

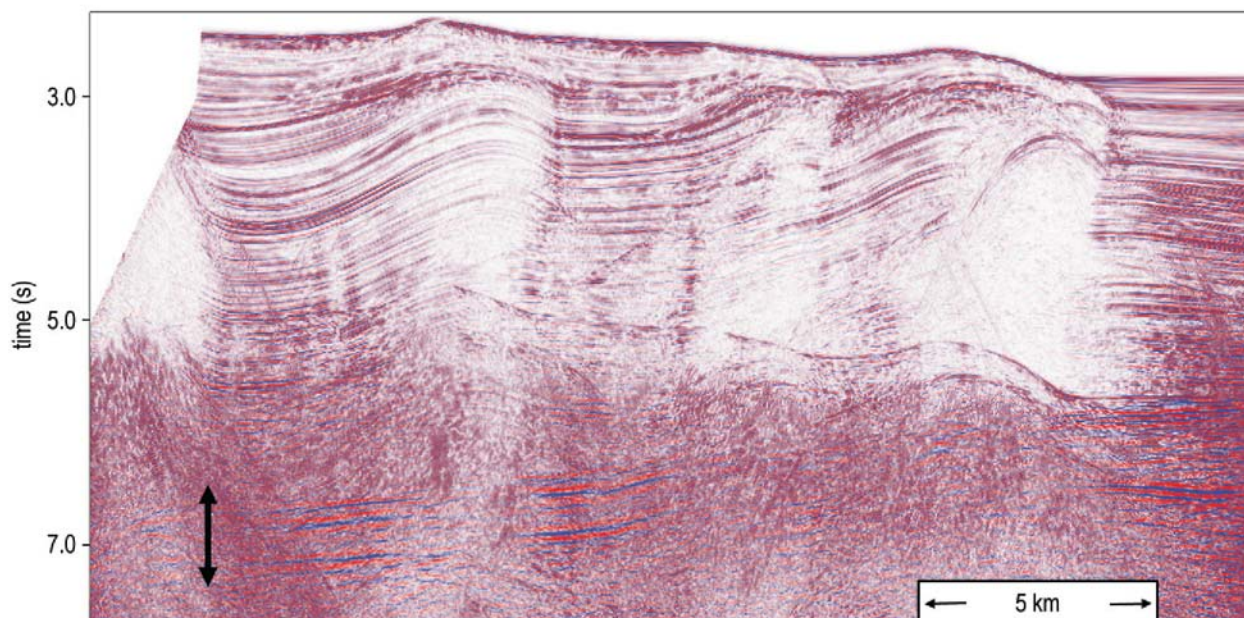
**Общее предсказание кратных, связанных с поверхностью: гибкий алгоритм 3D SRME.****General surface multiple prediction: a flexible 3D SRME algorithm**

Идеальное 3D SRME (подавление кратных, связанных с поверхностью) подразумевает геометрические требования к входным данным, которые не удовлетворяются при морских съемках с косами. Ian Mooge<sup>1</sup> и Bill Dragoset<sup>2</sup> предлагают решение, которое подкрепляется примерами полевых данных, в которых используется модифицированный, основанный на много мерном поиске «ближайшего соседа», т.е. ведется поиск самых ближайших зарегистрированных трасс, в евклидовом смысле, к трассам, которые мы бы хотели иметь и которые требуются для идеального 3D SRME.

Шестьдесят лет назад сообщество сейсморазведки было вовлечено в дебаты о существовании кратных отражений в наборах сейсмических записей (Dix, 1948). Большинство геофизиков не сомневались в теоретической возможности многократных отражений, но они задавали вопрос о том, позволяют ли чувствительность и динамический диапазон детекторов и записывающих инструментов увидеть такие предположительно малоамплитудные осцилляции синфазности. С тех пор технология регистрации сделала большой скачок, и, увы, кратные отражения уже не являются спорной проблемой. Фактически, обычно кажется, что природа, с каким-то извращенным ликованием, выбирает наиболее интересные области разреза, чтобы затемнить их под покрывалом кратных (Рисунок 1). К счастью, технологии обработки сейсмических данных развивались вместе с технологией сбора данных. Сегодня у геофизиков есть шанс видеть через кратные,

особенно с тех пор, как недавно появился метод 3D подавления кратных, относящихся к поверхности (SRME).

3D SRME – теоретически корректная процедура, управляемая данными, в которой сейсмические трассы преобразовываются с целью предсказания кратных от поверхности (van Dedem and Verschuur, 2001). Для каждой входной трассы, рассчитывается свертка выбранных пар трасс для получения 3D куба, называемого сейсмограммой вклада кратных (MCG) (Рисунок 2). При суммировании MCG получают предсказываемые кратные для целевой входной трассы. Для получения результатов хорошего качества, площадное распространение каждой MCG должно охватывать участок, который содержит все точки нисходящих отражений (DRP) для кратных от поверхности целевой трассы. Также, каждая MCG должна быть регулярно дискретизирована в каждом пространственном направлении без зеркальных падений (Dragoset et al., 2006). После того, как было выполнено предсказание кратных, они вычитаются из исходных трасс при помощи



**Рисунок 1** Разрез по инлайну съемки 3D над глубоководным месторождением в российской части Черного моря. Никакого подавления кратных не выполнялось. Этот разрез содержит кратные от дна, неполнократные, и дифрагированные кратные волны. Интересный для разведки участок отмечен стрелками в левой части рисунка.

<sup>1</sup> Schlumberger Cambridge Research, High Cross, Madingley Road, Cambridge, CB3 0EL, UK. E-mail: imoore1@slb.com.

<sup>2</sup> WesternGeco, 10001 Richmond Ave., Houston, TX 77252, USA. E-mail: wdragoset@houston.westerngeco.slb.com.

## Обработка данных

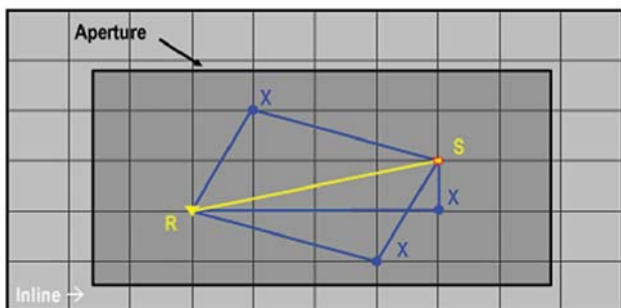
адаптивных процедур, которые учитывают всякие нестыковки между предсказанными и зарегистрированными кратными.

К сожалению, пространственное распределение трасс морской съемки с косой не позволяет производить идеальный расчет MCG. В частности:

- Малая апертура записи по кросслайну означает то, что трассы, которые необходимы для точного предсказания кратных в случае, если величина падения по кросслайну большая, часто не регистрируются.
- 3D SRME требует пространственной дискретизации без алейсинга в четырех координатах: положение источника и приемника по инлайну и кросслайну. Обычно, только дискретизация положений ПП по инлайну является адекватным.
- Отклонение кабеля, неточное управление судном, пропуски на ближних удалениях, обход препятствий, и загромождение являются причинами нерегулярной дискретизации данных.

Недавно было опробовано несколько идей для преодоления этих препятствий 3D SRME. Van Dedem и Verschuur (2001) предложили разреженную параметрическую инверсию с целью преодоления ограничений, присущих пространственной дискретизации. Baumstein et al. (2005) создали регуляризованные и плотно дискретизированные записи с помощью процедуры преобразования DMO/обратное DMO. A Bisley и Moore (2005) описали метод преодоления ограниченной апертуры по кросслайну традиционных морских съемок путем приближенных предсказаний, выполняемых методом 2D SRME к тем, которые бы были выполнены 3D SRME.

Ограничения этих и других подходов к 3D SRME влияют на качество предсказаний. Хотя алгоритмы адаптивного вычитания выполняются в попытке произвести компенсацию за неправильно предсказанные кратные, они, тоже, имеют ограничения. Таким образом, необходимость в улучшении методов 3D SRME остается. Более того, недавнее нарастание морских съемок мульти-, полного-, и широкого азимута (WAZ) создают новые задачи. Желательно наличие одного подхода к 3D SRME, который может уверенно иметь дело со съемками всех типов. В данной работе мы представляем подход к 3D SRME, который считаем, что имеет минимальные ограничения и подходит для геометрии наблюдения и геологических условий всех типов.



**Рисунок 2** Вид в плане идеального 3D SRME. Апертура выбирается исходя из ожидаемых эффектов 3D для целевой трассы (желтая линия) с конечными точками R и S. Каждый узел сетки в апертуре рассматривается как возможная точка нисходящего отражения (три из них показаны здесь и обозначены X). Вклад каждого DRP в MCG рассчитывается путем свертки соответствующих трасс RX и SX. Отметим, что данные должны быть абсолютно регулярны. А именно, конечные точки каждой трассы попадают на узлы сетки и трассы RX и SX существуют для всех X.

Из-за масштабов применимости, мы называем этот метод *общий метод предсказания кратных 3D (GSMP)*.

Некоторые базовые концепции GSMP были впервые описаны van Dedem и Verschuur (1998) которые, после тестирования синтетических данных, решили, что их алгоритм не был слишком многообещающим. Совместно с Richard Bisley, мы объединили подобные концепции с другими идеями для построения успешного алгоритма (Moore et al., 2005; Moore and Dragoset, 2008). Кроме того, Kurin et al. (2006) описали подход, подобный GSMP, а Ceragioli et al. (2007) кратко упомянули фундаментальную концепцию GSMP.

### Техническое описание

Концепция алгоритма GSMP проста и близко связана с теоретически идеальным алгоритмом, описанным ранее. Для каждой целевой трассы, геометрия MCG определяется на основе апертуры, дискретизации и требований по расходам, но без всяких ссылок на имеющиеся входные данные. В отличие от Рисунка 2, апертура и сетка находятся на одной оси с целевой трассой (Рисунок 3). Расчет MCG требует свертки трасс, которые, в общем, не присутствуют в наборе записанных данных. Когда требуется такая трасса, алгоритм GSMP просто выбирает ближайшую из доступных трасс и применяет дифференциальную кинематическую поправку для компенсации разности удалений между имеющейся и желаемой трассами. Не вводится никаких поправок за разности средних точек или азимутов. Этот процесс является простой формой интерполяции, и означает, что перед GSMP не требуется регуляризации и экстраполяции зарегистрированных данных. Если, однако, эта схема интерполяции *ближайший-соседний* не является достаточно точной, то для улучшения дискретизации имеющихся данных может выполняться предобработка.

Определение ближайшей трассы гибкое, но она обычно определяется минимизацией функции погрешности, такой как

$$E^2 = \{w_d(h_d - h_s)\}^2 + \{w_\theta(\theta_d h_d - \theta_s h_s)\}^2 + \{w_x(x_d - x_s)\}^2 + \{w_y(y_d - y_s)\}^2 + \{w_Q Q_d\}^2$$

где  $h$ ,  $\theta$ ,  $x$  и  $y$  соответствуют удалению, азимуту и координатам по инлайну и кросслайну средней точки, соответственно; нижние индексы  $d$  и  $s$  относятся к желаемой и имеющейся трассам, соответственно,  $w$  – это веса, выбираемые пользователем, а  $Q$  – добротность имеющейся трассы.

Необходимо пояснить некоторые моменты, касающиеся данной формулы. Член, связанный с азимутом, включает в себя произведение удаления и азимута. Это имеет два преимущества. Первое, произведение имеет те же размерности (длина), что и другие члены, связанные с геометрией. Второе, оно учитывает, что ошибки, связанные с азимутом, становятся более значимыми по мере увеличения удаления. Веса можно выбирать с целью управления относительной значимостью различных членов формулы, и для учета дискретизации имеющихся данных. Если известно, что угол падения мал,



## Обработка данных

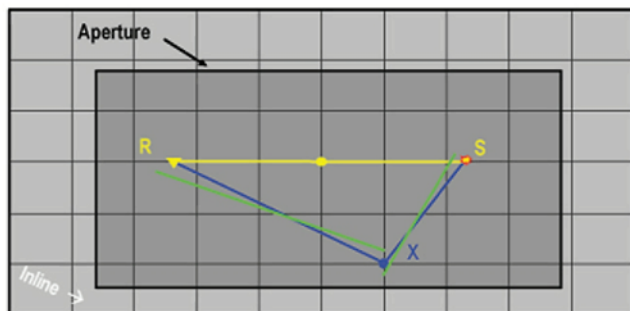


Рисунок 3 Изображение в плане процедуры GSMP. Апертура лежит на одной линии с целевой трассой (желтым), но не должна быть центрирована по ней. Желаемые трассы для заданного DRP (X) показаны синим, и аппроксимируются ближайшими из имеющихся трасс (зеленым). Эти трассы корректируются за ошибки в удалениях с помощью дифференциальной кинематической поправки, перед тем, как выполняется свертка.

например, то ошибки связанные со средней точкой будут относительно мало влиять, чем ошибки удалений. Для узко-азимутальной съемки, вес азимута обычно небольшой или равен нулю, потому что дискретизация и максимальное удаление по кросслайну для входных данных недостаточны для того, чтобы поддерживался выбор трасс на основе азимута и это бы не приводило к большим погрешностям в удалениях или средней точке. Наоборот, широкий диапазон азимутов, который обеспечивается широкоазимутальными съемками (WAZ) успешно используется в GSMP. Следовательно, MCG более точные, особенно что касается больших апертур кросслайна.

Фактор добротности позволяет алгоритму отдавать предпочтение трассы с высокой добротностью (низким Q) перед трассами с низкой добротностью в случае, если геометрически погрешности равны. Например, добротность может задаваться с использованием меры отношения сигнал-шум трассы. Для того, чтобы E имела размерность длины, произведение  $w_Q Q_a$  должно также иметь меру длины. Если  $Q_a$  безразмерно, то  $w_Q / w_h$  погрешность удаления, которая считается равной по значимости фактору 1.

Если, например  $w_h = 1$ , то E физически можно интерпретировать как ошибка удаления, эквивалентная

комбинации всех ошибок, связанных с ближайшей трассой. Среднее значение E по всем трассам, включенным в MCG, дает полезный результат QC, относящийся к качеству предсказанных кратных. Кроме того, свертки, в которые включены трассы, с ошибками, превышающими порог, заданный пользователем, должны быть отбракованы из MCG, поскольку обычно они будут только добавлять шум. Псевдо код для алгоритма GSMP выглядит следующим образом:

```
compute midpoint, offset, azimuth and quality of all available traces
for each target trace
  define aperture and grid based on target trace
  for each grid node in the aperture
    compute midpoint, offset and azimuth of desired traces, RX & SX
    find nearest available traces to desired traces adjusted found
    traces for offset errors (differential moveout) convolve adjusted
    traces and save result next grid node
  sum convolutions and output result
next target trace
```

На практике, суммирование свертки выполняется поступательно, если только не требуется само MCG (например для целей контроля качества). Дифференциальная кинематическая поправка является точной только для осей синфазности, которые соответствуют соответствующим траекториям приращения времени, и даже в этом случае игнорируются эффекты AVO. Обычно используется дифференциальное NMO, поэтому будут корректно регулироваться только гиперболические оси синфазности с определенной скоростью. Выбираемая скорость соответствует скорости для самых важных осей синфазности в процедуре предсказания. На глубоководье, такими осями обычно являются однократные волны, хотя может использоваться и скоростная функция кратных волн, если важны кратные волны высокого порядка. Обычно, дифференциальные кинематические поправки включают только небольшое изменение в удалении, и ошибки, связанные с использованием соответствующей скорости или траектории приращения времени, малы.

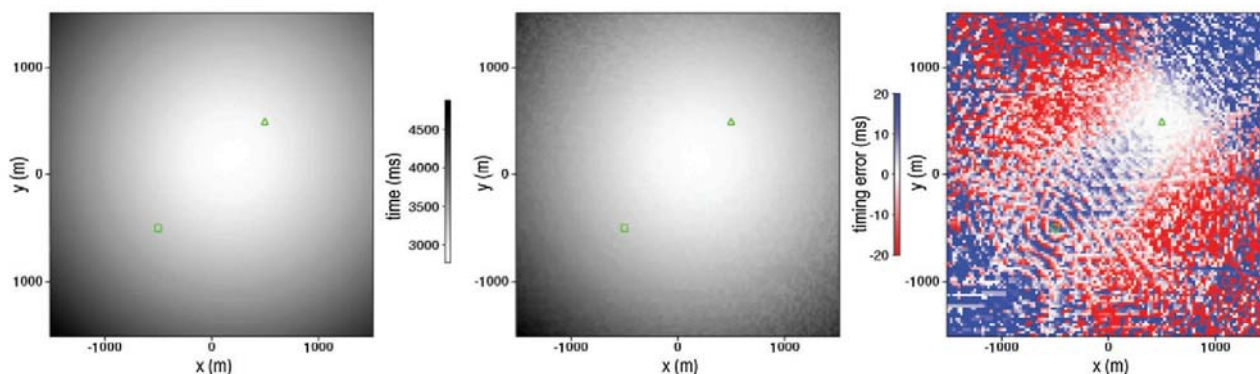


Рисунок 4 Сравнение идеального (слева) и предсказанного (в центре) времен пробега для дифрагированной кратной MCG. Разность (справа) показывает, что ошибка времени пробега имеет нулевое среднее. Зеленый квадрат и треугольник отмечают положение источника и приемника, соответственно. Кратная соответствует дифрагирующему объекту со стороны источника на плоской поверхности дна, при этом дифрагирующий объект находится в начале координат. Правильное DRP таким образом, находится, на одной трети пути от начала координат до положение приемника, и соответствует минимальному времени пробега. Отметим, что обычно апертура лежит на одной линии с азимутом трассы, но этого не было сделано в данном примере.

## Обработка данных

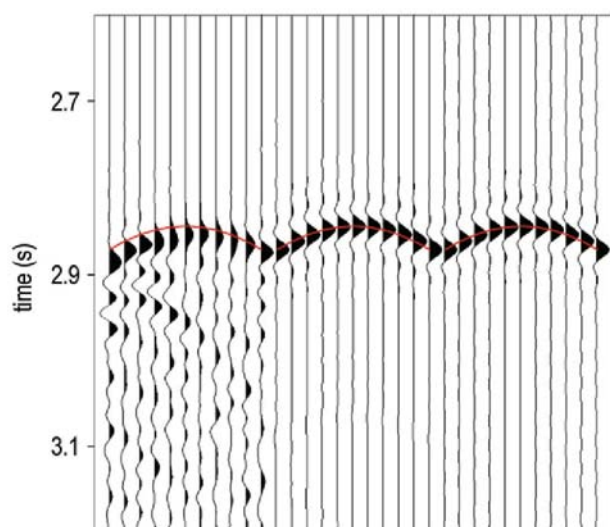


Рисунок 5 Дифрагированные кратные, предсказанные 3D GSMP для реальной (слева) и идеальной (в центре) геометрии, по сравнению с идеальным результатом (справа). Предсказания GSMP были получены путем суммирования MCG, содержащих импульс на временах, показанных на Рисунок 4, и применения соответствующего  $\rho$ -фильтра. Идеальный результат показывает тот же импульс на корректном времени пробега для дифрагированной кратной волны.

Хотя его концепция и проста, алгоритм GSMP требует тщательного воплощения для того, чтобы он был эффективен. Для расчета кратных для заданной целевой трассы, мы, прежде всего, должны определить, какая из входных трасс вносит вклад в MCG, и второе, должны эффективно извлечь эти трассы из записанного набора данных. Первая задача может быть выполнена относительно эффективно даже для больших наборов данных, используя, например, kd-деревья (Friedman et al., 1977). Второе задание требует

выборочного I/O во входных данных, и эффективное выполнение этого I/O является ключом к работе GSMP.

**Выполнение**

GSMP разработано, чтобы быть в некотором смысле, оптимальным для заданной дискретизации и зарегистрированных данных. Имея идеально дискретизированные данные, алгоритм становится теоретически корректным. Ошибки в предсказанных кратных вызваны полностью аппроксимацией *ближайший-соседний*. На практике, как и с идеальным 3D SRME, также будут ошибки, относящиеся к ограниченной апертуре и дискретизации MCG. Эти ошибки можно минимизировать путем правильного выбора параметров обработки.

Использование ближайшей трассы вместо желаемой трассы создает ошибки отсчета времени и амплитуды в MCG. Обычно, эти погрешности имеют нулевое среднее, поскольку погрешности в средней точке, удалении, и азимуте в равной степени могут иметь разные направления. Таким образом, погрешности создают дрожание фазы в MCG. Когда MCG суммируется, это дрожание фазы создает искажение импульса, особенно на высоких частотах, что проявляется в виде шума в модели кратных волн. Когерентная часть модели, тем не менее, будет корректной. Это их отличие от большинства других 3D SRME алгоритмов, которые страдают от систематических ошибок синхронизации из-за аппроксимаций.

На Рисунок 4 показан пример ошибок синхронизации, связанных с реальной геометрией, с богатыми азимутами для дифрагированных кратных. На рисунке 5 показаны соответствующие предсказанные кратные. Широко известно, что дифрагированные кратные трудно предсказать точно. GSMP предсказывает кратные точно, хотя и с некоторым дополнительным шумом. Эти графики были получены независимо от зарегистрированных данных, и таким образом, служат предсказанием

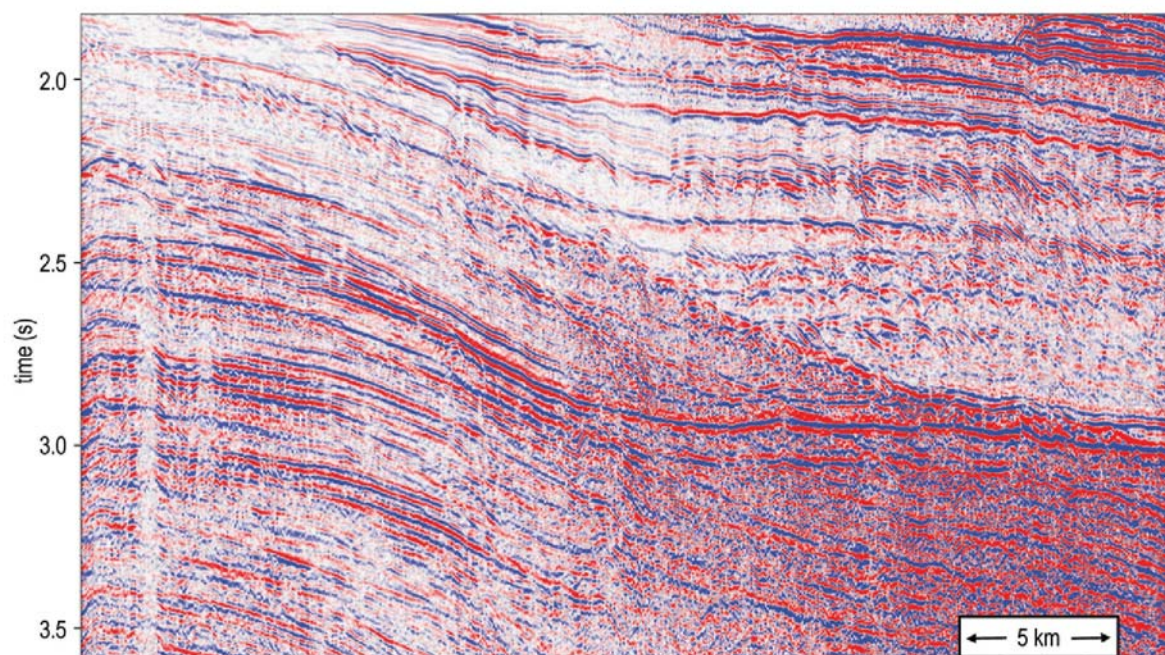


Рисунок 6a Суммарный разрез ближних удалений (0-1500 м) съемки 3D на глубоководье Норвежского моря. Подавление кратных не применялось.



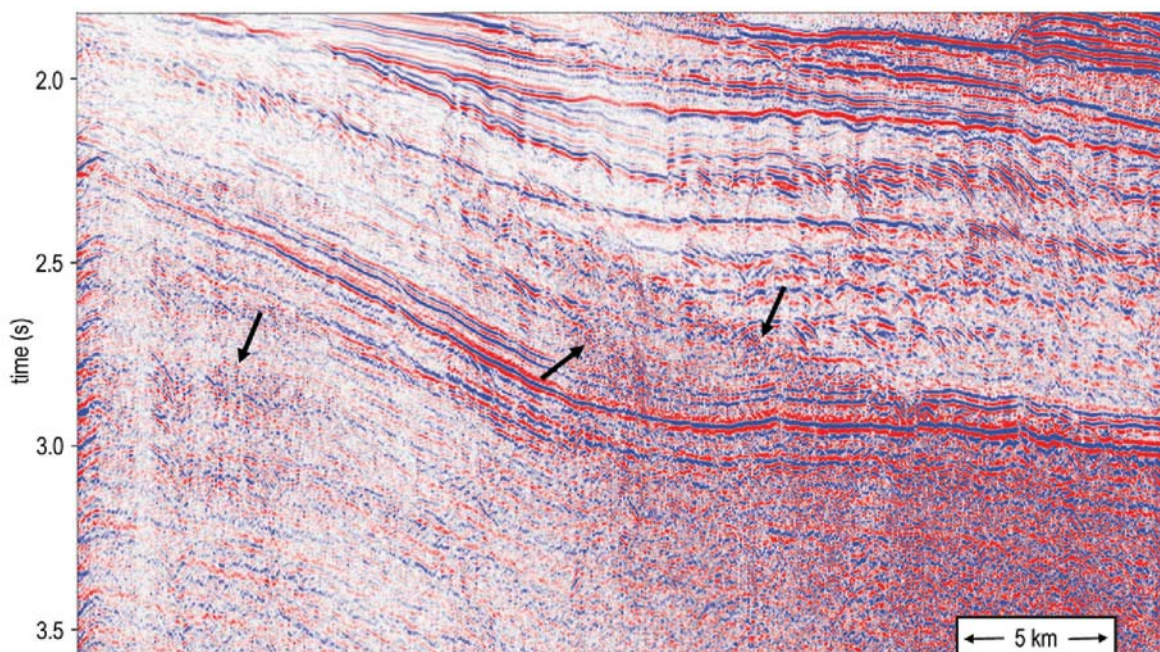


Рисунок 6b Набор данных с рисунка 6a с применением 2D SRME. Большая часть когерентных кратных от поверхности была подавлена, но присутствуют остаточные кратные (отмечены стрелкой).

Того как хорошо GSMP будет работать для заданных кратных и заданной геометрии. Более подробно смотрите на рисунке.

#### Примеры полевых данных

Мы применили GSMP к сейсмическим наборам 3D Многочисленных съемок по всему миру. В данной статье приводятся примеры с Норвежского моря, юго-восточной Азии, и

российской части Черного моря. Все три съемки имели типичную узкоазимутальную геометрию с буксируемой косой. Важные параметры GSMP, такие как апертура по кросслайну и пространственная дискретизация MCG были определены при начальных тестах обработки.

После предсказания кратные волны вычитаются из исходных данных с помощью стандартной, адаптивной процедуры многовводного вычитания по методу наименьших квадратов.

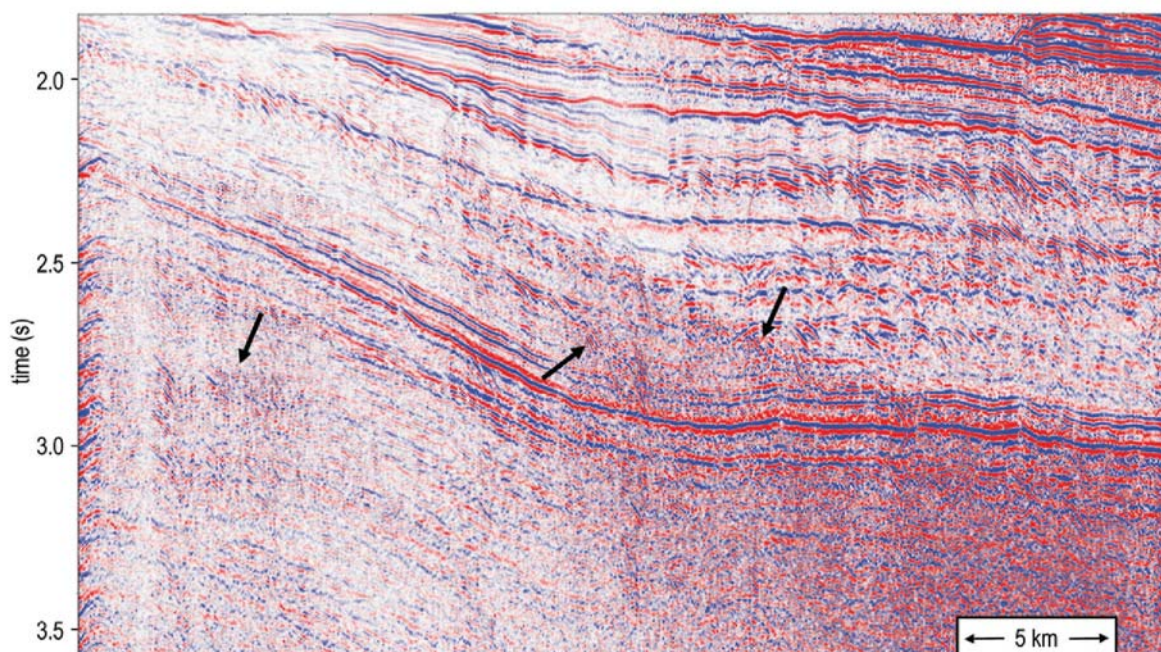


Рисунок 6c Набор данных с рисунка 6a с применением 3D SRME с номинальным азимутом. Этот тип подавления кратных дал небольшие улучшения по сравнению с 2D SRME (Рисунок 6b).



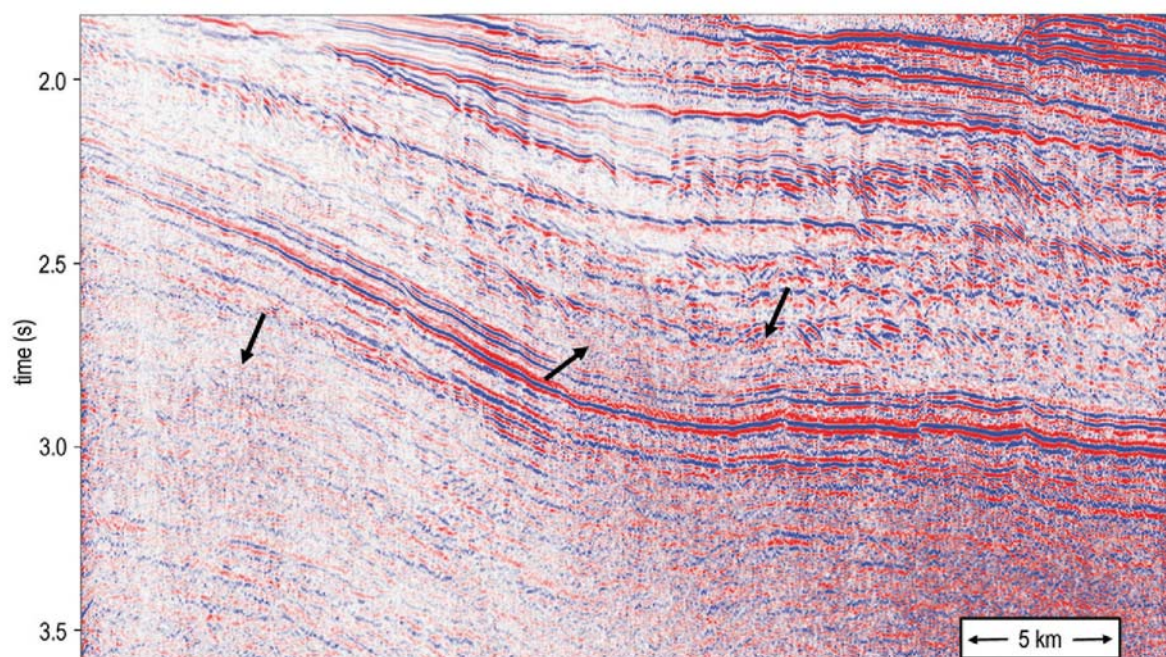


Рисунок 6d Набор данных с Рисунок 6a с применением GSMP. GSMP дал существенное улучшение в подавлении кратных.

Пример с Норвежского моря

На рисунке 6a показан суммарный разрез по ближним удалениям по инлайну для съемки 3D, полученной на глубоководье Норвежского моря. Глубина воды варьирует с 800 по 1200 м. Складчатый рельеф дна

и слои, лежащие непосредственно под дном создают серию кратных волн первого порядка от свободной поверхности, которые затемняют коллекторскую зону. В 2005, стандартный метод 2D SRME был применен к этим данным, полученный результат показан на рисунке 6b.

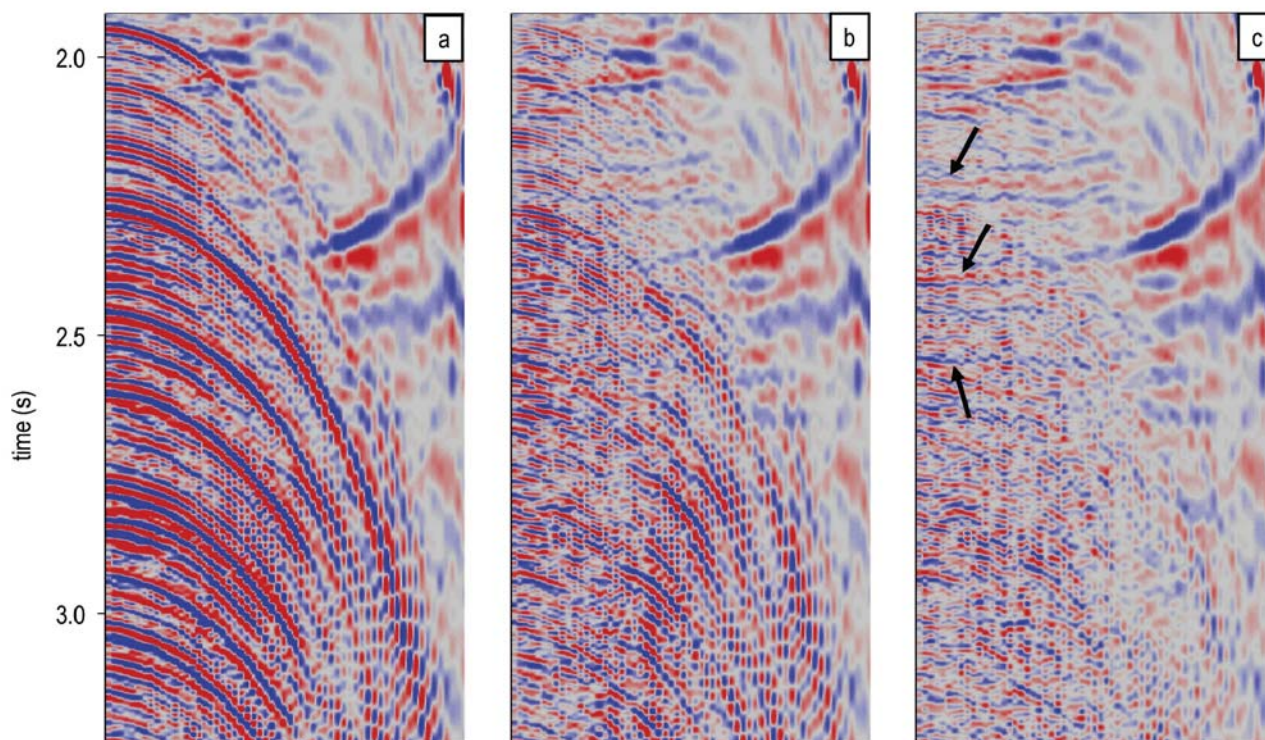
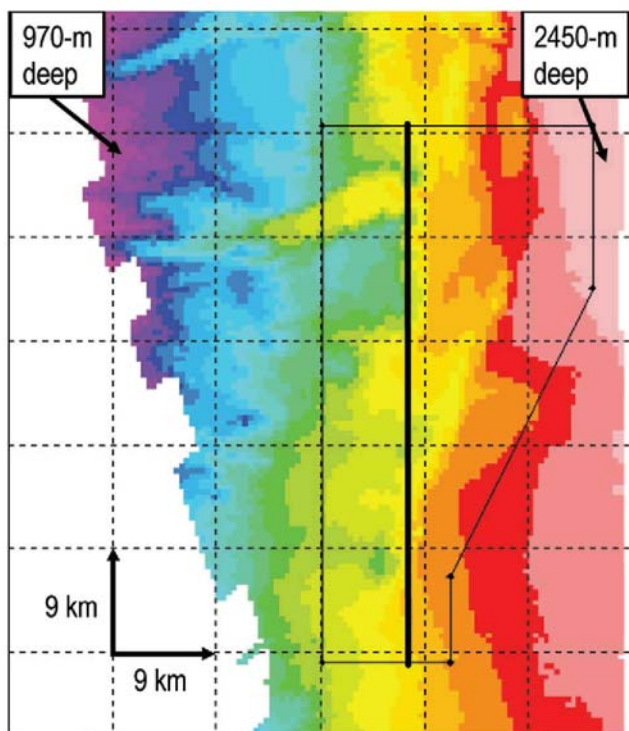


Рисунок 7 Сейсмограмма OCT, с вводом кинематических поправок для набора данных, показанных на Рисунок 6a. а) Перед подавлением кратных. б) После 3D SRME с номинальным азимутом. с) После GSMP с истинным азимутом. Стрелки указывают на однократные отражения, которые стали заметны после выполнения GSMP.

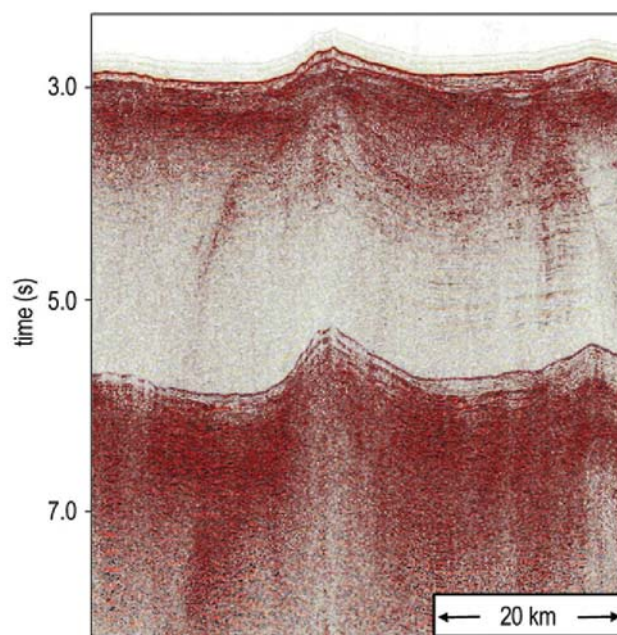


## Обработка данных



**Рисунок 8** Карта глубин воды для набора данных из юго-восточной Азии. Толстая вертикальная линия соответствует сейсмическому профилю, приводимому в Рисунках 9 - 12.

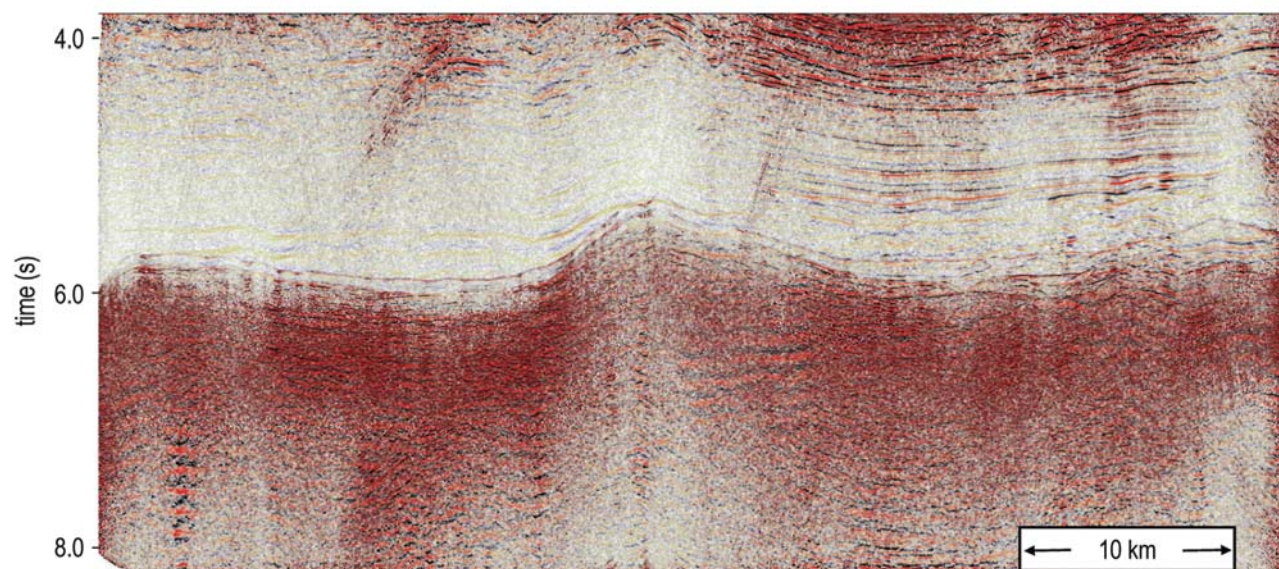
Это превосходный пример технологии 2D подавления кратных: однако, имеется несколько участков, загрязненных остаточными кратными. В попытке сделать лучше, в 2005г. также было применено 3D SRME с номинальным азимутом (Рисунок 6с). Сравнение рисунков 6b и 6с разочаровывает; 3D SRME дало незначительные улучшения по сравнению с 2D SRME.



**Рисунок 9** Ближние удаления для целевого профиля, отмеченного на Рисунке 8. Полностью затемняется все, что лежит под кратными волнами.

В 2008, к наборам данных было применено GSMP, которое дало существенное улучшение (Рисунок 6d) по сравнению с ранее примененным 2D и 3D SRME. Величина амплитуды остаточных кратных существенно уменьшилась, включая энергию некогерентных кратных в правой части разреза. Мы считаем, что большая часть этого улучшения объясняется природой истинных азимутов алгоритма GSMP. Moore и Bisley (2005) обсуждают и иллюстрируют значимость предсказания кратных для истинного азимута.

На рисунке 7 показана сейсмограмма ОСТ с кинематической поправкой для набора данных перед подавлением кратных, после 3D SRME с номинальным азимутом, и GSMP.



**Рисунок 10a** Суммарный разрез по данным, полученным в Юго-Восточной Азии без подавления кратных.



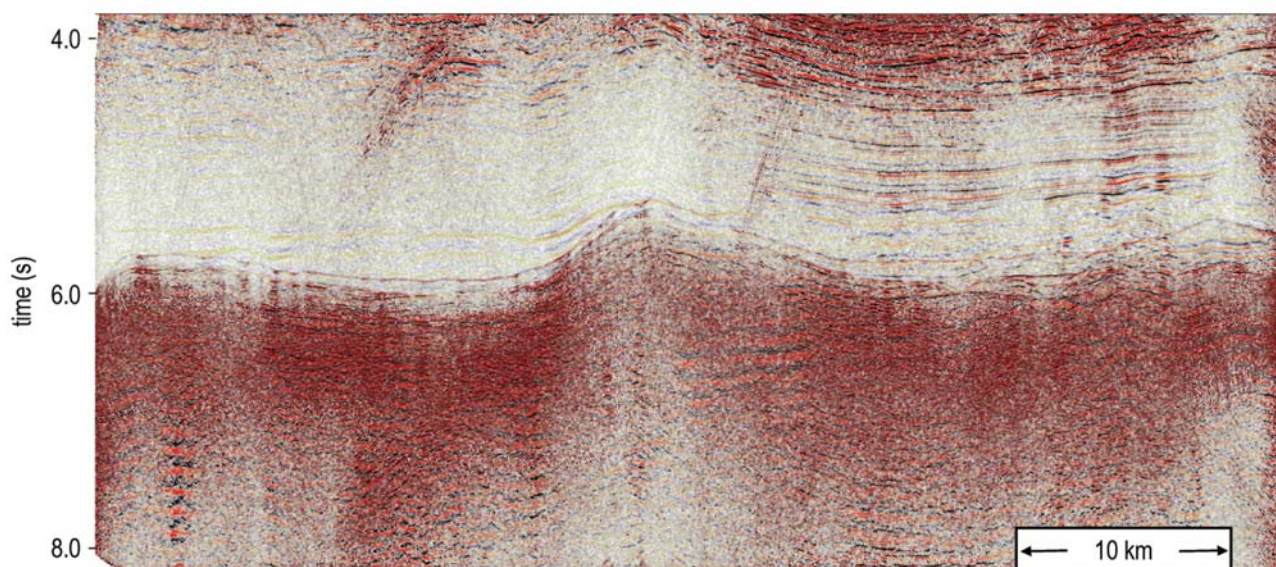


Рисунок 10b Данные с рисунка 10a после применения 2D SRME. Кроме подавления нескольких регулярных кратных, 2D SRME не принес сильного улучшения.

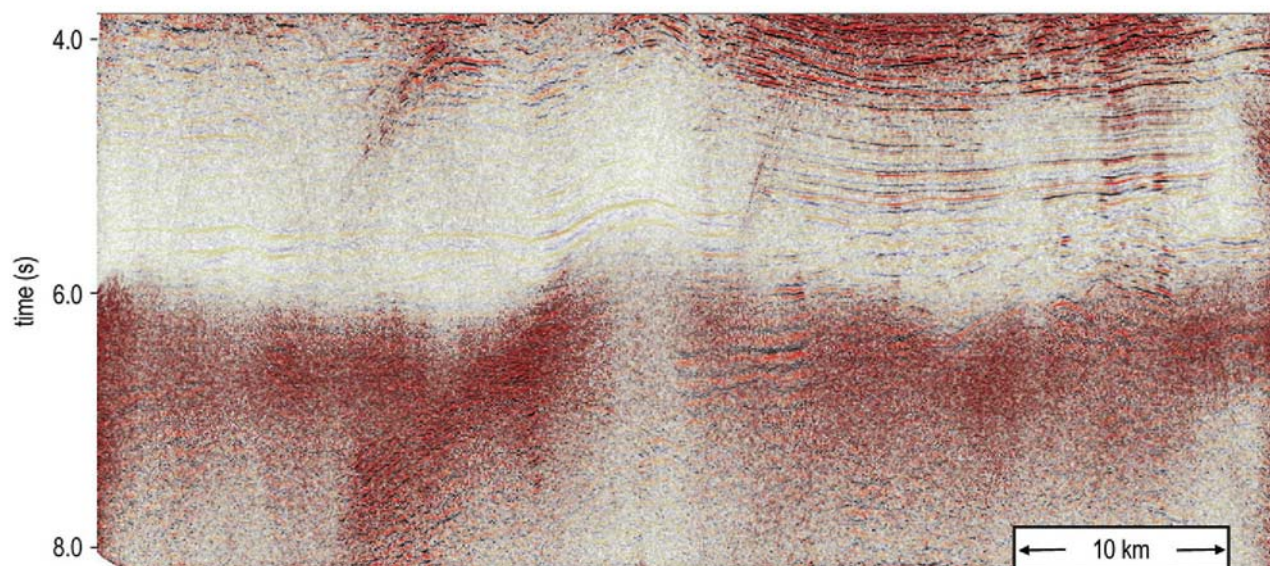


Рисунок 10c данные с рисунка 10a после применения GSMP.

Отметим четкое появление нескольких однократных отражений (стрелка) после GSMP. На рисунке 7 показано, что GSMP улучшает данные по сравнению с 3D SRME с номинальным азимутом для всех удалений, не только для удалений 0-1500 м, которые были просуммированы на Рисунке 6.

#### Пример с Юго-Восточной Азии

Этот пример взят из района с существенной вариацией топографии морского дна (Рисунок 8). Целевой профиль для подавления кратных располагается в направлении простирания, но даже в этом случае имеется существенный наклон по инлайну, как это видно на разрезе ближних удалений, показанных на Рисунке 9. Кратные первого порядка, относящиеся к поверхности имеют сложный вид и содержат сильные когерентные и некогерентные компоненты. Суммирование (Рисунок 10a) почти не дает подавления кратных.

Как в предыдущем примере, коллекторская зона лежит как раз под кратными. В отличие от предыдущего примера, однако, 2D SRME не сильно помогла. Несмотря на то, что большая часть энергии регулярных кратных предсказывается и подавляется, много кратных остается, и 2D SRME почти не имеет воздействия на энергию нерегулярных кратных (Рисунок 10b). GSMP выполняет гораздо лучшую работу по подавлению кратных, чем 2D SRME (Рисунок 10c). В частности, GSMP предсказывает и подавляет все регулярные кратные волны, а также некоторые нерегулярные волны.

На рисунке 11 показано качественное и количественное сравнение кратных, предсказанных методом 2D SRME и GSMP для ближних удалений, показанных на Рисунке 9. При сравнении двух наборов предсказаний в верхней части рисунка с реальными кратными



## Обработка данных

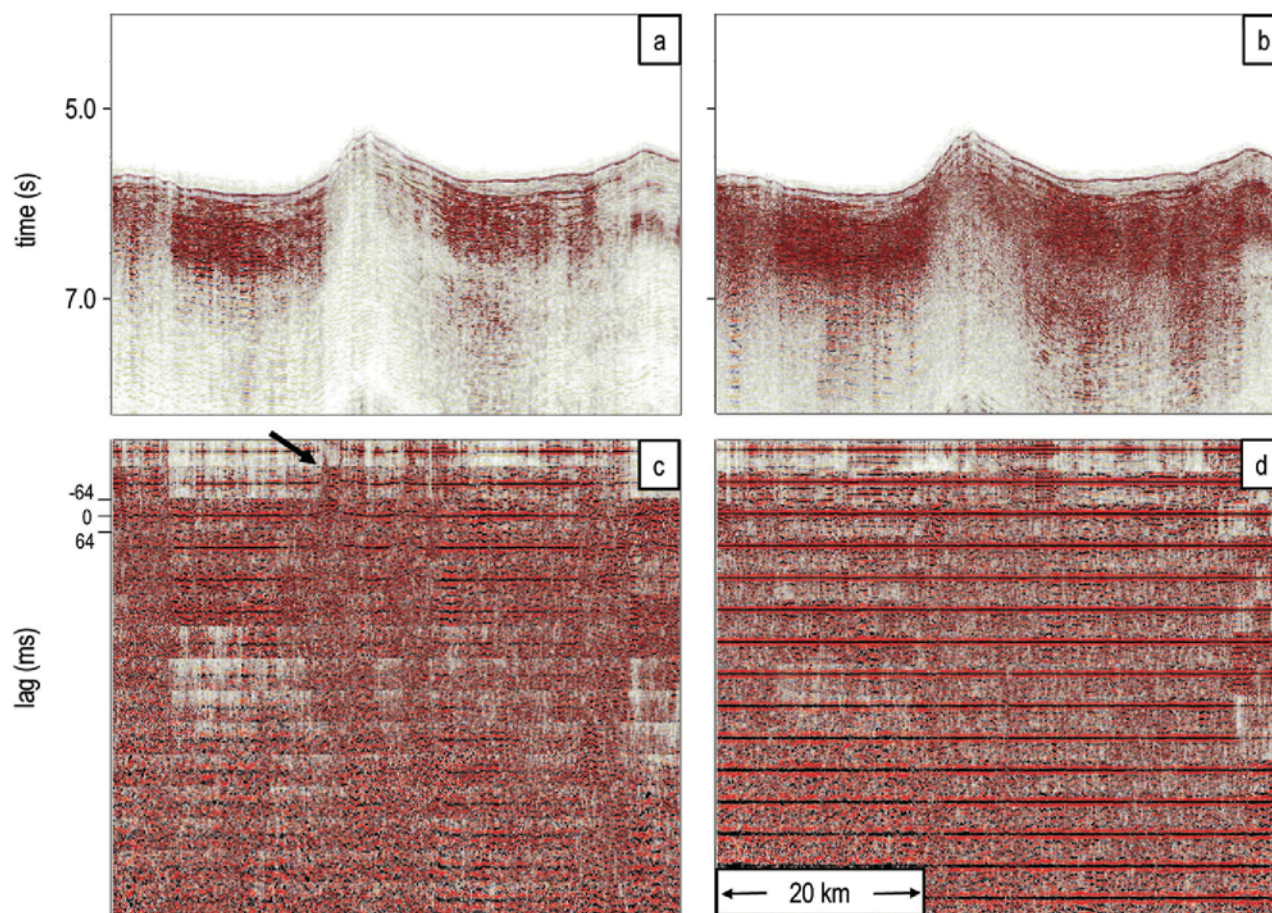


Рисунок 11 Сравнение кратных, предсказанных методом 2D SRME и GSMP для близких удалений показанных на рисунке 9. а) Кратные, предсказанные 2D SRME. б) Кратные, предсказанные GSMP. в) Взаимная корреляция для 2D SRME. д) Взаимная корреляция для 3D GSMP. Черной стрелкой на в) указан максимум корреляции при нулевом сдвиге, который указывает на эффект 3D. Как качественное, так и количественное сравнение показывают, что кратные, предсказанные GSMP, лучше соответствуют реальным кратным (Рисунок 9) чем те, которые предсказаны 2D SRME.

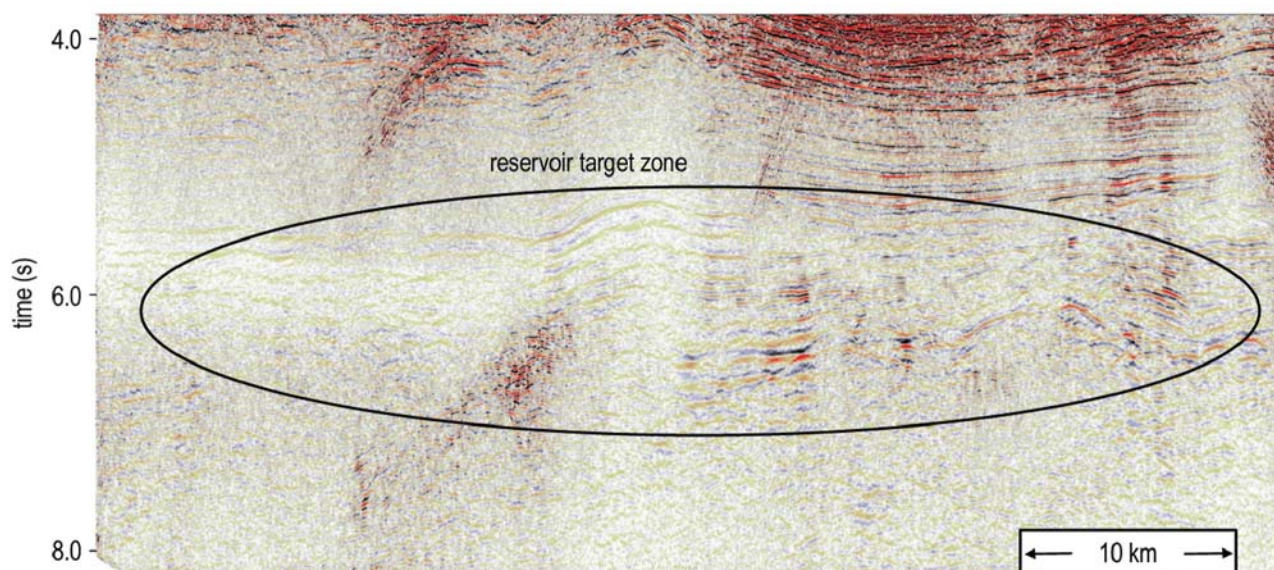
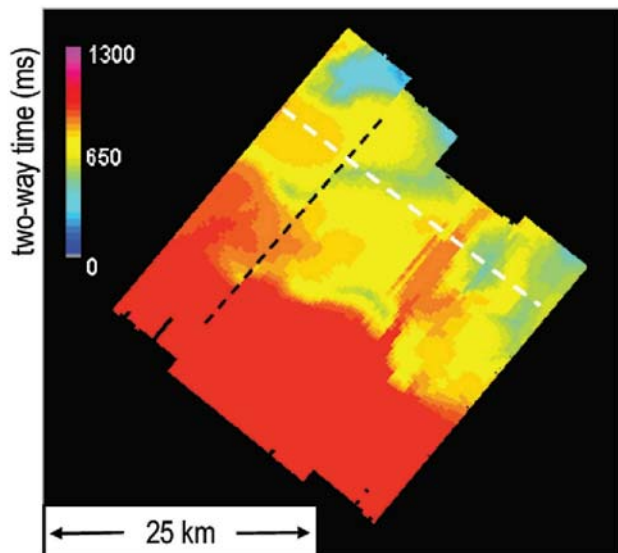


Рисунок 12 Окончательный результат для набора данных по Юго-Восточной Азии. GSMP убрало все регулярные кратные и значительную часть нерегулярных кратных. После подавления остаточных кратных, интерпретируемые оси синфазности появляются в коллекторской зоне.

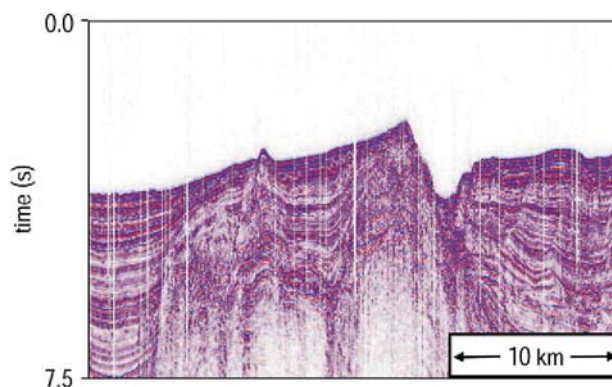


## Обработка данных

Рисунок 13а Пример данных - карта двойных времен пробега отражений от дна для российской части Черного моря. Цвета указывают на времена пробега относительно среднего времени пробега отражения от дна по всей съемке. Белая и черная пунктиры указывают на положение разрезов, приведенных на Рисунках 13b и 14, соответственно.



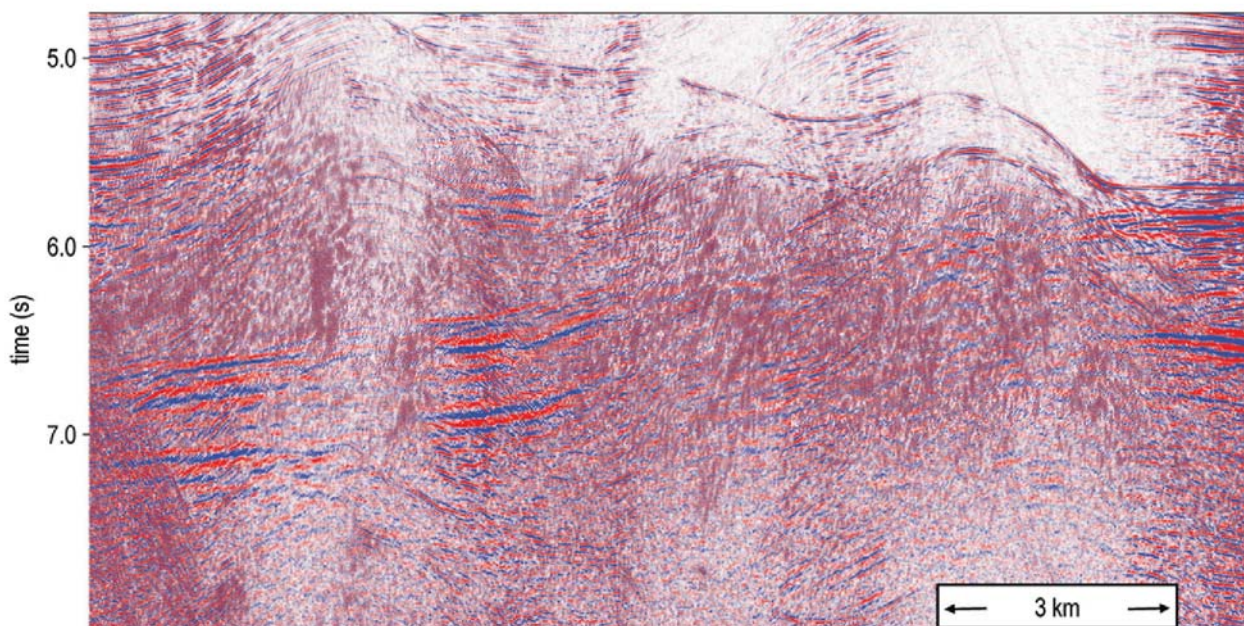
на Рисунке 9, можно заметить, что предсказания метода GSMP выглядят более реалистичными и лучше совпадают. Две нижние панели на Рисунке 11 демонстрируют взаимную корреляцию между каждым набором предсказаний и записанными сейсмическими трассами. Взаимные корреляции были рассчитаны для каскада коротких, перекрывающихся временных окон, чье начальное время отражает форму кратных от морского дна. Превосходное предсказание дает



**Рисунок 13b** Разрез по кросслайну, соответствующий белой пунктирной линии на Рисунке 13а. Отметим сложность топографии морского дна.

Взаимную корреляцию, которая включает всплеск, в ограниченной полосе частот, расположенный на нулевом сдвиге. Взаимная корреляция для 2D SRME в левой части характеризуется эффектами 3D (стрелка) и плохой латеральной прослеживаемостью, в особенности на поздних временах. И наоборот, взаимная корреляция GSMP в правой части плоская, что указывает на то, что кратные, предсказанные GSMP находятся в фазе с реальными кратными и имеют превосходную латеральную прослеживаемость на всех временах.

На основе вышеприведенного анализа двух наборов предсказанных кратных, неудивительно, что GSMP дает лучший окончательный результат, чем 2D SRME. Хотя даже после GSMP, большая часть энергии некогерентных остаточных кратных присутствует в суммарном разрезе (Рисунок 10с). Из-за того, что энергия некогерентна, ее можно подавить с помощью аппарата обработки, который может бороться с энергией такого типа. На рисунке 12 показан



**Рисунок 14а** Перспективный вид разреза с российской части Черного моря, показанный на Рисунке 1. Было выполнено подавление кратных.



## Обработка данных

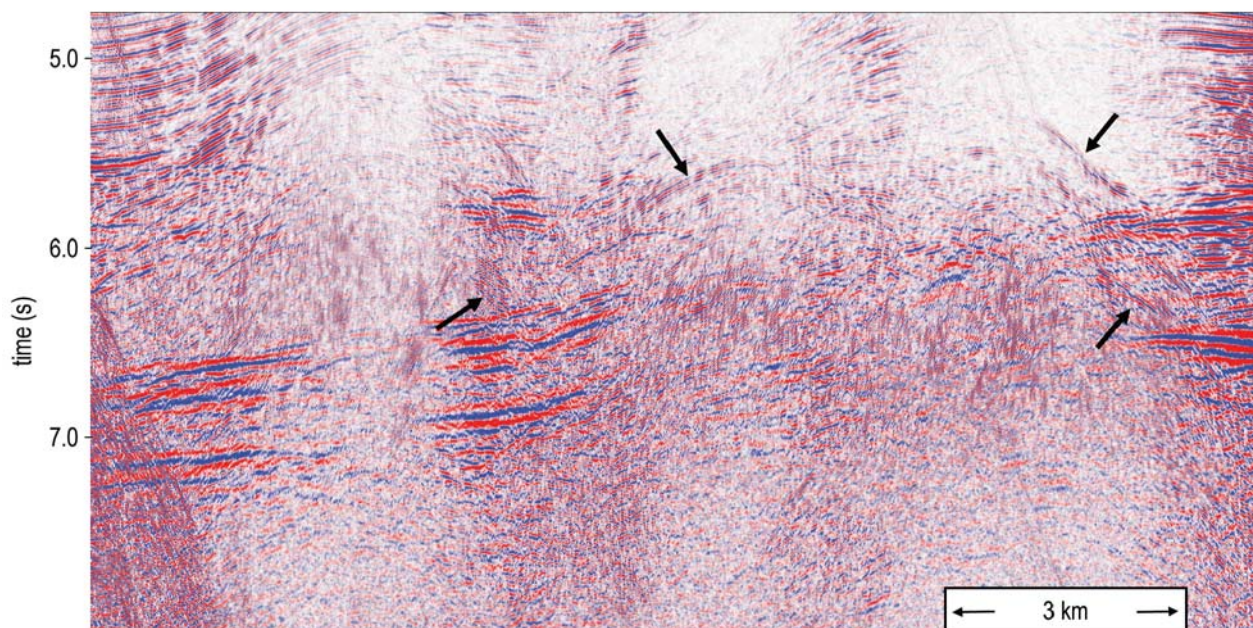


Рисунок 14b Суммарный разрез с рисунка 14a с 2D SRME и применение подавления остаточных кратных. Стрелками показаны участки, где 2D SRME не удалось подавить когерентные кратные.

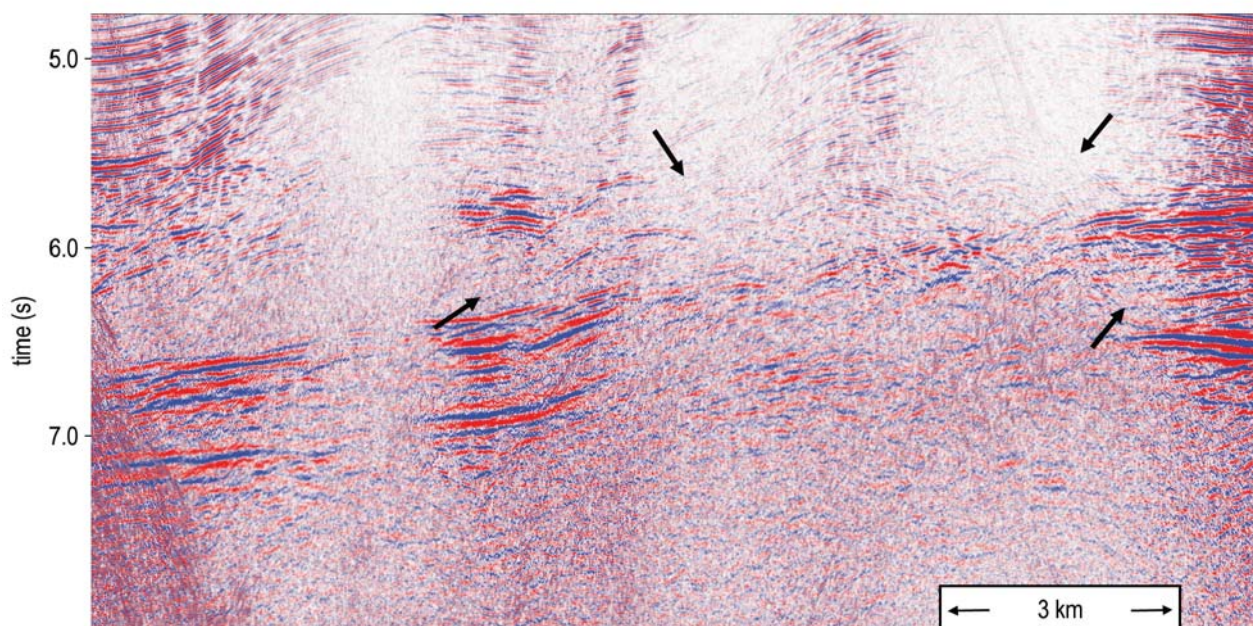


Рисунок 14c Суммарный разрез с Рисунок 14a с GSMP и подавлением остаточных кратных. GSMP оказало лучший эффект, чем 2D SRME при подавлении как когерентных, так и некогерентных кратных.

окончательный результат подавления кратных, который демонстрирует существенное улучшение по сравнению с исходным разрезом (Рисунок 10a). Отметим, что однократные отражения теперь четко видны на разрезе.

#### Пример с Черного моря

Показанный на Рисунке 1 набор данных относится к другому региону, в котором сложная топография дна создает кратные от свободной поверхности,

и чья траектория лучей лежит вне плоскости регистрации (Рисунки 13a и 13b).

Суммарный разрез по инлайну, приведенный на Рисунке 1, Демонстрирует, что несколько типов кратных от поверхности затемняют целевую зону коллектора. Этот профиль был записан

внешней косой расстановки из 10 кос и на ее переднем крае было расстояние между источником и приемником по кросслайну порядка 550 м. На рисунке 14a приведен панорамический вид центральной области, затемненной кратными на Рисунке 1.



## Обработка данных

Первоначально данные были обработаны при использовании 2D SRME (чему предшествовали обычные этапы регуляризации и интерполяции), потом было выполнено подавление остаточных кратных. Результат (Рисунок 14b) был действительно достаточно удачным – большая часть когерентной энергии кратных была подавлена, включая несколько крутопадающих кратных. Однако, как указано стрелками на Рисунке 14b, некоторые когерентные кратные волны не были подавлены 2D SRME. Для сравнения, после GSMP осталось очень мало остаточных кратных (Рисунок 14c). Этот пример примечателен, поскольку в потоке обработки GSMP использовались те же параметры адаптивного вычитания и подавления остаточных кратных, что и были оптимизированы для 2D SRME. Иными словами, все различие между двумя результатами относится только к качеству предсказания кратных.

## Выводы

GSMP – простой, но достаточно элегантный и практичный подход к 3D SRME. В общем случае не требуется накладывать геометрических условий на данные, хотя метод обеспечивает полный контроль над пространственной дискретизацией и пространственной апертурой MCG. Все три примера с данными свидетельствуют о существенном улучшении в подавлении кратных метода GSMP по сравнению с 2D SRME. Кроме того, пример с Норвежского моря продемонстрировал преимущество подхода *истинного азимута* к методу 3D SRME над подходом *номинального азимута*. Хотя в данной статье мы не продемонстрировали, мы обнаружили, что GSMP работает так же хорошо как и в приведенных нами здесь примерах в других геологических условиях и при другой геометрии приемной расстановки (Dragoset et al., 2008).

Поскольку полевые сейсмические данные никогда не смогут быть идеальными, чувствительность к погрешностям является ключом к успеху для любого подхода 3D SRME. Это верно, независимо от того, привносятся ли ошибки непосредственно во время предварительной обработки данных или в процессе работы как в GSMP. Конечно процедура выбора трасс GSMP и использование дифференциальной кинематической поправки являются источниками ошибок. Наши исследования на синтетических данных и опыты с полевыми данными привели нас к заключению о том, что GSMP к счастью реагирует на такие ошибки. То есть, на всем протяжении MCG, погрешности выбора трасс не привносят никакой систематической ошибки, которая бы повлияла на временные отметки предсказанных кратных. Более того, поскольку поправки в величины удаления, которые нужны в GSMP, сами обычно достаточно малы, ошибки, вносимые путем применения дифференциальных кинематических поправок, даже в случае, когда скорость недостаточно корректна, также малы.

## Благодарности

Концепция, разработка, внедрение и тестирование алгоритма GSMP – дело многих людей. Мы благодарим следующих людей, которые внесли основной вклад: Richard Bisley за вклад в концепцию; Scott Slaton, James Wu, Jens Moeller, Andre Latour, Wayne Wright, и Ovidiu Cristea

за разработку программного обеспечения; Steven Powell, Steve Traylen, и Wei Zhao за тестирования программного обеспечения; и Alan Teague и Alex Cooke за управление и поддержку проекта. Мы благодарны ChernomorNeftegaz и StatoilHydro за разрешение на публикацию примеров по российской части Черного моря и Норвежскому морю, соответственно. Мы признательны следующему персоналу WesternGeco за обработку данных и подготовку иллюстраций: Johannes Hvidsten, Stephen McHugo, Bruce Webb, Tatiana Grechishnikova, Richard Whitebread, и Kristiawan Candra. В заключение, мы благодарим WesternGeco за разрешение на публикацию данной статьи.

## Литература

- Baumstein, A., Hadidi, M.T., Hinkley, D.L. and Ross, W.S. [2005] A practical procedure for application of 3D SRME to conventional marine data. *The Leading Edge*, 24, 254-258.
- Bisley, R. and Moore, I. [2005] Fast 3-D surface multiple prediction. *PCT patent application*, WO 2005/103765 A1.
- Ceragioli, E., Melois, A. and Hugonnet, P. [2007] Wide azimuth feasibility study — Key processing considerations for an optimum design. *69<sup>th</sup> EAGE Conference and Exhibition*, Extended Abstracts, C011.
- Dix, C.H. [1948] The existence of multiple reflections. *Geophysics*, 13, 49-50.
- Dragoset, B., Moore, I. and Kostov, C. [2006] The impact of field survey characteristics on surface-related multiple attenuation. *Geophysical Prospecting*, 54, 781-791.
- Dragoset, B., Moore, I., Yu, M. and Zhao, W. [2008] 3D general surface multiple prediction: An algorithm for all surveys. *78<sup>th</sup> SEG International Exposition and Technical Meeting*, Expanded Abstracts, to be published.
- Friedman, J.H., Bentley, J.L. and Finkel, R.A. [1977] An algorithm for finding best matches in logarithmic expected time. *ACM Trans. Math. Software*, 3(3), 209-226.
- Kurin, E., Denisov, M.S. and Lokshtanov, D. [2006] A method for 3D surface-related multiple prediction in case of coarse sampling. *EAGE International Conference and Exhibition, St. Petersburg*, B032.
- Moore, I., Bisley, R. and Dragoset, W.H. [2005] Generalized 3D surface multiple prediction. *PCT patent application*, WO 2005/103764.
- Moore, I. and Bisley, R. [2005] 3D surface-related multiple prediction (SMP): A case history. *The Leading Edge*, 24, 270-274.
- Moore, I. and Dragoset, B. [2008] General surface multiple prediction (GSMP): A flexible 3D SRME algorithm. *70<sup>th</sup> EAGE Conference and Exhibition*, Extended Abstracts, G043.
- van Dedem, E.J. and Verschuur, D.J. [1998] 3D surface-related multiple elimination and interpolation. *68<sup>th</sup> SEG International Exposition and Technical Meeting*, Expanded Abstracts, 1321-1324.
- van Dedem, E.J. and Verschuur, D.J. [2001] 3D surface multiple prediction using sparse inversion. *71<sup>st</sup> SEG International Exposition and Technical Meeting*, Expanded Abstracts, 1285-1288.