

## ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДИФРАКЦИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ

Бондарев В.И., Крылатков С.М., Курашов И.А.

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, Россия (620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30) e-mail: [bondarev\\_v@mail.ru](mailto:bondarev_v@mail.ru)

В статье показаны возможности выделения дифрагированных волн в сейсмическом волновом поле при помощи специального алгоритма преобразования исходных сейсмических трасс. Для его реализации каждая исходная сейсмическая трасса пересчитывается на группу заданных бинов, с последующим суммированием в каждом из них, что позволяет получать сейсмические изображения высокой кратности и четкости. Такая технология обработки данных совместно с заложенной в ней возможностью выноса точки отнесения сейсмической записи за пределы установки «источник-приемник» позволит эффективно выделять как рассеянную, так и зеркальную составляющие волнового поля, и получать соответствующие изображения рассеивающих или зеркальных объектов. Полученные данные могут быть использованы при уточнении физико-геологической модели месторождений углеводородов с целью выделения границ зон трещиноватости, дробления и т.п.

Ключевые слова: разрезы равного удаления, сейсмическая миграция, трещиноватость, моделирование, рассеянные волны, дифракция, отражающая граница, нефтяное месторождение, разведка.

## TECHNOLOGY FOR SEISMIC DATA PROCESSING BASED ON ANALYSIS OF DIFFRACTION COMPONENT OF WAVE FIELD

Bondarev V.I., Krylatkov S.M., Kurashov I.A.

Ural state mining university, Yekaterinburg, Russia (620144, Yekaterinburg, Kuybysheva st., 30) e-mail: [bondarev\\_v@mail.ru](mailto:bondarev_v@mail.ru)

The paper shows the possibility of the diffracted waves separating in the seismic wave field with a special algorithm of converting of the original seismic traces. To implement of the procedure, each of the source seismic traces converted to a special area of bins, with a subsequent summation for each bin. It allows to obtain the seismic images with high resolution and high stack fold. This technology of data processing allows to use the removal areas from the source-receiver system as the target bin groups. Such approach would effectively separate the scattering and specular component of the wave field, and obtain the special seismic images of the diffraction or specular objects. The obtained data can be used to optimize the physical and geologic models of hydrocarbon deposits, by highlighting of the boundaries of zones of fracturing, crushing, etc.

Key words: common offset gather, seismic migration, fracturing, modeling, scattered waves, diffraction, reflection border, oil deposit, exploration.

### Введение

В настоящее время при поиске и разведке месторождений нефти и газа сейсмические исследования призваны решить ряд новых задач. Одной из них является задача оценки количественных характеристик степени и характера дезинтеграции горных пород, главным образом – для областей с высокой степенью открытой трещиноватости. Особенно важным определением этих характеристик среды становится на нефтяных месторождениях с карбонатным типом коллектора, где дебиты скважин обусловлены в первую очередь именно структурным фактором [5].

Для решения этой задачи можно использовать те типы сейсмических волн, которые в практике стандартных сейсмических работ на нефть и газ по методике многократных перекрытий воспринимаются как маскирующие полезный сигнал факторы. Это

дифрагированные, рассеянные и дуплексные волны. Основными инструментами для их изучения могут быть методы локализации источников таких волн при помощи специальных методик полевых работ [2] или новые приемы обработки сейсмических записей, получаемых при стандартных сейморазведочных наблюдениях, позволяющие получать как изображения источников этих волн, так и разностные волновые поля [1].

Среди методов, направленных на решение поставленной задачи по определению источников дифрагированных и рассеянных волн с помощью полевых наблюдений, в первую очередь необходимо упомянуть способ, получивший наименование «сейсмический локатор бокового обзора» (СЛБО) [4]. Он предусматривает создание вне изучаемой площади таких апертур излучения и приема, расположение которых позволяет эффективно подавлять зеркальные волны. После специальной обработки способ позволяет получать трехмерные изображения распределения энергии рассеянных волн, величина которой напрямую связана с индексом открытой трещиноватости.

Среди способов, позволяющих выделять области концентрации источников рассеянных и дифрагированных волн в процессе обработки, можно выделить способ миграционного изображения рассеивающих объектов (МИРО) [4] и различные варианты методик фокусирующих преобразований, например,  $F$ -преобразования [6]. Как и СЛБО эти методы позволяют строить и анализировать отдельные изображения компонент сейсмического волнового поля с выделением либо преимущественно зеркальных, либо преимущественно дифрагированных компонент. Общим элементом всех указанных подходов является выполнение анализа сейсмического волнового поля на основе физических принципов распространения дифрагированных волн.

#### **Формулировка задачи и способа решения**

В данной работе предлагается перспективный способ получения отдельного изображения полей зеркально отраженных и рассеянных волн. Первые связаны с объектами, по размерам сравнимыми с радиусом первой зоны Френеля, природа вторых связана с рассеянием сейсмической энергии в среде на весьма малых по сравнению с длиной волны объектах. Алгоритм решения данной задачи предполагает множественный пересчет наблюдаемых сейсмических трасс на пикеты профиля или площади исследований, различным образом расположенные относительно средней точки интервала «источник-приемник». При этом вклад сейсмических трасс, пересчитанных для областей, находящихся в районе средней точки, может специальным образом ослабляться для устранения зеркальной составляющей волнового поля. Таким образом, реализуется сразу два фактора, необходимых для локализации рассеянного излучения. Во-первых, за счет пересчета трасс на различные точки профиля или площади мы можем получать данные очень высокой

кратности и, следовательно, значительно повысить статистическую достоверность получаемых данных. Во-вторых, при пересчете сейсмических трасс на области, удаленные от используемого интервала «источник-приемник», мы получаем возможность искусственно создавать системы наблюдения с боковым типом обзора, которые оптимальны для регистрации рассматриваемых не зеркальных сейсмических волн.

Такой подход позволяет с достаточной степенью надежности определять положение источников рассеянных и дифрагированных волн и выделять зоны повышенной трещиноватости. При этом не требуется никаких дополнительных полевых работ, и появляется возможность повторной обработки ранее полученных материалов.

### **Результаты исследований**

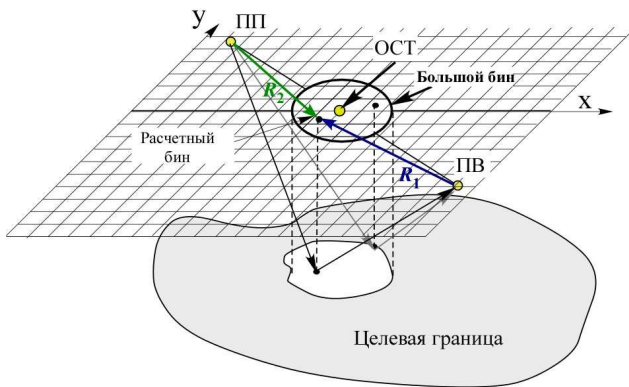
В основе предлагаемого метода обработки данных лежит предположение о том, что каждая зарегистрированная сейсмическая трасса сейсмограммы общей точки возбуждения (ОТВ) может рассматриваться как результат интерференционного суммирования множества дифрагированных и отраженных волн, образованных существующими в геологической среде протяженными или локальными неоднородностями. Эти неоднородности в геологической среде можно представлять в виде малого по размерам отражающего элемента с произвольной пространственной ориентировкой, либо в виде малой области неоднородности упругих параметров среды. Будем называть эти два типа объектов «сейсмическим дифрактором». Если считать, что главную долю в волновом поле составляют отраженные волны, то наиболее вероятным является расположение сейсмического дифрактора в плане – посередине между источником и приемником. Гипотеза же о возможном вкладе рассеянных волн предполагает, что каждая наблюденная трасса ОТВ может содержать информацию о строении среды под различными точками на поверхности наблюдений, в том числе и не лежащими на линии источник-приемник. Если считать, что могут выполняться оба предположения, то каждая наблюденная трасса сейсмограммы ОТВ может быть пересчитана в совокупность трасс  $t_0$  (с введенными кинематическими поправками) для множества точек на плоскости наблюдений. Выполняя многократно такие пересчеты для различных наблюденных трасс, полученных для разных пар «источник-приемник» (ПВ-ПП), можно для каждой точки в плоскости наблюдений с координатами  $x$ ,  $y$  (точки центра некоторого бина) – получить массив трасс  $t_0$ , конструктивная интерференция которых в этой точке и будет давать изображение источников волн – реальных дифракторов или отражателей. Совокупность трасс  $t_0$  в этих бинах и составит основу искомого временного (или глубинного) сейсмического изображения среды по линии профиля или в пространстве.

Вид формул пересчета зависит от принятой скоростной модели среды. В частности, для эффективной скоростной модели формулы для такого имеют следующий вид:

$$t_0(x_D, y_D) = \sqrt{t^2(x_D, y_D) - \frac{2}{V^2} \cdot (R_1^2 + R_2^2) - \frac{(R_1^2 - R_2^2)^2}{V^4 \cdot t^2(x_D, y_D)}},$$

$$\text{где } R_1 = \sqrt{(x_D - x_{ПВ})^2 + (y_D - y_{ПВ})^2}; R_2 = \sqrt{(x_{ПП} - x_D)^2 + (y_{ПП} - y_D)^2};$$

$t(x_D, y_D)$  – текущее время на наблюдаемой трассе;  $x_{ПВ}$ ,  $y_{ПВ}$ ;  $x_{ПП}$ ,  $y_{ПП}$ ;  $x_D$ ,  $y_D$  – координаты на плоскости наблюдений соответственно пункта возбуждения, пункта приема и центра бина, в который трансформируется каждая наблюдаемая трасса  $t(x_D, y_D)$ . Схема, поясняющая



**Рис.1. Схема, поясняющая выполнение трансформации одной из трасс ОТВ**

принцип преобразования, и используемые в формулах обозначения приведены на рис.1. Для получения динамического временного разреза каждое значение амплитуды наблюдаемой сейсмической трассы на любом времени  $t(x_D, y_D)$  переносится на соответствующее пересчитанное время трассы временного разреза  $t_0(x_D, y_D)$ . В результате такого перенесения амплитуд мы в каждом бине с центром в точке  $x_D, y_D$  расчетной сети получаем некоторое множество пересчитанных трасс  $t_0(x_D, y_D)$ , количество которых будет определять кратность итогового временного разреза в данном бине. После этапа пересчета происходит суммирование этого набора сейсмических трасс  $t_0$  и отнесение суммарной трассы к центру выбранного бина.

Весьма важным при выполнении таких пересчетов является вопрос о размере области, в которой могут находиться координаты точек пересчета  $x_D$  и  $y_D$  для любой наблюдаемой трассы, и ее положении на поверхности наблюдений между источником и приемником. Размеры и положение области – регулируемые параметры, изменение которых влияет на получаемый разрез. Будем называть эту область поверхности наблюдений “большим бином”, а ее площадь обозначим  $S_{БВ}$ . Выбор размеров, формы и положения центра большого бина могут зависеть как от глубинности исследований, так и от расстояния между источником и приемником. Минимальный размер большого бина мы, очевидно, должны связывать с размером первой зоны Френеля на основном целевом горизонте исследований. Для удобства и простоты расчетов выберем большой бин в форме круга, радиус которого свяжем с радиусом зоны Френеля и удалением источник-приемник следующим образом:

$$R = R_0 + kL,$$

где  $R_0$  – радиус первой зоны Френеля,  $L$  – удаление источник-приемник,  $k$  – коэффициент определяющий степень влияние размера установки наблюдения на размеры большого бина.

Положение центра большого бина на плоскости исследований относительно координат ПВ, ПП и ОСТ зависит от того, какие конечные цели будут поставлены при формировании сейсмических изображений. Если основная цель заключается в получении таких изображений где выделяются преимущественно отраженные волны от субгоризонтальных границ раздела в среде, то центр большого бина должен совпадать с положением ОСТ для каждой пары ПВ и ПП. Если размер большого бина будет небольшим и соизмеримым с размером бина в методе МОГТ, то способ формирования сейсмического изображения с такими параметрами большого бина идеологически будет близок к МОГТ.

Если же мы хотим в сейсмическом изображении увидеть преимущественно дифрагирующие объекты в среде или отражающие границы с большими углами наклона, то центр большого бина может быть смещен на линии профиля от ОСТ в сторону либо ПВ, либо ПП, или находиться на некотором удалении в сторону от линии источник-приемник. В последнем случае при правильно подобранных размерах большого бина и положения его центра можно настроить систему приема на регистрацию дифрагированных волн от ослабленных зон геологической среды, что является частичной аналогией метода СЛБО.

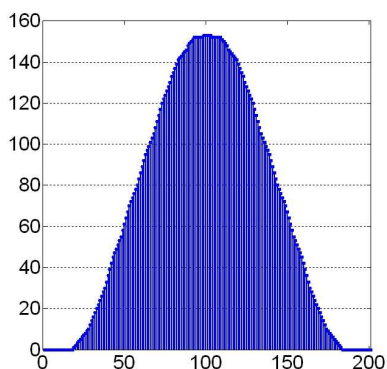
Еще одним немаловажным вопросом в данной технологии является вопрос о том, сколько точек пересчета следует размещать в пределах большого бина и как это делать? Если совокупность трасс, необходимых для построения сейсмического изображения, мы будем отождествлять с множеством узлов сети расчетных бинов, то центрами расчетных бинов являются координаты точек, в которые выполняется пересчет  $(x_D, y_D)$ . Проведенные нами исследования показали, что размер расчетных бинов можно выбирать достаточно малым, например, 10\*10 м и менее. При этом было установлено, что размер сети расчетных бинов, в отличие от классической технологии обработки данных МОГТ, может не зависеть от параметров методики полевых работ 3D (от удалений между ПП, ПВ, линиями ПП, линиями ПВ и др.). В результате оказывается, что кратность суммирования в предлагаемой технологии (при использовании бинов с размерами, применяемыми сегодня при работах МОГТ) может быть в 5–15 раз (для работ 2D) и 50–200 раз (для работ 3D) выше, чем в стандартной технологии МОГТ. Авторами получена формула, позволяющая оценить кратность накопления, максимально достигаемую в центре большого бина. Эта формула приводится для варианта МОГТ-3D:

$$F_{3D} = SD \cdot NC \cdot S_{BB} \cdot \frac{N_1}{N_2} \cdot 10^{-6},$$

здесь  $SD$  – плотность источников (ПВ) на 1 км<sup>2</sup> съемки;  $NC$  – среднее количество активных каналов, приходящихся на 1 ПВ;  $S_{BB}$  – площадь большого бина в м<sup>2</sup>;  $N_1$  –

количество расчетных бинов, в которые осуществляется пересчет каждой наблюдаемой трассы;  $N_2$  – общее количество расчетных бинов, входящих в состав большого бина.

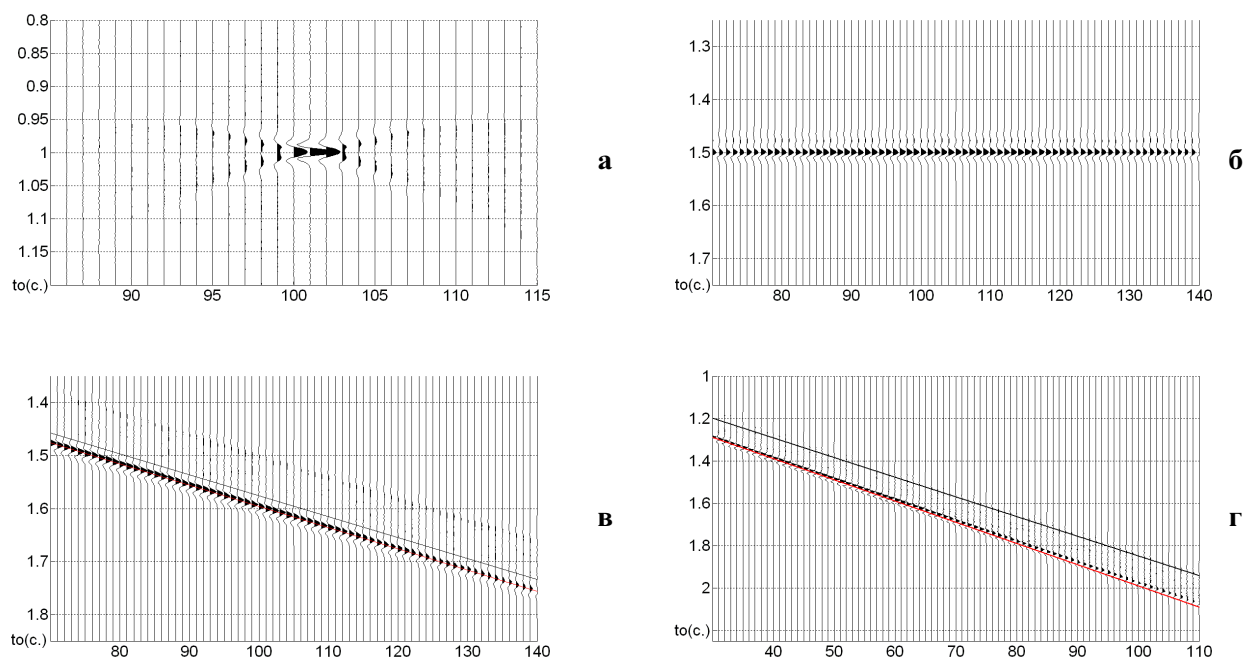
Для проверки эффективности предлагаемого способа было выполнено его опробование на теоретических сейсмограммах, рассчитанных для системы наблюдений 2D. Анализировались возможности получения сейсмических изображений дифракторов, горизонтальных и наклонных отражающих границ. Для заданных сейсмических моделей рассчитывались теоретические сейсмограммы ОТВ, которые далее подвергались описанным выше преобразованиям. Одновременно анализировалась достигнутая кратность накопления для каждого расчетного бина. Совокупность полученных суммарных трасс  $t_0$  отождествлялась с сейсмогеологической моделью среды. Проверялось также влияние случайных шумов в исходных сейсмограммах на работу алгоритма.



**Рис. 2. Характер распределения кратности наблюдений по профилю**

Для моделирования был использован участок профиля длиной 5000 м. Предполагалось, что скоростные характеристики среды хорошо описываются с помощью эффективной скорости. В большинстве моделей эффективная скорость была принята постоянной и равной 2000 м/с. Расчеты велись для центральной системы наблюдений. На базе наблюдений располагался 61 приемник с шагом 50 м.

Расстановка вместе с ПВ перемещалась по профилю с шагом 250 м. ПВ располагались в интервале профиля от 1500 м до 3500 м. Общее их количество было 9. Профиль покрывался сетью расчетных бинов, центры которых располагались на удалении 25 м друг от друга. На рис.2 показана зависимость величины кратности накоплений, достигнутая по описываемой технологии в центре большого бина, от номера бина. Ниже приводятся несколько примеров получения сейсмических изображений, которые демонстрируют эффективность технологии при получении изображений для четырех сейсмических моделей.



**Рис.3. Фрагмент временного разреза, полученный путем трансформации сейсмограмм ОТВ, для модели 1 – а, модели 2 – б, модели 3 – в и модели 4 – г**

Первая модель представляет собой одиночный дифрактор в однородной среде. В результате обработки, как и следовало ожидать, было получено хорошо сфокусированное волновое изображение дифрактора в его истинном месте в разрезе. В модели 2 задавалась горизонтальная отражающая граница. Обращаем внимание на то, что какой-либо дополнительной обработке, кроме регулирования амплитуд, разрезы после суммирования не подвергались. Модели 3 и 4 включали наклонную отражающую границу с малым и большим углом падения соответственно. Фрагменты временных разрезов, полученные по предлагаемому нами способу, показаны на рис.3. Линиями черного цвета показано положение отражающей границы, которое по тем же сейсмограммам ОТВ могло быть получено с использованием стандартной технологии обработки МОГТ, без миграции. Линии красного цвета показывают действительное положение моделируемой границы на временном разрезе. Из этого примера видно, что в предложенном способе мы получаем, как и следует из теории [3], мигрированные временные разрезы.

### **Выводы**

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- предлагаемый способ обладает широкими возможностями для получения сейсмических изображений рассеянных или зеркальных компонент волнового поля;
- предложенная технология получения сейсмических изображений, основанная на широком использовании дифракционных представлений о природе регистрируемых сейсмических волновых полей, позволяет получать качественные изображения исходных

сейсмических моделей сред. Это дает основания полагать, что возможно получение аналогичных по качеству изображений и для экспериментальных волновых полей;

- получаемые волновые изображения обладают высокой кратностью, которая на один-два порядка выше, чем традиционные изображения в МОГТ-3D, в некоторых случаях может обеспечить сокращение количества используемых пунктов возбуждения;

- сейсмические изображения геологической среды по данной технологии могут быть получены по существенно более густой (в 2–3 раза) сети расчетных бинов, нежели это реально достижимо в традиционных методиках МОГТ-2D или МОГТ-3D;

- предложенная технология обработки идеально подходит для обработки сейсмических данных, получаемых по нерегулярной сети наблюдений. Это особенно может быть перспективным при переходе полевой технологии работ на бескабельную телеметрическую аппаратуру регистрации.

### **Список литературы**

1. Бондарев В.И., Крылатков С.М. Новые технологии анализа данных сейсморазведки. - Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2006. - 126 с.
2. Бондарев В.И., Крылатков С.М. Сейсморазведка: учеб. для вузов: в 2 т. - Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2011. - Т.1. - 402 с.; Т.2. - 408 с.
3. Клаербоут Д.Ф. Сейсмическое изображение земных недр. - М.: Недра, 1989. - 407 с.
4. Козлов Е.А. Модели среды в разведочной сейсмологии. - Тверь: Издательство ГЕРС, 2006. - 480 с.
5. Писецкий В.Б., Крылатков С.М. О коэффициенте Пуассона нефтяных коллекторов с дискретной структурой // Известия вузов. Горный журнал. - 2005. - №1. - С. 115-121.
6. Рослов Ю.В., Ефимова Н.Н., Кремлев А.Н., Павленкин А.Д. Сейсмические признаки флюидопотока и связанных с ним залежей // Геофизика. - 2009. - №2. - С. 26-30.

### **Рецензенты:**

Писецкий В.Б., профессор, д.г.-м.н., зав. кафедрой геоинформатики Федерального бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования “Уральский государственный горный университет”, г. Екатеринбург.

Сковородников И.Г., профессор, д.г.-м.н., профессор кафедры геофизики Федерального бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования “Уральский государственный горный университет”, г. Екатеринбург.