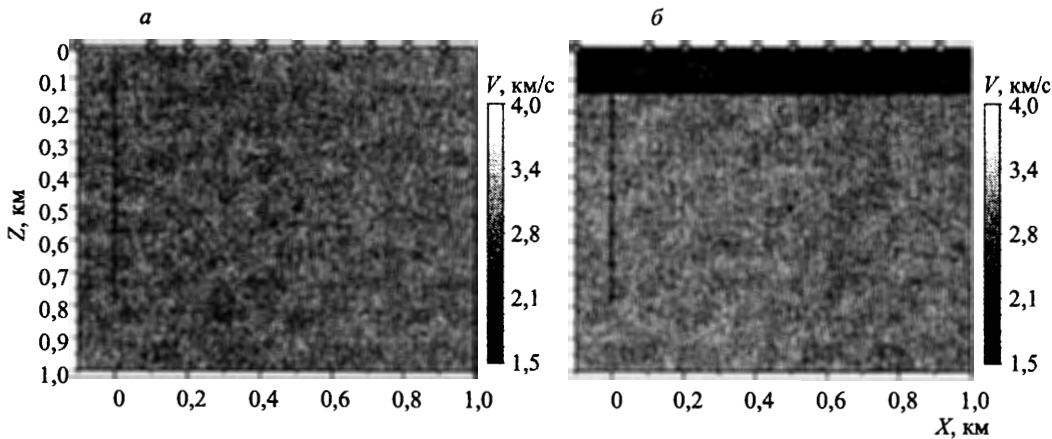


Рис. 3. Скоростные модели рассматриваемых сред:

а — однородная среда с точечным дифрактором; б — среда со сложным поверхностным слоем и точечным дифрактором

в слое 2.25 км/с. Скорость в нижележащем полупространстве 3 км/с. Приемники находятся в скважине ( $X=0$ ) на глубинах  $Z$  от 150 до 800 м с шагом 25 м, а источники расположены на поверхности ( $Z = 0$ )  $X$  от  $-2000$  до  $2000$  м с шагом 50 м. Число приемников и источников составляет соответственно 27 и 81. В качестве временной функции воздействия в источнике используется импульс Риккера с частотой 25 Гц.

Для построения изображений среды используется однородная скоростная модель (3 км/с — скорость в полупространстве). Результаты миграции Кирхгофа в случаях отсутствия и наличия приповерхностного слоя изображены на рис. 4, а, б. Миграция хорошо локализует дифрактор в случае правильной скоростной модели, но в случае неправильной скоростной модели (со сложным приповерхностным слоем) изображение дифрактора сильно искажено. Лучший результат получается при использовании скоростной модели с однородным слоем, скорость в котором равна средней скорости в сложном приповерхностном слое (рис. 4, в). Результат миграции Кирхгофа для этой

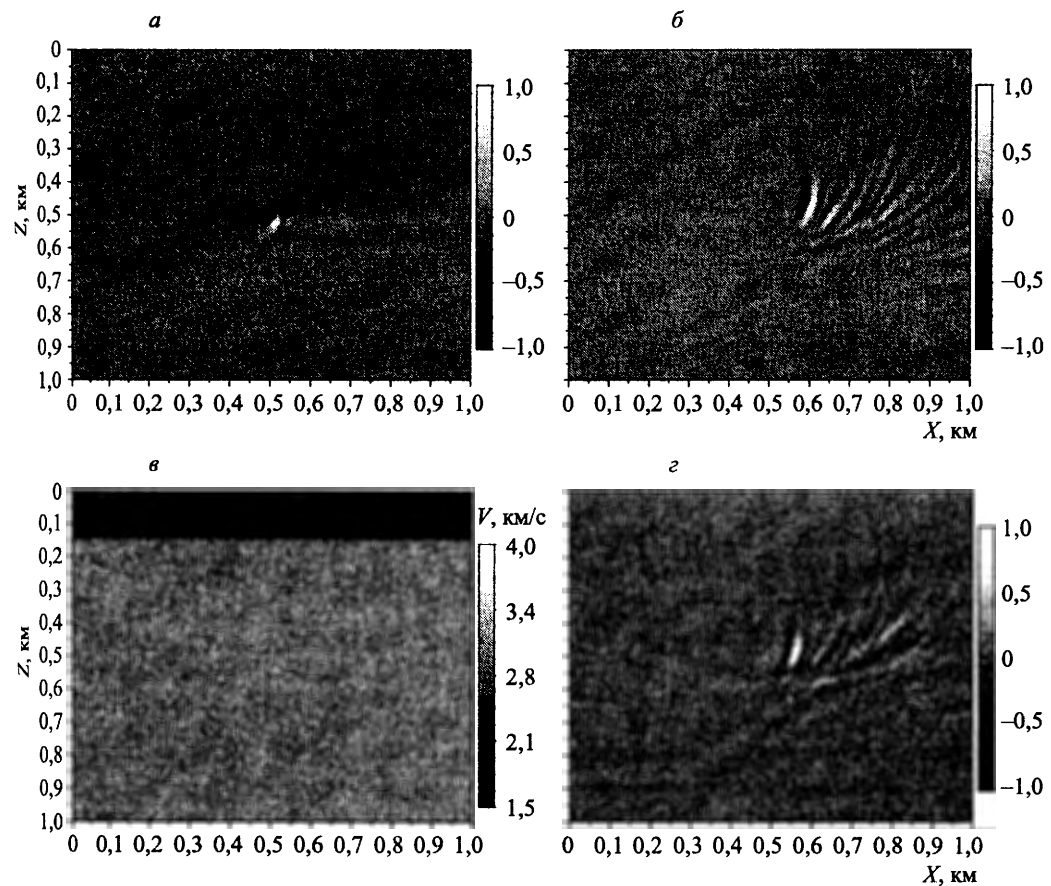


Рис. 4. Результаты классической миграции Кирхгофа:

а — среда без сложного поверхностного слоя; б — среда со сложным поверхностным слоем; в — скоростная модель; г — изображение среды, получающееся при использовании данной скоростной модели

скоростной модели представлен на рис. 4, *г*. Однако и в этом случае изображение дифрактора остается существенно искаженным.

Результаты предложенного метода локализации дифрактора для случаев отсутствия и наличия сложного приповерхностного слоя изображены на рис. 5. Для построения изображений среды используется однородная скоростная модель. В случае сложного поверхностного слоя качество полученного изображения дифрактора практически такое же, как и в случае однородной модели. Полученные результаты иллюстрируют возможность применения данного метода для определения местоположения дифракторов около скважины, если структура верхних слоев среды неизвестна.

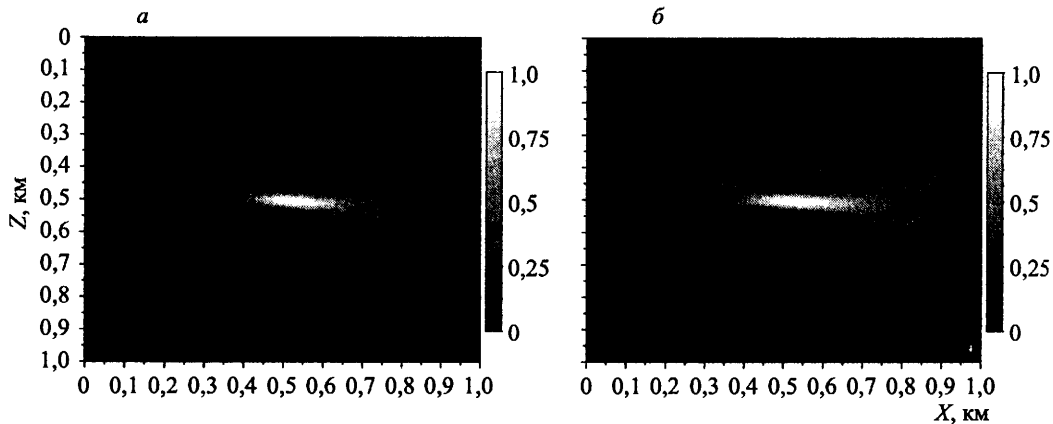


Рис. 5. Результаты локализации дифрактора:

*а* — среда без сложного поверхностного слоя; *б* — среда со сложным поверхностным слоем

Рассмотренная модель достаточно проста: среда под приповерхностным слоем однородна и контраст рассеивателя велик. Соответственно, поле дифрагированной волны сильно и не маскируется интенсивным фоном отраженных и проходящих волн. В случае слабого контраста рассеивателя возникает проблема его выделения на фоне артефактов, появившихся в результате присутствия более интенсивных волн.

Таким образом, предложенный метод позволит обнаружить лишь достаточно контрастные рассеиватели. В дальнейшем планируется изучение влияния контрастности рассеивателя, скоростной модели и системы наблюдения на результаты метода.

## Заключение

Предложен метод локализации дифрактора по данным ВСП. Проведено сравнение результатов данного метода с результатами классической миграции. Предложенный метод менее чувствителен к ошибкам в скоростной модели среды и может использоваться для определения местоположения дифрактора, расположенного вблизи скважины, в случае сложного распределения скорости в верхней части разреза, если миграция не дает удовлетворительных результатов. Дальнейшие исследования будут посвящены опробованию данного метода на моделях, отвечающих конкретным месторождениям и применению для обработки реальных данных.

Авторы выражают благодарность Shell E&P за финансирование данной работы (CRDF grant NRUG1-30006-ST-08). Работа также частично профинансирована грантом РФФИ (№ 08-05-00285).

#### Указатель литературы

1. *Bakulin A., Calvert R.* The virtual source method: theory and case study // *Geophysics*, 2006. V. 71. P. SI139–SI150.
2. *Bansal R., Imhof M.* Diffraction enhancement in pre-stack seismic data // *Geophysics*, 2005. V. 70, V. 73–79.
3. *Gajewski D. J., Anikiev D., Kashtan B., Tessmer E., Vanelle C.* Source location by diffraction stacking: EAGE 69 conference and exhibition. 2007.
4. *Fomel S.* Application of plane-wave destruction filters // *Geophysics*, 2002. V. 67. P. 1946–1960.
5. *Khaidukov V., Landa E., Moser T. J.* Diffraction imaging by focusing-defocusing: An outlook on seismic superresolution // *Geophysics*, 2004. V. 69. P. 1478–1490.
6. *Moser T. J., Howard C. B.* Diffraction imaging in depth // *Geophysical Prospecting*, 2008. V. 56. P. 627–641.
7. *Taner T.* Separation and imaging of seismic diffractions using plane-wave decomposition: 76th SEG Annual Meeting Expanded Abstracts, 2006.