

Н. Я. Мармалевский, канд. техн. наук, геофизик,
А. С. Костюкевич, канд. физ.-мат. наук, президент компании,
Г. Б. Дуброва, геофизик
(Tetrale Grope, Канада)

МИГРАЦИЯ ДУПЛЕКСНЫХ ВОЛН И ПРИБЛИЖЕНИЕ УГОЛКОВЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

Рассмотрены две технологии, направленные на формирование изображений субвертикальных границ. Первая технология является упрощенной и основана на свойствах уголкового отражателя, позволяющих формировать сейсмограммы центровых лучей сфокусированных дуплексных волн. Вторая технология – это миграция дуплексных волн (МДВ), основанная на интеграле Кирхгофа. Показано, что даже при небольшом искажении вертикальности уголкового отражателя (в нашем случае 10°) результат обработки по упрощенной технологии уступает МДВ и может привести к ошибочным заключениям. Показано также, что упрощенный метод, основанный на технологии уголкового отражателя, не поддерживает формирование изображения вертикальных границ для случая PSS дуплексных волн.

Ключевые слова: вертикальные границы, угловые отражатели, дуплексные волны, миграция дуплексных волн.

Введение

Для прослеживания вертикальных границ, к которым относятся стенки соляных штоков, высокопроницаемые коридоры, малоамплитудные нарушения и др., в последние годы используются дуплексные волны [2, 3, 5, 6 и др.]. Эти волны благодаря двум отражениям: от субгоризонтальной границы, а затем от субвертикальной (или наоборот) достигают поверхности наблюдения. Это позволяет получить при наземной сейсморазведке информацию о простирании, наклоне и акустических свойствах субвертикальной границы. Для этой цели используются различные алгоритмы миграции дуплексных волн (МДВ). Одной из разновидностей МДВ является миграция, основанная на интеграле Кирхгофа [6]. При таком подходе для расчета функции Грина, кроме глубинно-скоростной модели, используется субгоризонтальная отражающая граница, являющаяся

одним из отражателей, формирующих дуплексную волну.

В зависимости от системы наблюдений можно получать сейсмические изображения субвертикальных границ в диапазоне углов наклона отражающих границ ± 70 – 90° относительно горизонтали. Важным является то, что при МДВ целевая субвертикальная граница не обязательно должна быть зеркально отражающей. Это может быть также рассеивающий объект, представляющий собой шероховатую границу с изменяющимися локальными наклонами и акустическими свойствами, что часто наблюдается в природе.

Другая возможность получения информации о субвертикальных границах заключается в аппроксимации элементов формирующих дуплексные волны уголковыми отражателями [4]. В простейшем случае уголкового отражателя представляет собой взаимно перпендикулярную

пару отражающих границ. В двумерном варианте такой отражатель возвращает волну назад в источник. В трехмерном случае это происходит только тогда, когда плоскость распространения волны перпендикулярна простиранию вертикальной границы. Обработка данных с целью получения информации о наличии субвертикальной границы в этом случае существенно упрощается. В частности, это происходит потому, что оказывается легко получить разрез центральных лучей, в котором энергия дуплексной волны сосредотачивается в пределах годографа, имеющего кинематику дифрагированной волны относительно точки пересечения вертикальной и горизонтальной границ углового отражателя. В то же время, если мы имеем дело с дифрагированной волной, сформированной неким дифрагирующим объектом, то свойства такой волны будут отличаться от свойств углового отражателя, что позволяет отличить один случай от другого. Это бывает весьма важно при решении ряда практических задач.

Вместе с тем, работая в рамках технологии, связанной с угловыми отражателями, важно иметь представление о пределах возможностей такого подхода. В работе [4] отмечается, что латеральное изменение скорости и не вертикальность отражателей влияет на основные свойства угловых отражателей. В данной

работе мы на модельных примерах показываем сравнение технологий угловых отражателей и МДВ на основе интеграла Кирхгофа. В частности, демонстрируется влияние небольшой не вертикальности отражателей на возможность получения информации о субвертикальной границе на фоне более сильных отражений от горизонтальных границ.

Методы формирования изображений

Формирование дуплексной волны наиболее просто себе представить при помощи мнимого источника такой волны S^* . Выше было отмечено, что существует два типа дуплексной волны: NV , когда волна сначала падает на горизонтальную границу, а потом на вертикальную, и VH , когда лучевая схема обратная: сначала вертикальная граница, а потом горизонтальная. Для формирования источника S^* для NV дуплексной волны нужно последовательно получить два мнимых источника: сначала для горизонтальной границы S^h , а потом из источника S^h формируется источник S^* относительно вертикальной границы. При строго вертикальной и горизонтальной паре границ мнимый источник S^* для NV и VH дуплексных волн совпадает.

На рис. 1 показано формирование мнимого источника S^* . Из рисунка видно, что волна из мнимого источника, проходя через пересечение вертикальной и горизон-

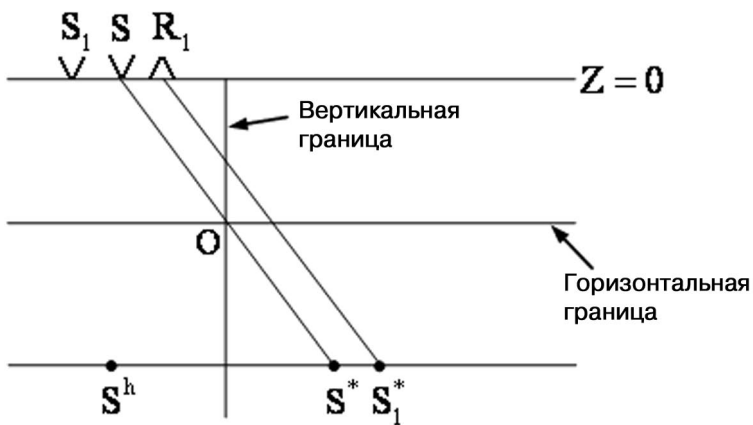


Рис. 1. Формирование мнимого источника дуплексной волны

тальной границ O , возвращается в истинный источник колебаний S , что является характерным свойством уголкового отражателя. Если теперь пару взаимно вертикальных границ вращать вокруг точки O , то свойство возврата луча в точку истинного источника колебаний не изменится. Таким образом, более просто мнимый источник S^* можно получить, соединив точку S с точкой O и продлив линию дальше на расстояние, равное SO .

Если принять координату точки S за координату общей средней точки (ОСТ), то для следующего источника S_1 , формирующего точку ОСТ, положение мнимого источника будет S_1^* . Оно сдвинется на такое же расстояние, как и соответствующий приемник, формирующий указанную точку ОСТ. Таким образом, отрезки S^*S и $S_1^*S_1$ будут равны. В этом заключается одно из важных свойств уголкового отражателя: горизонтальность годографа ОСТ для дуплексной волны. Причем это справедливо не только для монотипных дуплексных волн, например, PPP, но и для обменных PSS.

На рис. 2а показана модель, состоящая из горизонтальной границы и низкоскоростного вертикального слоя. Практически это уголкового отражателя. На рис. 2б показана сейсмограмма общего пункта возбуждения, полученная в результате полноволнового упругого моделирования в пакете Tesseral-2D. Продольная

дуплексная волна PPP показана красной стрелкой, а обменная PSS показана желтой стрелкой. Видны также волны других сочетаний обменов. На рис. 2в показана одна из сейсмограмм ОСТ, на которой дуплексные волны PPP (красная стрелка) и PSS (желтая стрелка) горизонтальны.

Простейшим видом фокусировки дуплексных волн, используя указанное выше свойство уголкового отражателя, является суммирование трасс в рамках сейсмограммы ОГТ без введения НМО. В результате такой процедуры формируется сейсмограмма центровых лучей, в которой отражение от горизонтальной границы ослабляется, а дуплексные волны усиливаются за счет синфазного накопления. Кинематически сфокусированная дуплексная волна формально представляет собой волну дифракции от точки пересечения горизонтальной и вертикальной границы. Дальнейшая фокусировка дуплексной волны в формальное изображение точки дифракции происходит при помощи обычной пост стек миграции [1]. В отличие от этого, в случае применения МДВ формируется изображение субвертикальной границы.

Результаты обработки синтетических данных

Сейсмограмма центровых лучей, полученная описанным выше способом для модели, показанной на рис. 2, демонстрирует

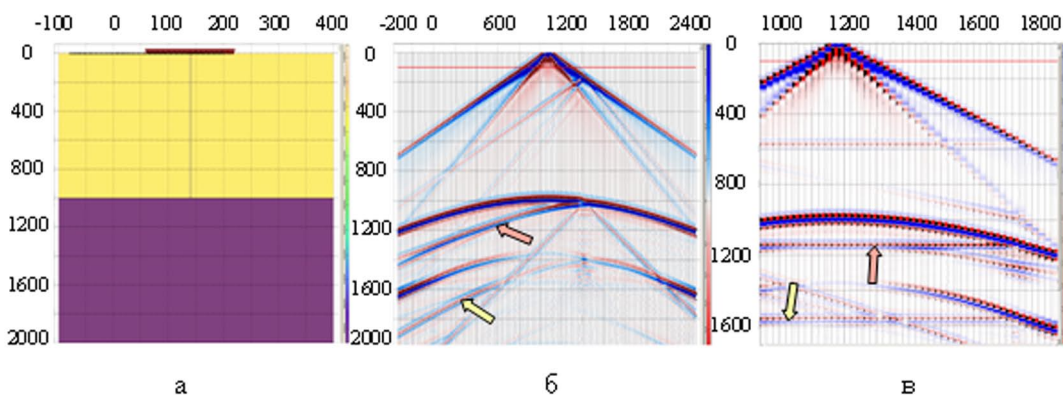


Рис. 2. Модель 1 (а), сейсмограмма ОПВ (б) и сейсмограмма ОГТ (в)

руется на рис. 3а. На рис. 3б показана фокусировка дуплексной волны в формальное изображение точки дифракции для продольной волны. На рис. 3в показано изображение точки дифракции для обменной дуплексной волны.

Изображение фокуса PPP дуплексной волны значительно лучше, чем PSS дуплексной волны. Причина этого заключается в том, что в случае обменной волны суммирование сейсмограмм ОСТ без введения кинематической поправки не формирует соответствующую сейсмограмму центровых лучей. МДВ обменных волн не имеет указанного ограничения [7].

На рис. 4 показано изображение вертикальной границы, полученное при помощи МДВ. В данном случае использовались не суммированные данные, но в качестве входных данных могут быть использованы и сейсмограммы центровых лучей. В случае МДВ соотношение полезного сигнала (вертикальная граница) к помехе (горизонтальная граница) в 2–3 раза выше, чем в случае обработки данных по технологии уголковых отражателей.

Из простых соображений, вытекающих из рис. 1, следует, что описанная выше техника получения изображений формальных точек дифракции из дуплекс-

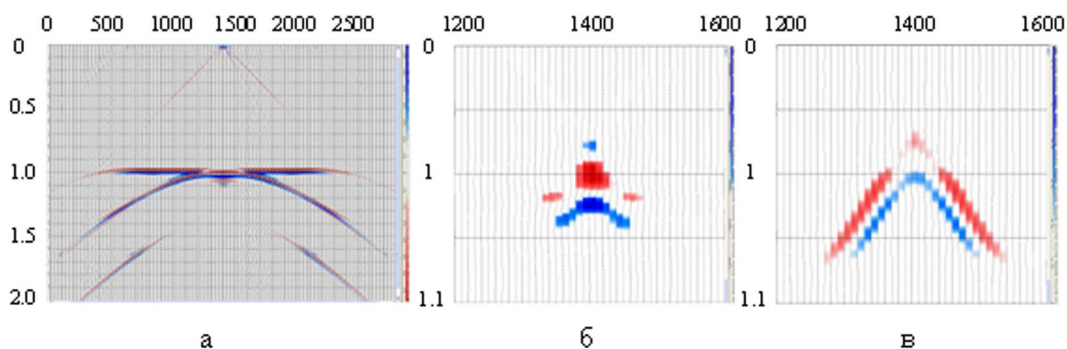


Рис. 3. Сейсмограмма центровых лучей, полученная по модели 1 (а), дуплексные волны, сфокусированные в изображения точек дифракции для продольной PPP-волны (б) и обменной PSS-волны (в)

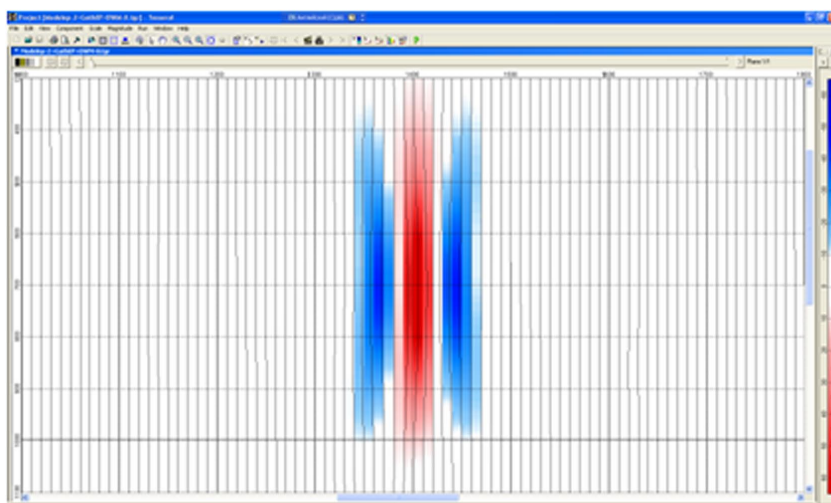


Рис. 4. Изображение вертикальной границы, полученное при помощи МДВ

ных волн справедлива и при VTI-анизотропной среде. На рис. 5а показана сейсмограмма центровых лучей дуплексных волн в случае VTI-анизотропной среды при значении параметров Томсона $\epsilon=-0,2$, $\delta=0,2$. На рис. 5б показана фокусировка дуплексной волны в анизотропном случае.

Каковы же пределы допустимости использования описанной выше технологии? Поскольку понятно, что такие пределы существуют, каждый конкретный случай должен быть рассмотрен отдельно. Наиболее надежно такие заключения могут быть сделаны на основе моделирования. Изменим модель, показанную на рис. 2а, наклонном вертикальной границы на угол 10° .

Указанная модель показана на рис. 6а. На рис. 6б показана одна из сейсмограмм ОСТ, полученная для данной модели, а на рис. 6в демонстрируется сейсмограмма центровых лучей для дуплексных волн. Как видно из последнего рисунка, интенсивность дуплексной волны значительно уступает однократно отраженной волне. Форма формальной дифрагированной волны также искажена.

На рис. 7а показан результат миграции центровых лучей для случая с наклонной границей, а на рис. 7б результат МДВ. Как можно видеть из этих рисунков, качество изображения субвертикальной границы, полученной при помощи МДВ,

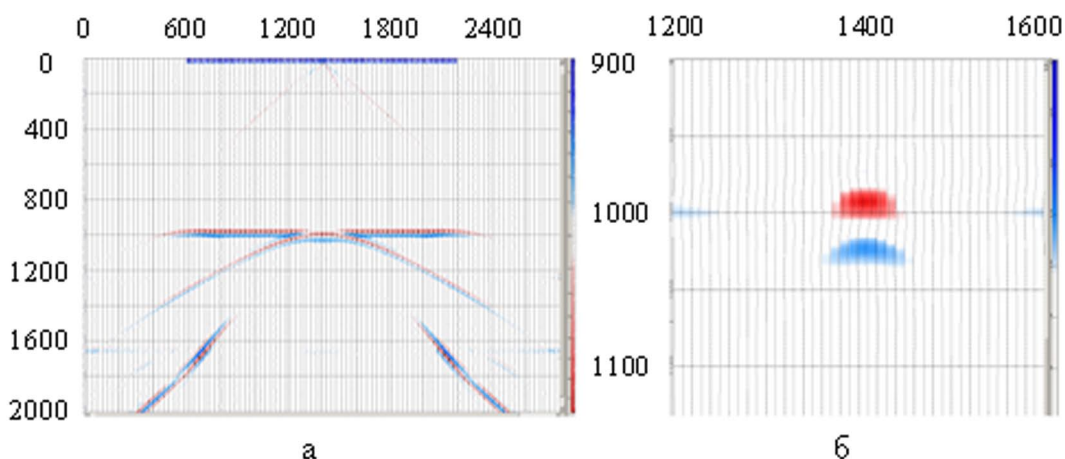


Рис. 5. Сейсмограмма центровых лучей для дуплексной волны (а) и дуплексная волна, сфокусированная в изображение точки дифракции (б) для VTI среды

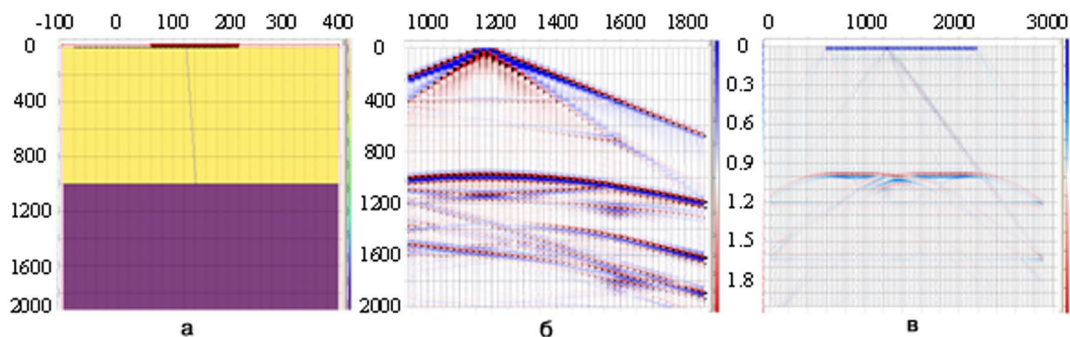


Рис. 6. Модель 2 с наклонной границей (а) и сейсмограмма ОСТ (б), сейсмограмма центровых лучей для дуплексной волны (в)

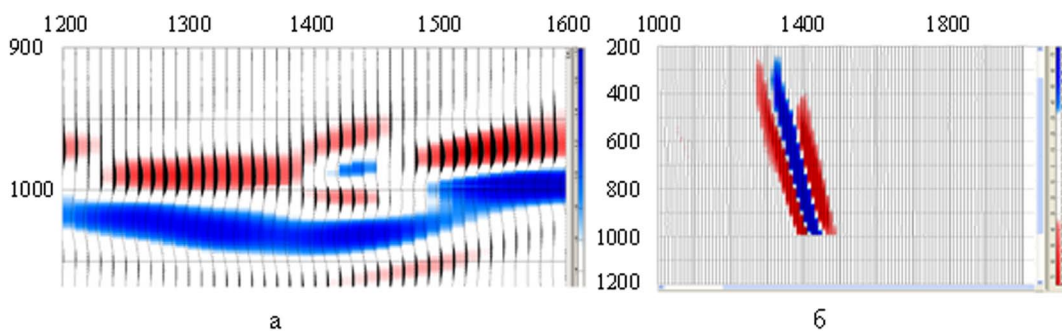


Рис. 7. Результат миграции центровых лучей дуплексных волн для наклонной границы (а) и миграции дуплексных волн при помощи МДВ (б)

не ухудшилось по сравнению со случаем вертикальной границы. В то же время результат фокусировки дуплексной волны, полученный по технологии уголковых отражателей, оказался значительно хуже.

В том случае, когда размер вертикального объекта меньше длины волны, дуплексная волна вырождается в дифрагированную. При этом миграция на основе преобразования данных по технологии уголковых отражателей с последующей пост стек миграцией приводит к серьезным искажениям результата.

На рис. 8 показана модель, в которой вертикальные объекты расположены в горизонтальном слое толщиной 40 м на глубине 2700 м. Модель была построена С. Горбачевым (LARGEO, Москва). Она содержит шесть вертикальных пластов,

мощностью 7 м каждый. Указанные пласты отличаются скоростными и плотностными параметрами относительно вмещающей породы. На рисунке показаны отличия скоростей в процентах, из которых видно, что вертикальные пласты заполнены как акустически более мягкими, так и более жесткими породами относительно вмещающего материала.

На рис. 9, где показана сейсмограмма центровых лучей для дуплексных волн, полученная на основе синтетических сейсмограмм для модели, приведенной на рис. 8, соотношение амплитуд дуплексной/дифрагированной волны к амплитуде однократно отраженной волны (горизонтальная граница) очень низкое. Это приводит к тому, что вертикальные объекты, которые формируются по технологии

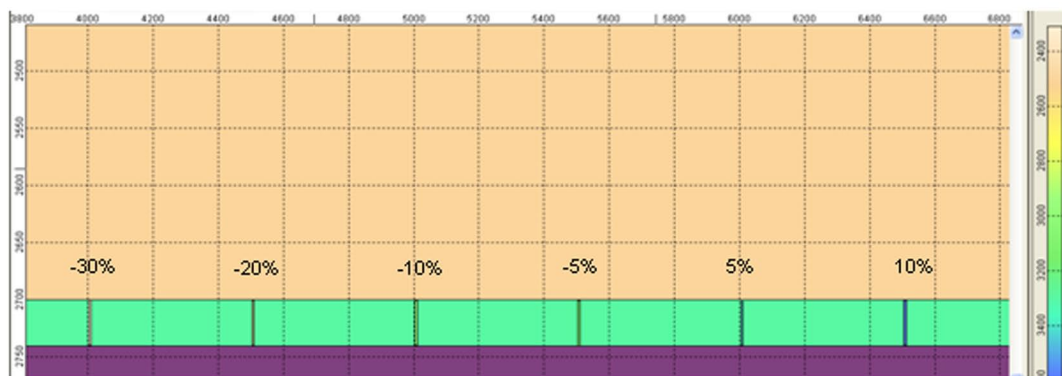


Рис. 8. Глубинно-скоростная модель тонкого пласта с шестью вертикальными пластами, отличающимися разными акустическими свойствами относительно вмещающей породы

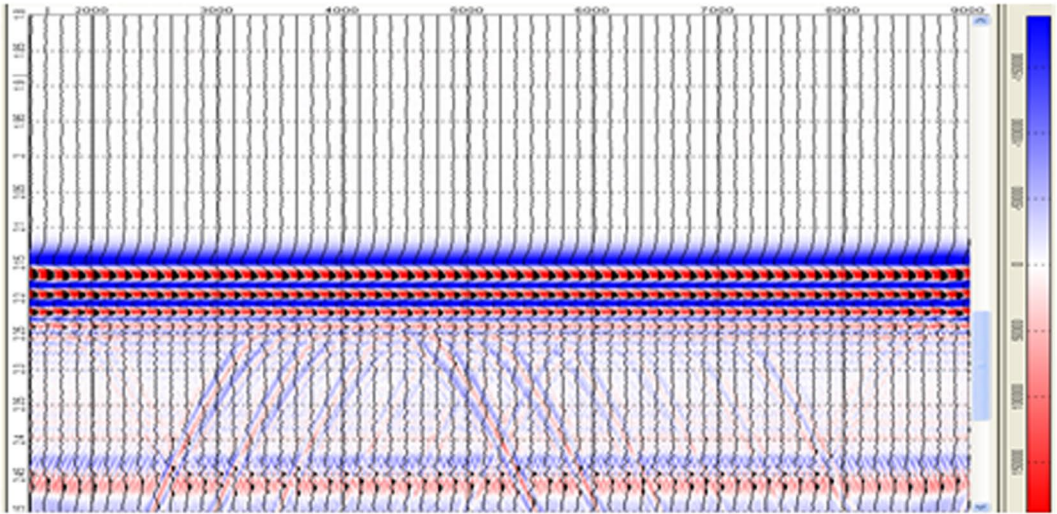


Рис. 9. Сейсмограмма центральных лучей для дуплексных волн для модели, показанной на рис. 8

уголковых отражателей путем пост стек миграции сейсмограммы центральных лучей для дуплексных волн, плохо фокусируются на фоне более сильной однократной отраженной волны.

На рис. 10 показаны два изображения. Слева изображение, полученное по технологии уголковых отражателей после пост стек глубинной миграции подборки, показанной на рис. 9, и изображение, полученное на основе миграции дуплексных волн (справа). Как видно из второго изображения, оператор миграции дуплексных волн поддерживает как диффрагированные, так и дуплексные

волны. На этом изображении правильно восстановлено не только положение вертикальных объектов, но и их динамические свойства в полном соответствии с моделью. Применение технологии уголковых отражателей в данном случае приводит к серьезным искажениям результата.

Выводы

Рассмотрены две технологии, направленные на формирование изображений субвертикальных границ. Первая технология является упрощенной и основана на свойствах уголковых отражателей,

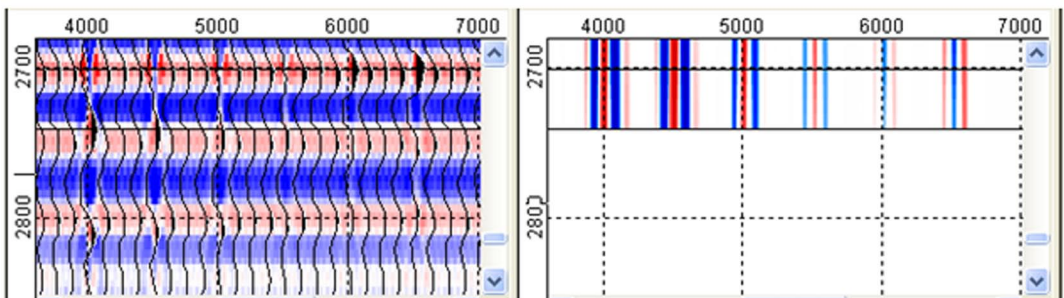


Рис. 10. Изображение, полученное по технологии уголковых отражателей после пост стек глубинной миграции подборки, показанной на рис. 9 (слева), и изображение, полученное на основе миграции дуплексных волн (справа)

позволяющих формировать сейсмограммы центровых лучей сфокусированных дуплексных волн. Вторая технология – это миграция дуплексных волн, основанная на интеграле Кирхгофа, применяемого к несуммированным данным. Показано, что даже при небольшом искажении вертикальности уголкового отражателя (в нашем случае 10°) результат обработки по упрощенной технологии уступает МДВ и может привести к ошибочным заключениям.

К серьезным искажениям изображения объектов, связанных с вертикальными границами, приводит также случай, когда размер объекта по вертикали сравним с длиной волны, а дуплексная волна вырождается в дифрагированную. В то же время миграция дуплексных волн поддерживает миграционный оператор как относительно дуплексной, так и дифрагированной волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Твердохлебов Д. Н.* Разработка методики выделения и использования сейсмических волн от дизъюнктивных нарушений с целью повышения надежности и детальности их картирования: Автореф. дис. ... канд. техн. наук/

Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина. М., 2011.

2. *Farmer P. A., Jones I. F., Zhou H., Bloor R. I., Goodwin M. C.* Application of reverse time migration to complex imaging problems//First Break, 24. 2006. P. 65–73.

3. *Khromova I., Link B.* Fracture Delineation Case History from Russia and implications for plays in North America//80th Ann. Internat. Mtg., SEG. Expanded Abstract, 2010. P. 297–301.

4. *Kozlov E. A., Koren Z., Tverdohlebov D. N., Badeikin A. N.* Corner reflectors – a new concept of imaging vertical boundaries//71th EAGE Conference & Exhibition, Expanded Abstracts, Z 39. 2009.

5. *Malcolm A. E., De Hoop M. V., Ursin B.* Recursive imaging with multiply scattered waves using partial image regularization: A North Sea case study//Geophysics. 76, № 2. 2011. P. B33–B42.

6. *Marmalyevskyy N., Gornyak Z., Kostyukevych A., Mershchiy V., Roganov Y.* Method, system and apparatus for interpreting seismic data using duplex waves. Patent US 7,110,323 B2. 2006.

7. *Marmalevskiy N., Roganov Y., Kostyukevych A., Roganov V.* Duplex wave migration and interferometry for imaging onshore data without angle limitations//70th EAGE Conference & Exhibition, Expanded Abstracts. 2008.

Рукопис отримано 10.10.2013.

Розглянуто дві технології, спрямовані на формування зображень субвертикальних границь. Перша технологія є спрощеною і базується на властивостях кутових відбивачів, що дають змогу формувати сейсмограми центрових променів сфокусованих дуплексних хвиль. Друга технологія – це міграція дуплексних хвиль, яка базується на інтегралі Кірхгофа. Показано, що навіть при невеликому спотворенні вертикальності кутового відбивача (у нашому випадку 10°) результат обробки за спрощеною технологією поступається МДВ і може призвести до помилкових висновків. Показано також, що спрощений метод, заснований на технології кутових відбивачів, не підтримує формування зображення вертикальних границь для випадку PSS дуплексних хвиль.

Ключові слова: вертикальні границі, кутові відбивачі, дуплексні хвилі, міграція дуплексних хвиль.

Two techniques for imaging of sub-vertical boundaries were studied. The first technique is a simplified approach and based on a corner reflector property which allows to create a zero-offset gather for focused duplex waves. The second technique is a duplex wave migration based on Kirchhoff integral. It was shown that even small deviation from a vertical direction of a corner reflector (by 10 degrees in our case) will result in that the processing with a simplified technique may lead to a wrong interpretation. We also showed that simplified processing of duplex waves generated by corner reflectors may not be applied to a general case of PSS duplex wave.

Keywords: vertical boundaries, corner reflectors, duplex waves, duplex waves migration.