

# Многократные дифракции и регулярные помехи в данных морской сейсморазведки

Multiple diffractions and coherent noise in marine seismic data

Neil Hargreaves и Richard Wombell из Veritas DGC, Crawley, UK обращают внимание на проблему устранения кратных дифракций, присутствующих в данных морской сейсморазведки.

Во многих регионах мира в данных морской сейсморазведки присутствуют кратные отраженные волны от донных неоднородностей (многократные дифракции), которые нельзя подавить при помощи типовых методик обработки, направленных на подавление кратных волн. Такие помехи можно наблюдать в данных глубоководных районов, таких как прибрежная зона западной Африки или Мексиканский залив, где в морском дне присутствуют каньоны и другие отдельные неоднородности, а также в данных, полученных в регионах северных широт, например, в Норвегии или на Аляске, где после прохождения ледников отложились обломки различных пород. Многократные дифракции характеризуются относительно высокими амплитудами, не периодичны и по своей природе трехмерны. Стандартные методики подавления кратных волн, основанные на периодичности или на приращении времени пробега кратной волны, не справятся с подавлением данного типа кратных волн, как 2D подходы к поверхностно-согласованному подавлению кратных волн (2D SRME).

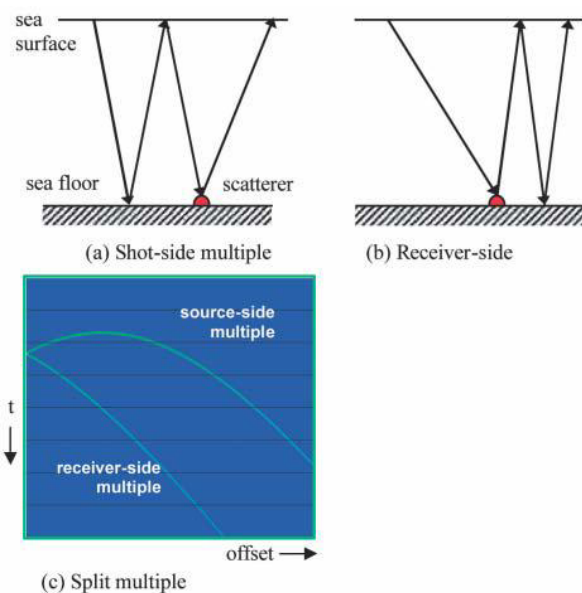
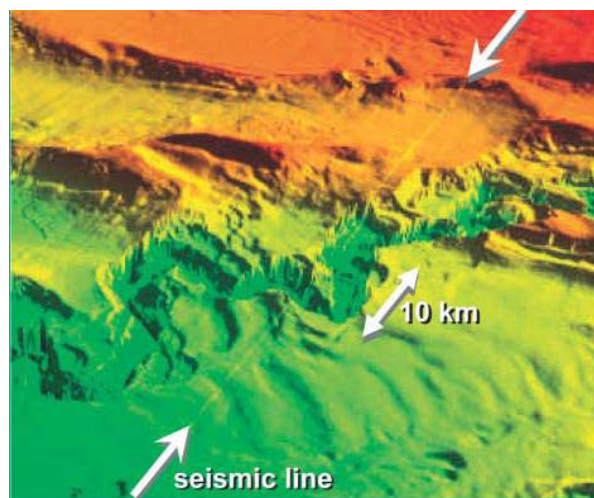


Рис. 1 на (a) и (b) показаны траектории лучей кратных волн, отраженных от морского дна с неоднородностями, расположенными между источником и приемником. Время прихода кратных волн разное при отражении со стороны источника и со стороны приемника. На (c) показана сейсмограмма ОИТ с двумя отдельными многократными дифракциями.



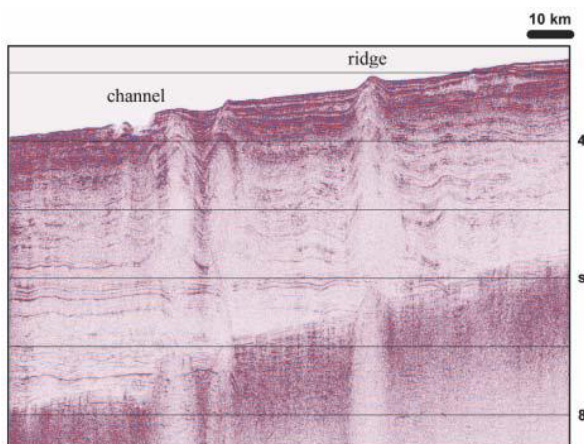
vertical exaggeration 20:1

Рис. 2 Карта морского дна прибрежной зоны западной Африки. На морском дне располагается подводный канал и другие особенности, которые являются причиной появления «многократных дифракций» — кратных волн от неоднородностей морского дна.

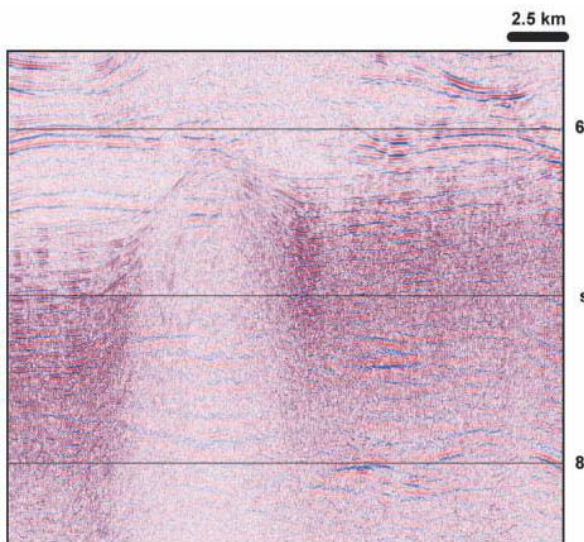
В предыдущей работе (verWest, 2002) было показано, что минимум (или максимум) кривой приращения времени пробега многократных дифракций и кратных волн от погружающихся слоев на сейсмограммах ОСТ может быть смещен от нулевого удаления. Вдобавок, как показано на рис. 1, кратные волны могут иметь две разные траектории в зависимости от отражения со стороны источника или приемника. Из такого поведения приращения времени пробега следует, что возможная стратегия подавления многократных дифракций — расширение многоаспектной модели Радона с включением в пространство моделей сдвинутых вверх осей синфазности (Hargreaves и др., 2003).

Многократные дифракции также ставят сильные ограничения на 3D SRME, особенно на диапазон регистрации вдоль кросслайнов. Для эффективности 3D SRME диапазон регистрации должен содержать точки отражения кратных волн от поверхности, но для неоднородностей морского дна соответствующие точки отражений могут быть в нескольких километрах от приемной линии.

Главной причиной стойкости многократных дифракций является повышение энергии кратных волн за счет суммирования. Это свойство кратных волн очень похоже на характер первичного рассеяния от морского



**Рис. 3** Суммированный разрез до миграции, прибрежная зона западной Африки. Обратите внимание, максимум разрастания энергии неполнократных волн проявляется



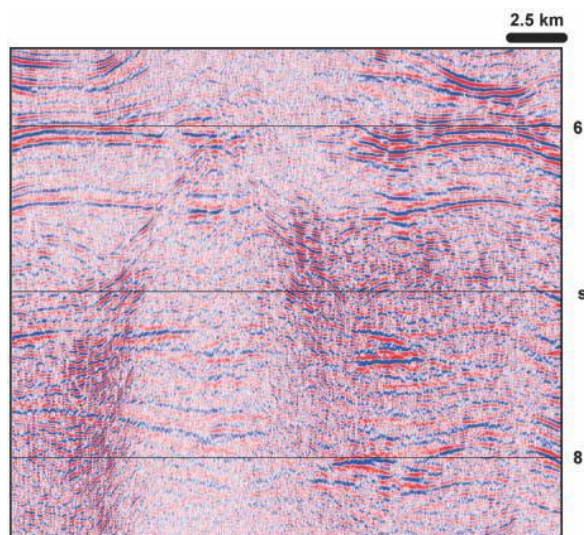
на поздних временах, двигаясь вверх слева на право.

**Рис. 4** Увеличенный участок разреза, приведенного на рис. 3: показана правая часть разреза, располагающаяся под хребтом.

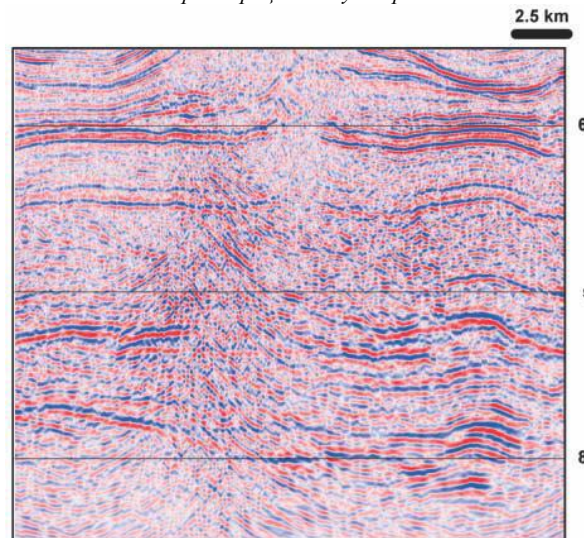
дна. Первичное рассеяние само порождает класс регулярных помех, которые также как и многократные дифракции усиливаются после суммирования. Тем не менее, для подавления многократных дифракций можно использовать приращение времени пробега — но не для сейсмограмм ОСТ, нормальной области применения методики подавления кратных волн, основанной на приращении времени пробега.

#### Пример: прибрежная зона западной Африки

На рис. 2 изображена карта морского дна прибрежной зоны западной Африки. Здесь показан рельеф морского дна на площади, а также отмечена область, для которой на последующих рисунках приводятся сейсмические разрезы. Подводный канал проходит слева направо через всю представленную область, также приводятся хребты и другие неоднородности.



**Рис. 5** Метод Радона подавления кратных волн плюс низкочастотная фильтрация до суммирования подавляет



значительную часть энергии кратных волн.

**Рис. 6** После миграции до суммирования: перемиграция остатков кратных волн, потенциально затеняющих мелкие отражения.

Нужно помнить искажение вертикального масштаба, но, тем не менее, эти особенности разделены относительно гладкими и однородными площадями. Структура морского дна достаточно сложна, но не совсем хаотична, и это важный факт, к которому мы вернемся позже.

На рис. 3 приведен суммированный разрез до миграции по профилю, показанному на рис. 2. Здесь не применена ни обработка по удалению помех, ни обработка по подавлению кратных волн. Профиль тянется над частью подводного канала, который похож на углубление в морском дне в левой части рисунка. Здесь также присутствует отдельный холмик (по сути, хребет рисунка 2), который можно увидеть на морском дне в правой части рисунка. Кратные волны от дна и от мелких



неоднородностей дна показаны темными осями синфазности по сравнению с нижней частью разреза, двигаясь от поздних до ранних времен с уменьшением глубины воды.

На рис. 4 приведен увеличенный кусок рис. 3, на котором видны кратные волны, представленные ниже хребта в правой части данного рисунка. Частотный спектр кратных волн значительно выше, чем у других волн на тех же временах, и они почти затенили основные однократные отражения. Создается впечатление наличия в данной области данных большого количества высокочастотных оборванных осей синфазности.

Иногда сочетание стандартной методики подавления кратных волн Радона и низкочастотной фильтрации может быть эффективным способом уменьшения энергии кратных волн такого рода. На рис. 5 приведен результат применения такой обработки к профилю западной Африки. Однократные отражения сейчас чище, чем на рис. 4, однако здесь все еще присутствуют остаточные фрагменты кратных волн. Разрез станет чище, когда будет сделана миграция до суммирования, и рис. 6 показывает, что остаточные фрагменты кратных волн перемигрированы и сдвинуты вверх от мелких отражений. Проблема перемиграции кратных волн часто становится основной заботой, когда в глубоководных данных присутствуют многократные дифракции. Кратные волны могут быть ниже целевых волн до миграции, однако после миграции они могут затенить важные однократные отражения на малых временах.

### Регулярные помехи в данных морской сейсморазведки

Рис. 7 — дальнейшее увеличение участка данных, представленных на рис. 4. В таком масштабе яснее, что данные фактически содержат ряд крутопадающих обрывков волн. Сейсмическую картину распределения шумов, похожую на эту, проанализировали Ken Larnet и его коллеги в классическом журнале «Geophysics» (Larnet и др., 1983), в статье под названием «Регулярные помехи в данных морской сейсморазведки». Рис. 8 взят из этой статьи, здесь показан тип шума, который был изучен — линейно погружающиеся волны, которые похожи на особенности в данных западной Африки. Оба этих примеры получены для регионов, где морское дно имеет некоторую степень сложности строения. Разрез рисунка 8 соответствует области пролива Shelikof, прибрежная зона Аляски, где проходили ледники и морское дно содержит множественные твердые валуны и другие ледниковые обломки.

Рис. 9, также принадлежит Larnet и др., 1983, — схема порождения помех неоднородностями, которая была описана в той же статье. Энергия сейсмического источника распространяется либо через водный слой, либо передается посредством отражения вдоль морского дна к особенностям на дне или около него, а затем только направляется к сейсмическому приемнику. В терминологии, используемой в данной работе, мы бы описали эти помехи как «первичные дифракции» — многократные дифракции, представленные на рис. 1, являющиеся кратным этого рассеяния.

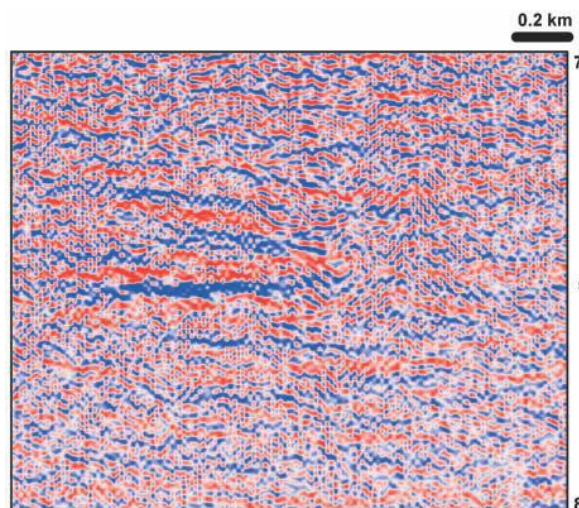


Рис. 7 Увеличенный участок данных, приведенных на рис. 4, в окрестности кратных волн, подтверждает наличие крутопадающих высокочастотных фрагментов в данном участке данных.

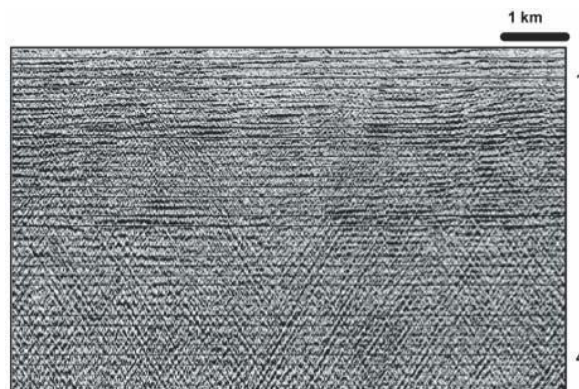


Рис. 8 Суммированный разрез для региона пролива Shelikof, Аляска, воспроизводится из статьи «Регулярные помехи в данных морской сейсморазведки», ('Coherent noise in marine seismic data', Larnet et al., 1983). Заметно сходство между линейными помехами и волнами, представленными на рис. 7.

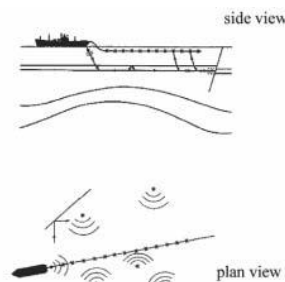
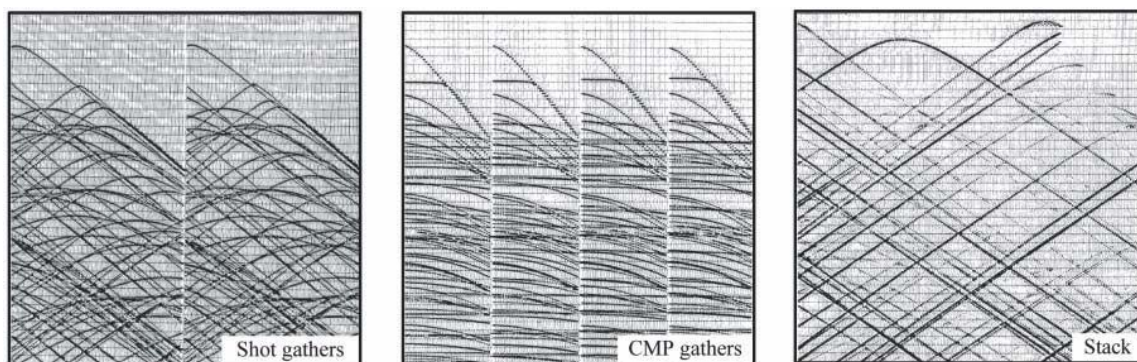


Рис. 9 Из статьи 'Coherent noise in marine seismic data', Larnet et al., 1983. Вид сбоку (вверху) и вид сверху (внизу) предполагаемого механизма появления помех.



**Рис. 10** Из статьи 'Coherent noise in marine seismic data', Larner et al., 1983. Синтетические помехи бокового рассеяния характеризуются различными наклонами на сейсмограммах ОПВ, есть как положительные, так и отрицательные наклоны, однако большая часть помех характеризуется приращением времени пробега на сейсмограммах ОСТ, сходным с приращением времени пробега однократных волн. Как следствие, помехи усиливаются после суммирования.

На рис. 10 показан результат моделирования помех для набора неоднородностей, которые произвольно разбросаны около сейсмического профиля. Синтетические сейсмограммы ОПВ на данном рисунке содержат различные варианты падения и приращения времени пробега, включая отрицательные падения. Затем синтетические данные были отсортированы по ОСТ, однако, присутствует много волн с приращениями времен пробега, похожими на однократные отражения. Это была характеристика данных помех — их приращения времен пробега в сейсмограммах ОСТ могли быть сходны с однократными отражениями — это привело авторов к предположению, что помеха может быть удалена наилучшим образом из сейсмограмм ОПВ или ОПП, где возможно получение пользы от отрицательных падений по сравнению с однократными волнами.

Благодаря поведению приращений времен в сейсмограммах ОСТ, большинство помех суммируются регулярно на типичных скоростях однократных волн. В суммарном разрезе появляются линейно погружающиеся волны, которые внешне очень сходны с помехами, проявляющимися в данных Аляски и западной Африки.

Почему в этом случае помехи складываются на близких к однократным волнам скоростях? Одно из объяснений — это следствие влияния наклона на скорость суммирования: волны-помехи распространяются со скоростью распространения волн в воде, либо со скоростью в преломляющем горизонте, однако наклонные ветви, соответствующие неоднородностям, суммируются на больших скоростях, близких к скоростям однократных волн. Фактически, возможный способ подавления помех, который был предложен в более поздней работе, — применение приращения времен прихода от наклонных отражающих границ на постоянной скорости (частично миграция во временной области) с целью снижения скорости явного суммирования помех (Chambers и др., 1984).

### Многократные дифракции и регулярные помехи

В перспективе того, что кратные волны являются комбинацией однократных, SRME обеспечивает понимание характера многократных дифракций, по крайней мере для

случая, когда морское дно преимущественно гладкое, за исключением ряда отдельных неоднородностей. (Это приблизительно ситуация съемки в западной Африке, как упоминалось в разъяснениях к карте морского дна, изображенной на рис. 2). Большинство кратных волн от неоднородностей, в таком случае, — простая комбинация прямых однократных отражений от морского дна с исходным отражением от неоднородностей. Всякая сложность в кинематике кратных волн больше похожа на первичное рассеяние, чем на отражение от дна, и можно ожидать, что свойства кратных волн будут зависеть от тех неоднородностей, которые были рассмотрены в предыдущем разделе.

Эти выводы подтверждаются синтетическими сейсмограммами рис. 11 - 13 (которые любезно предоставлены компанией BP). Это такие же сейсмограммы, что и на рис. 10, но здесь в моделирование наряду с однократными дифракциями включены многократные дифракции для ряда неоднородностей, расположенных около сейсмического профиля.

Многократные и однократные дифракции, приведенные на синтетических сейсмограммах ОПВ рис. 11, внешне похожи и характеризуются как положительными, так и отрицательными наклонами. Многократные дифракции на сейсмограммах ОСТ рис. 12 более сложны, чем однократные дифракции на сейсмограммах ОСТ рис. 10, с множеством осей синфазности, сдвинутых вверх. Однако, до тех пор, пока здесь присутствует часть смещенных осей синфазности, параллельных однократным отражениям на некоторых скоростях приращения времени пробега, часть этих волн будет суммироваться согласованно.

Если суммировать синтетические данные с типичной скоростной функцией, можно обнаружить, как показано на рис. 13, что суммарный разрез содержит ряд наклонных линейных осей синфазности. Это похоже на оси синфазности, которые мы видели в случае синтетических однократных дифракций рис. 10, а также на наклонные особенности суммарного разреза для региона западной Африки, приведенного на рис. 7.



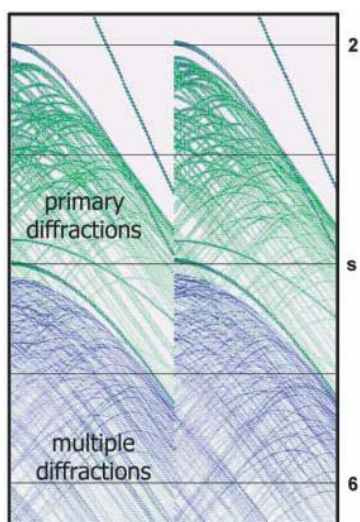


Рис. 11

Синтетические сейсмограммы ОПВ, содержащие как однократные, так и многократные дифракции от ряда неоднородностей, расположенных около сейсмического профиля (предоставлено компанией BP).

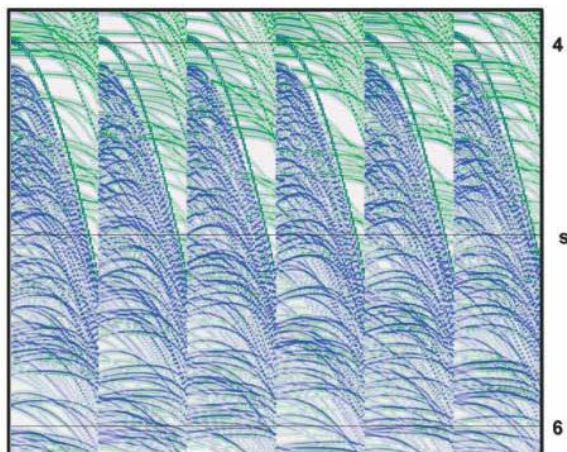


Рис. 12 Синтетические сейсмограммы ОСТ, содержащие как однократные, так и многократные дифракции (предоставлено компанией BP). В тех сейсмограммах, которые будут просуммированы с любыми типичными скоростями однократных волн, присутствуют сдвинутые оси синфазности.

Этот результат показывает, почему многократные дифракции, когда они присутствуют в данных, так трудно подавить — часть кратных волн всегда будет суммироваться при любых скоростях суммирования однократных волн. Ken Lamer и его коллеги в своей статье 1983 года утверждают: «суммированная сейсмограмма ОСТ — наиболее сильный метод общей обработки для подавления разнообразных помех ... однако, большая часть помех бокового рассеяния на самом деле усиливается после суммирования». Мы бы слегка перефразировали это предложение и сказали, что в случае многократной дифракции «суммированная сейсмограмма ОСТ — наиболее сильный метод общей обработки для подавления различных кратных волн ... однако, часть многократных дифракций всегда усиливается после суммирования».

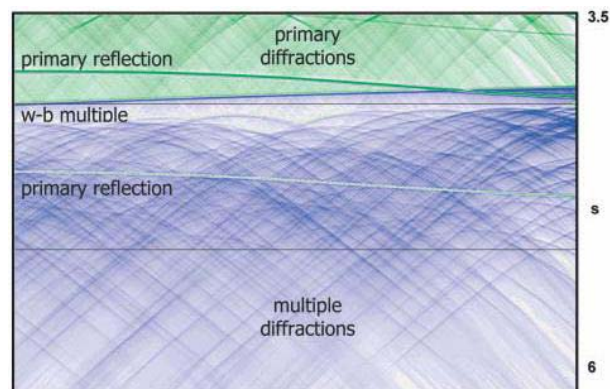


Рис. 13 Суммированный разрез по синтетическим сейсмограммам рис. 12 (предоставлено компанией BP). Многократные дифракции порождают линейные наклонные оси синфазности, похожие на те, которые приводились на рис. 7 для данных западной Африки.

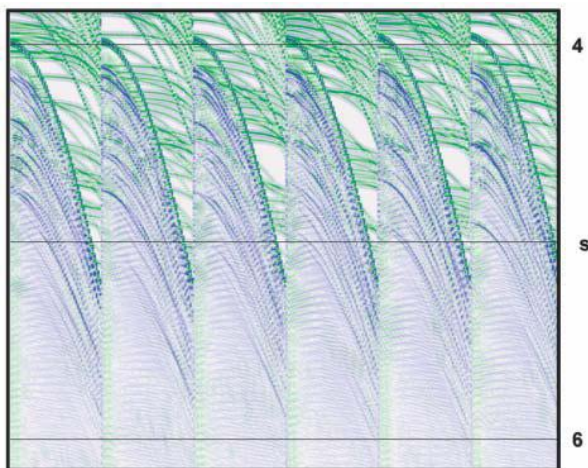
#### Подавление кратных волн

Также как и в случае отдельных помех, одним из методов подавления кратных волн является исследование кинематики до суммирования. Итоги приводятся на рис. 14, для различных областей суммирования и для различных положений неоднородностей по отношению к судну с источником волн. Только на сейсмограммах ОСТ, когда неоднородность расположена непосредственно на стороне судна, и ветвь многократных отражений со стороны источника и ветвь со стороны приемника имеют явное различие в приращении времени пробега по сравнению с однократными отражениями. Когда неоднородность спереди или сзади судна, мы имеем сложную ситуацию, где одна из ветвей кратных волн будет иметь сдвинутое приращение времени. Как мы уже видели, часть энергии кратных волн, в этом случае, будет невозможно разделить от однократных отражений и она будет повышена при суммировании. Однако, это случаи, когда кратные волны имеют отрицательные наклоны (отрицательные приращения времен пробега) как в сейсмограммах ОПВ, так и в сейсмограммах ОПП, отсюда и различие от однократных отражений в тех областях. Методики обработки, использующие различие в приращении времени пробега для разделения однократных и кратных волн, по этой причине лучше работают для данных, сортированных по ОПВ или по ОПП, чем для сейсмограмм ОСТ.

Рис. 15 показывает результат устранения отрицательных наклонов из наших синтетических сейсмограмм ОПВ и ОПП и дальнейшей сортировки по ОСТ. Устранились сдвинутые вверх оси синфазности, обусловленные неоднородностями, расположенными спереди или сзади судна, и сейсмограммы сейчас содержат только низкочастотные кратные волны. После применения стандартного метода подавления кратных волн Радона и суммирования данных получим результат, приведенный на рис. 16. Суммарный разрез сейчас содержит только остаточные кратные волны со слабыми амплитудами.

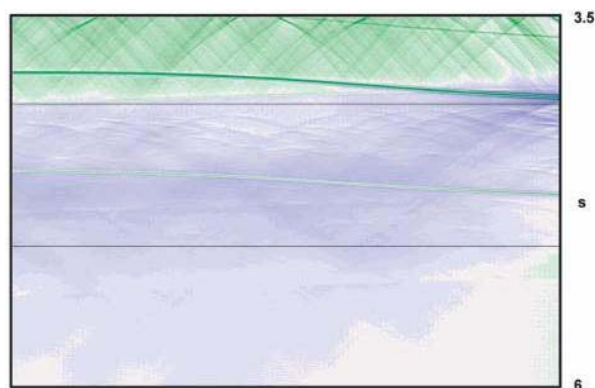
	Scatterer		
	Ahead of boat	Side of boat	Behind boat
Shot gathers	+ve dip	apex-shifted	-ve dip
CMP gathers	apex-shifted	low velocity	apex-shifted
Receiver gathers	-ve dip	apex-shifted	+ve dip

**Рис. 14** Кинематика многократных дифракций до суммирования, для различных положений неоднородности и различных сейсмограмм до суммирования. На сейсмограммах ОСТ только кратные волны от неоднородностей, расположенных на стороне судна, имеют явное различие в приращении времени пробега от однократных волн; другие имеют большие различия от однократных волн на сейсмограммах ОПВ и ОПП.

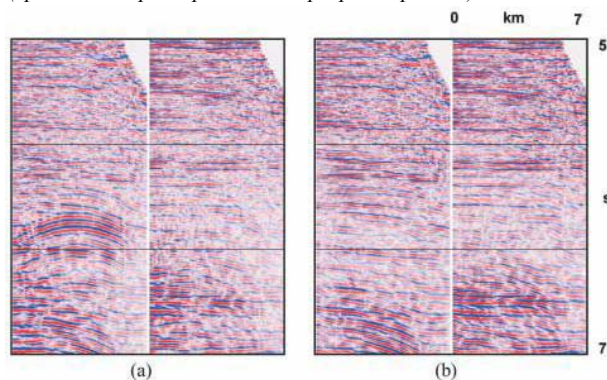


**Рис. 15** Сдвинутые вверх оси синфазности, показанные на рис. 12 на сейсмограмме ОСТ, устранены фильтрацией по углам наклона сейсмограмм ОПВ и ОПП.

В реальных данных, однократные дифракции также будут иметь отрицательные наклоны на сейсмограммах ОПВ и ОПП, и это будет устранено тем способом обработки, который был применен для получения рис. 16. (После рассмотрения методики Larnier-а подавления различных помех логично, что фильтрация сейсмограмм ОПВ и ОПП по углам наклона может устранить однократные дифракции). Один из путей ослабления риска подавления однократных волн — устранение кратных волн после миграции до суммирования. Это может показаться странным предложением, явно повышающим сложность кратных волн, которые добавятся после миграции. Однако миграция ослабляет однократные дифракции, делая их удобными для анализа осями синфазности, устраняет их



**Рис. 16** Обработанные сейсмограммы, приведенные на рис. 15, содержат только низкоскоростные кратные волны, которые можно устранить стандартной методикой Радона подавления кратных волн. Суммированный разрез сейчас содержит только низкоамплитудные остаточные кратные волны (сравните с предварительным разрезом рис. 13).



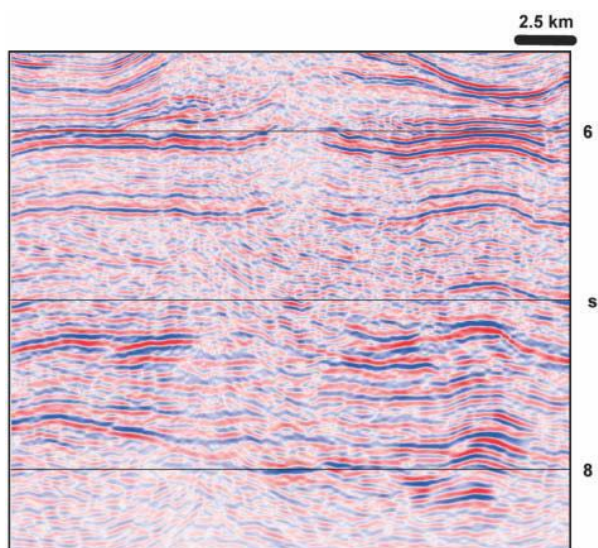
**Рис. 17** (a) Сейсмограммы ОСТ, мигрированные до суммирования — съемка в западной Африке. Слева приведена сейсмограмма со смещенными осями синфазности, которые сохранились после миграции. (b) После устранения неоднородностей спереди и сзади судна, таких как на рис. 15, остались только низкоскоростные кратные волны.

возможное перекрытие кратных волн на сейсмограммах ОПВ и ОПП. Вдобавок, хотя кратные волны плохо мигрированы при просмотре в панели постоянных удалений или на суммарном разрезе, можно показать, что для глубоководных условий плохая миграция слабо зависит от удалений. Кратные волны имеют очень схожую зависимость приращений времен прихода от удалений до и после миграции, и могут быть разделены от однократных отражений посредством его кинематики до суммирования.

На рис. 17 (a) приводятся две (непоследовательные) сейсмограммы ОСТ данных западной Африки. Первая сейсмограмма содержит явно смещенные вверх оси синфазности, которые присваиваются кратным волнам, отраженным от одного из хребтов данной площади, в то время как на второй сейсмограмме присутствуют только обычные кратные волны. Может это удивительно, но



## Обработка данных



**Рис. 18** Мигрированный разрез после такой обработки, как для рис. 17, плюс подавление остаточных низкоскоростных кратных волн методом Радона. Сравните с мигрированным разрезом рис. 6.

сейсмограммы на рис. 17 приведены после временной миграции до суммирования. Хотя кратные волны сильно перемигрированы на разрезе, их приращения времен на сейсмограммах ОСТ очень похожи до и после временной миграции. К таким выводам приходят и в случае, когда данные после миграции сортируются в сейсмограммы по псевдо-источникам и приемникам.

Как результат мы можем применять такую обработку после миграции, как в синтетическом примере рис. 17 (а), с целью подавления кратных волн, оси синфазности которых смещены вверх. Результат этого показан на рис. 17 (b). Обе сейсмограммы теперь содержат только низкоскоростные кратные волны, которые можно подавить стандартной методикой Радона. Итоговый суммарный разрез показан на рис. 18. По сравнению с мигрированным разрезом (рис. 6) большая часть кратных волн, которые были вначале перемигрированы, устранилась.

### Выводы

Ослабление многократных дифракций, обусловленных неоднородностями морского дна, остается сложной задачей для стандартных методик подавления кратных волн. Смещенные приращения времен и соответствующие скорости приращения таких осей синфазности является проблемой для метода Радона подавления кратных волн, и сколько бы ни встречалась дифракция на плоскости регистрации, она не будет безошибочно промоделирована посредством 2D SRME.

В глубоководных условиях и для относительно изолированных сложных элементов кинематика многократных дифракций может быть представлена вместе с однократными дифракциями. Кинематика как однократных, так и кратных волн поясняет основные

проблемы, которые возникают из-за многократных дифракций в процедурах удаления кратных волн:

эффекты от неоднородностей, порождающих сдвинутые вверх оси синфазности на сейсмограммах ОСТ, всегда усиливаются после суммирования. Кинематика кратных волн на сейсмограммах, кроме ОСТ, может, однако, привести к альтернативным методам подавления кратных волн. Методы, предложенные в разделе для подавления помех рассеяния в данных до суммирования, могут также быть применены для подавления многократных дифракций.

Кратные волны лучшим образом подавляются после миграции. Миграции ослабляют дифракции однократных отражений, но многократные дифракции плохо подавляются при миграции. Плохо выполненная миграция кратных волн слабо меняется от удаления и в простой геологической обстановке плохо мигрированные кратные волны остаются регулярными в сейсмограммах до суммирования. Кое-что удивительно: миграция действительно усиливает разницу энергий однократных и многократных отражений. Несмотря на перемиграцию, которая явно видна на разрезе и на панели постоянных удалений, возможно подавление многократных дифракций после миграции, используя их регулярность на других сейсмограммах до суммирования.

### Благодарности

Авторы хотели бы поблагодарить компанию ВР за предоставление синтетических примеры. Мы также благодарим руководство Veritas DGC за возможность публикации данной статьи.

Нам очень хочется поблагодарить Ken Larner и его коллег за их классическую статью про регулярные помехи в данных морской сейсморазведки, которая была начальным пунктом проведенной нами работы. Если читатели считают, что разделы статьи, где приводятся выводы, являются очевидным плагиатом, им следует рассмотреть цитату Т. S. Eliot: «Талант подражает, а гений ворует». Будет нескромно намекать, какой из этих методов был использован для написания данной статьи.

### Ссылки на литературу

- Chambers, R., Jakubowicz, H., Larner, K. L., and Yang, M. [1984] Suppression of backscattered coherent noise by pre-stack partial migration. *54th SEG International Ann. Mtg.*, S5.6.
- Hargreaves, N. D., VerWest, B. J., Wombell, R., and Trad, D. [2003] Multiple attenuation using an apex-shifted Radon transform. *73rd SEG International Ann. Mtg.*, SP 2.6
- Larner, K., Chambers, R., Yang, M., Lynn, W., and Wai, W. [1983] Coherent noise in marine seismic data. *Geophysics*, **48**, 854-886.
- VerWest, B.J. [2002] Suppressing Peg-Leg Multiples with Parabolic Radon Demultiple. *64th Mtg., EAGE.*, F036.