

## Зеркальное изображение данных OBS. Mirror imaging of OBS data

Sergio Grion,<sup>1</sup> Russell Exley,<sup>2</sup> Michel Manin,<sup>4</sup> Xiao-Gui Miao,<sup>3</sup> Antonio Pica,<sup>4</sup> Yi Wang,<sup>1</sup> Pierre-Yves Granger,<sup>4</sup> и Shuki Ronen<sup>1</sup>

Мировая потребность в энергии возрастает, в то же время сокращаются углеводородные запасы. Производители вынуждены разведывать и производить нефть и газ все в более трудных условиях и максимизировать извлечение существующих запасов. Новые технологии всегда были ключом к успеху. Одной из таких технологий является регистрация сейсмических данных с помощью узлов океанической донной станции (OBS) (Berg et al., 1994; Ronen et al., 2003; Amal et al., 2005; Docherty et al., 2005; Granger et al., 2005).

Косы, буксируемые на поверхности дают превосходные сейсмические данные для разведки целей разведки, разработки и мониторинга добычи. Однако, косы имеют ограничения, что является мотивом для поиска альтернативных технологий. При использовании кос, имеющиеся препятствия, такие как добывающие платформы, требуют подстрела, на близких удалениях наблюдается дефицит данных, а также аномальные азимутальные распределения. Узлы OBS гораздо менее чувствительны к препятствиям и позволяют добиваться более полного покрытия. При развертывании с помощью дистанционно управляемого устройства (ROV), их можно разместить очень аккуратно, вплотную или даже под эксплуатационной установкой.

Препятствия являются не единственной причиной разработки технологии OBS. Даже в отсутствии препятствий, узлы OBS облегчают построение широкоазимутальной геометрии, которая важна для картирования структур под сложными перекрывающимися породами, такими как соляные обстановки. В частности, путем перемещения приемников на морское дно и произведения записи по плотной сетке источников на поверхности моря, мы можем создать набор данных, подходящий для миграции на основе волнового уравнения, с хорошей дискретизацией по азимутам и удалениям, и обеспечить оптимальное освещение недр; традиционный сбор данных с помощью буксируемой косы не может дать этот тип данных ввиду ограничений, накладываемых фиксированной геометрией источника-приемник. Действительно, хотя становится популярным метод широкоазимутальной буксируемой косы (WATS), который также может дать данные подходящие для проведения миграции на основе волнового уравнения (Threadgold et al., 2006), он требует отдельных кораблей источников, а также повторяющихся взрывных профилей с различными положениями косы. Такие усилия затратны и для малых площадей (до 400 км<sup>2</sup>), технология OBS может потребовать меньших затрат чем WATS. Таким же образом, проведения мониторинга в рамках периодических сейсмических съемок (4D) требует повторяемости сбора данных; узлы OBS, развернутые ROV, обеспечивают лучшую повторяемость, чем косы, которые подвержены отклонению от курса из-за наличия течений. На самом деле, ограничения, вызванные отклонением кос, можно сократить при использовании устройств управления косами, управление косами может дать небольшой эффект в несколько градусов, тогда как

отклонение косы может достигать 10° или более. Eiken et al. (2003) сообщают о естественном отклонении косы в пределах +/- 6° в 95% из работ в Норвежском море, и добиться экономически целесообразным образом способности подруливания косы на +/- 3° для компенсации отклонения от курса. Подруливание косы также добавляет шум, который трудно устранить. Узлы, расположенные на морском дне, записывают не только Р-волны, а также S-волны; они являются полезным дополнением к Р-волнам, но не распространяются в воде, и поэтому не могут быть записаны косами, буксируемыми на поверхности. Узлы OBS могут давать четырехкомпонентные сейсмические данные (4C), полученные с помощью гидрофона и трехкомпонентного геофона, что облегчит анализ упругих волн, а также разделение волнового поля и подавление кратных. Применение анализа упругих волн включает построение изображений под газовыми облаками и коллекторов с низким импедансом Р-волн и описания трещин.

Одной из альтернатив узлам OBS является использование океанических донных кабелей (OBC), датчики которых встроены в кабели, а не в узлы. Работа OBC требует меньших затрат, чем OBS на мелководье, но имеются ограничения по глубине и вызванные наличием препятствий, таких как трубопроводы и сооружения на дне. Также, кабели обладают присущей им асимметрией инлайна и кросслайна, которая может приносить в жертву точность векторного воспроизведения.

Хотя поперечные волны являются значимой мотивацией для записи четырехкомпонентных данных на морском дне, главной задачей данной работы является построение изображений Р-волн по данным OBS с разреженными положениями приемников. Развертывание узлов OBS требует значительного времени, а стоимость лодок ROV высока. Таким образом,

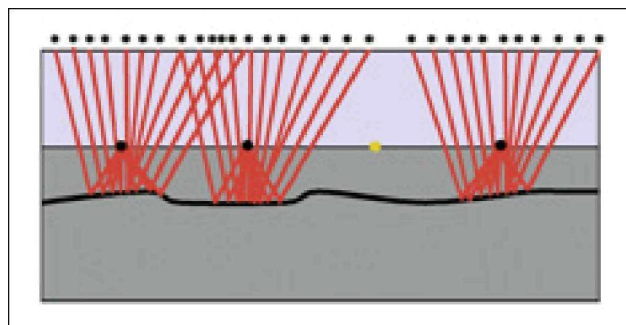


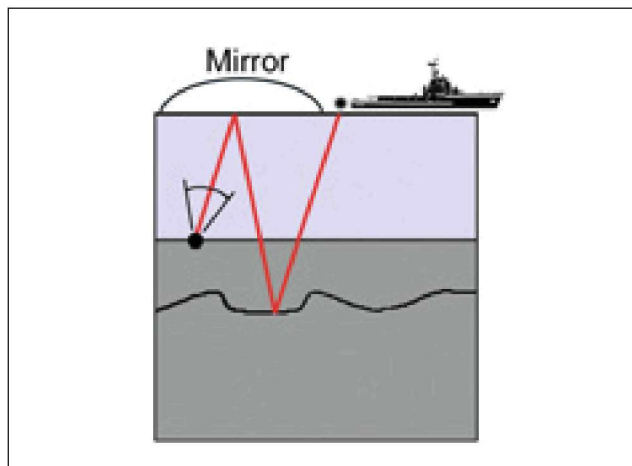
Рисунок 1 Плохое освещение разреженных OBS. Отметим пробелы в покрытии малоглубинных рефлекторов. Эта проблема выводит из себя, если не работает один из узлов OBS. (ПВ показаны черными звездочками, живые и мертвые приемники показаны желтыми и четными точками, соответственно.)

<sup>1</sup> CGGVeritas, 10300 Town Park Drive, Houston, TX-77072, USA.

<sup>2</sup> School of Geography, Earth & Environmental Sciences, University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham, B15 2TT, UK.

<sup>3</sup> CGGVeritas, 715 5th Avenue SW, #2200, Calgary, Alberta T2P 5A2, Canada.

<sup>4</sup> CGGVeritas, 1, rue Leon Migaux, 91341 Massy Cedex, France.



**Рисунок 2** Поверхность моря работает как зеркало для однократных отражений. Нисходящая волна-спутник на приемнике – то же что и восходящая однократная волна, отражения вниз на поверхности моря.

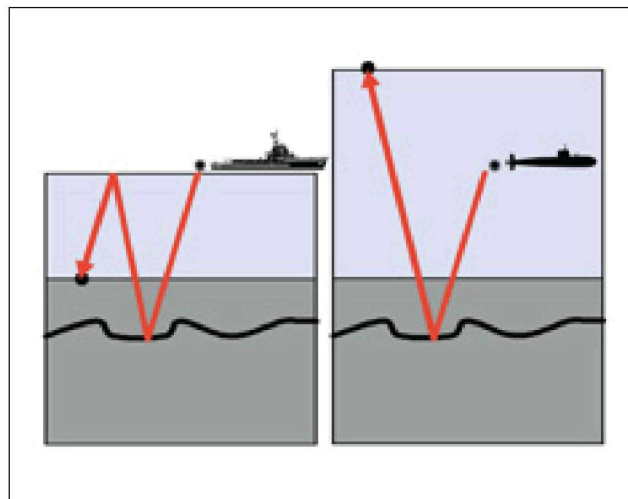
практичная и относительно экономичная геометрия OBS – редкие сетки узлов и плотные сетки выстрелов. Однако, геометрия с резкими узлами обеспечивает слабое освещение, особенно для отражений, которые характеризуются малой глубиной под уровнем дна, чем интервал между узлами (Рисунок 1); это сильно ухудшает ситуацию, если один из узлов OBS не работает.

К счастью, имеется хорошее решение этой проблемы: данные с гидрофонов и геофонов можно разделить на восходящие и нисходящие волны (White, 1965; Bagt and Sanders, 1989). Хотя нормально отображаются только восходящие однократные волны, нисходящие волны-спутники на приемнике являются откликом от тех же отражающих границ, что и однократные волны. Фактически, поверхность моря действует как зеркало, отражающее изображение погруженной структуры (Рисунок 2) и спутники на приемнике можно использовать для 'зеркальных отображений'. Предыдущие авторы успешно построили отображение волн спутников, записанных в различных условиях: океаническими донными гидрофонами (Godfrey et al., 1998), VSP (Jiang et al., 2005) и узлами OBS (Ronen et al., 2005). Pica et al. (2006) также применил зеркальное отображение как часть схемы подавления кратных OBS на основе моделирования. Мы ожидаем, что вскоре зеркальные отображения станут стандартной процедурой обработки данных OBS и OBC.

В данной работе представлен метод зеркальных отображений, а также сравнения результатов обработки традиционных данных и зеркального отображения OBS для данных полученных в Северном море, Норвежском море, и на акватории Западной Африки. Затем мы обсуждаем причины, почему зеркальные изображения превосходят по качеству традиционные изображения, полученные по однократным волнам.

### Очерк метода

Поле волн, записанное гидрофонами,  $P$ , и геофонами вертикальной компоненты,  $Z$ , можно разложить на восходящую и нисходящую компоненты:  $U$  и  $D$ . Тогда как давление непрерывно через границу море-дно, ее восходящая и нисходящая части в общем, не непрерывны и необходимо различать поле волн при разложении над и



**Рисунок 3** Изображение волны-спутника эквивалентно изображению однократных волн, записанных с поверхности, которая в два раза выше.

под дном моря. После корректного масштабирования и обработки с учетом формы импульсов, разложение давления над морским дном задается

$$U_{\pm} = P + Z$$

$$D_{\pm} = P - Z.$$

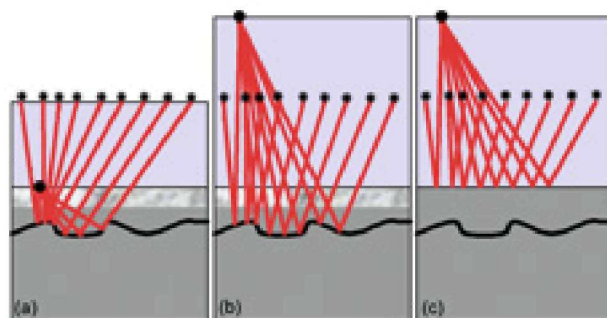
(1)

Несмотря на универсальность метода, и простоту, предыдущие уравнения предполагают вертикальное распространение, а также, что вертикальная скорость смещения частиц масштабируется на импеданс в воде. Также предполагается, что поляризация вертикальной компоненты такова, что восходящие волны имеют ту же полярность для  $P$  и  $Z$ . Также, волны  $U$  и  $D$  под морским дном

$$U_{\pm} = P + KZ$$

$$D_{\pm} = P - KZ,$$

(2)



**Рисунок 4** Освещение восходящей волны (a) более узкое, чем нисходящих волн (b). В частности, отображение морского дна нельзя получить с использованием восходящих волн, его можно получить при помощи нисходящих волн (c). Другим фактором, вносящим свой вклад в улучшение отображения от волн-спутников – скоростные аномалии и рассеяние под морским дном. Приемник в (b) в реальности расположен дальше от аномалий морского дна, чем приемник в (a). Третьим фактором является то, что волны-спутники (b) распространяются ближе к вертикали, чем однократные волны (a).

где  $K = (1+R)/(1-R)$  и  $R$  – коэффициент отражения море-дно. Частой практикой является получение отображения  $U$ , и дальнейшая обработка с целью подавления кратных в водном слое со стороны источника, которые являются восходящими волнами как раз ниже уровня дна.  $U$  предпочтительнее, чем  $U_+$  поскольку реверберации в водном слое являются как восходящими, так нисходящими как раз над уровнем морского дна.

Построение изображений  $U$  является частой практикой, но это не самый лучший выбор для геометрии разреженных приемников. При зеркальных отображениях мы строим изображения нисходящей волны-спутника на приемнике в  $D_+$  как если бы мы записывали данные не со дна, а с поверхности моря, на уровне, который находится в два раза выше. Источник остается на исходном уровне (Рисунок 3). Нисходящие волны-спутники на приемнике в  $D_+$  состоят из восходящих однократных, которые один раз отражаются в водном слое. Это, в общем более информативно, чем восходящие однократные волны в  $U$  поскольку они дают расширенное освещение отражающих границ в недрах (Рисунок 4).

### Примеры полевых данных

Мы иллюстрируем преимущества построения зеркальных отображений используя три примера, по одному с Северного моря, Норвежского моря и Западной Африки. Эти три набора данных OBS сравнимы по интервалу между приемниками, но имеют различные глубины. Преимущества построения зеркальных изображений, но как ожидалось, более заметны для глубоководья. Pica et al. (2006) показали с помощью зеркальных отображений, что протяженность освещаемой зоны зависит только от протяженности расстановки источников и не зависит от глубины морского дна. Однако ограничения по углам при выполнении миграции



Рисунок 5 Карта профилей съемок Britannia и Storegga.

имеют большее влияние на мелководных примерах. Глубинная миграция до суммирования Кирхгофа была использована в первом и втором примерах, а временная миграция до суммирования Кирхгофа для последнего примера по Западной Африке.

Первая группа данных была записана в Северном море на акватории Шотландии, на месторождении Britannia (Рисунок 5). Мы построили изображение по данным девяти OBS, развернутым с интервалом порядка 500 м на глубинах около 150 м. Для задач данной работы мы использовали только одну линию возбуждения, которая была почти

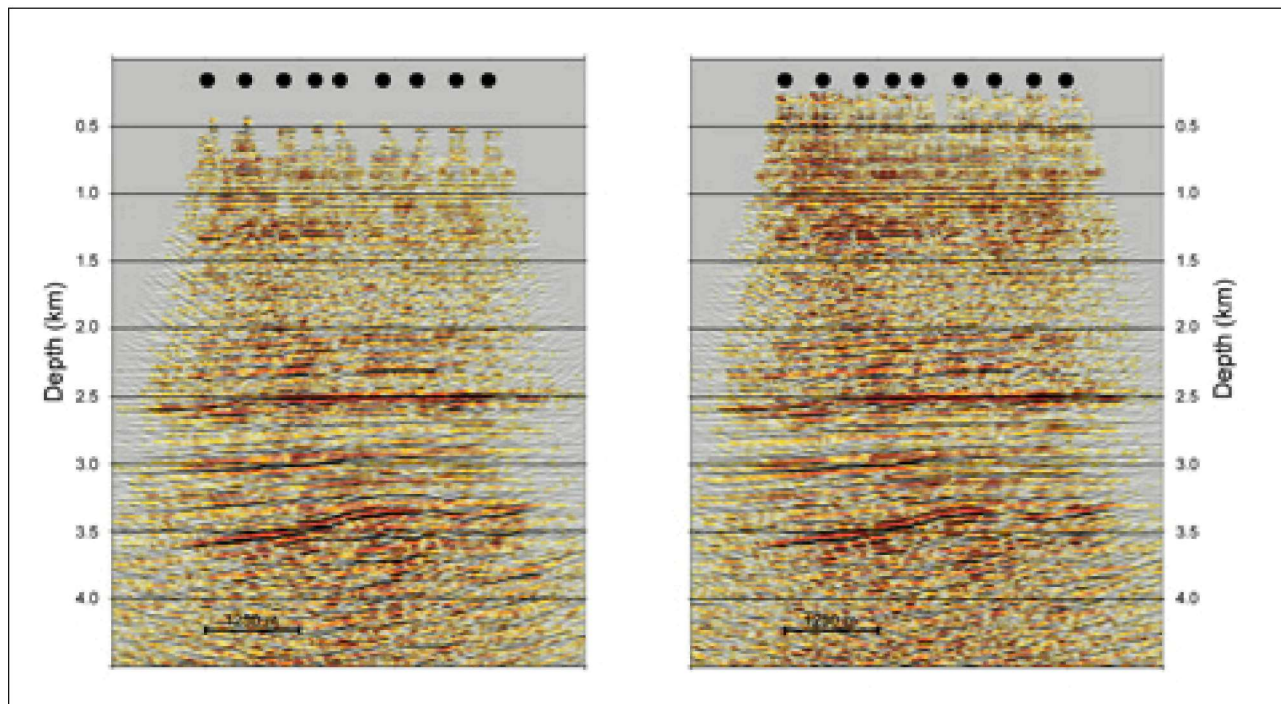


Рисунок 6 Традиционное построение изображений восходящих волн (слева). Отметим плохое отображение малоглубинных отражающих границ. Данные OBS были получены на месторождении Britannia с интервалом 500 м. Размещение узлов показано черным. Зеркальное изображение (справа) демонстрирует улучшение, в особенности для малоглубинного участка. Редкий интервал между приемниками OBS типичен для интервала между кросслайнами OB C в 3D. Схожие улучшения ожидаются при построении изображений 3D данных OBS в направлении кросслайн. Мы ожидаем заметное улучшение для глубоководья.



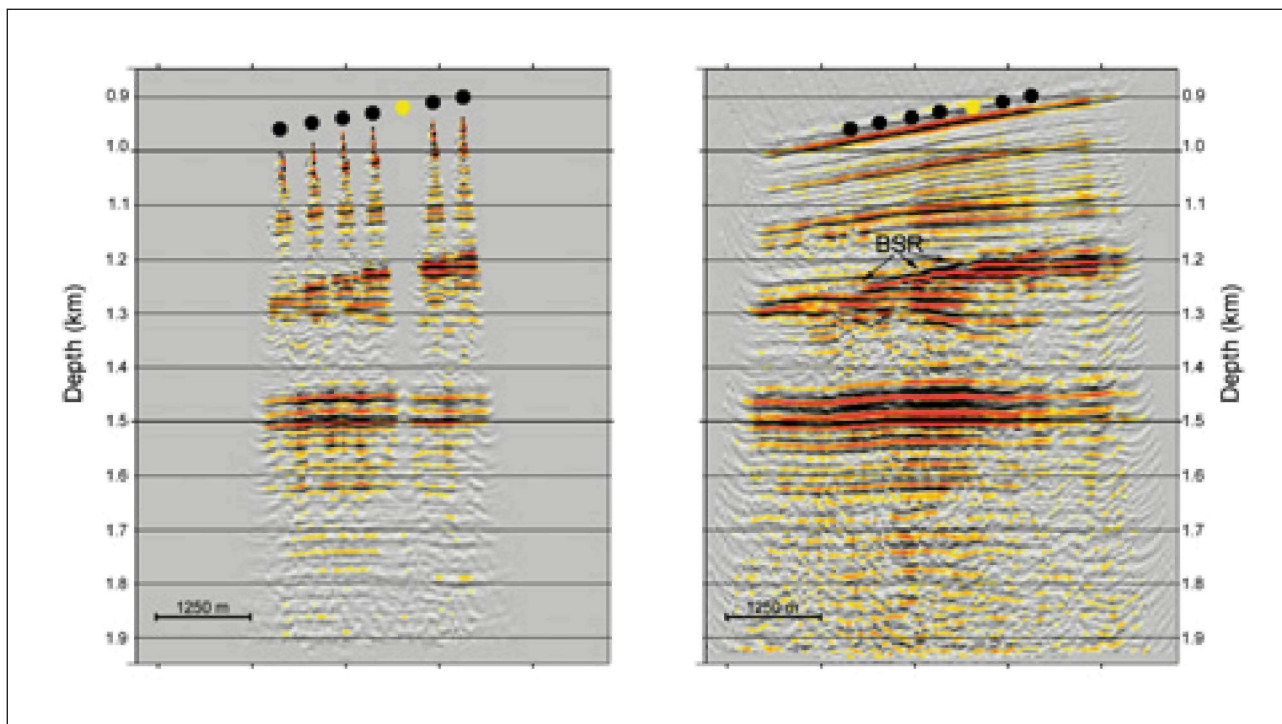


Рисунок 7 Мигрированное изображение для восходящей волны (слева) и зеркального изображения (справа) для оползня Storegga, на акватории Норвегии. Данные получены при использовании семи узлов OBS на расстоянии 400 м. Расположение узлов показано черным. Один узел не сработал, и он показан желтым. Отражающая граница BSR 300 м ниже уровня дна отображается точно при помощи зеркального метода, несмотря на большое расстояние между приемниками.

над OBS. Традиционное изображение, полученное по однократным волнам и изображение, полученное по волнам-спутникам, приведены на Рисунке 6. В качестве второго примера, мы использовали построение зеркальных изображений для данных OBS, записанных на акватории Норвегии, на напорной стенке оползня Storegga (Рисунок 5). Storegga, что означает 'большой край' по-норвежски, является самым крупным из известных подводных оползней. Он расположен в 100 км на акватории Норвегии над гигантским газовым месторождением Ormen Lange. Около 8100 лет назад, область континентального шельфа, равная по площади Ирландии, обрушилась в серии регрессивных событий и вызвала серию больших цунами в Северной Атлантике. Осадки в этом регионе содержат газ гидраты, субстанции, подобные льду, сложенные из метана, который попал в решетку молекул воды. Они стабильны в условиях холодного глубоководья, условия которого благоприятны. На некоторой глубине под уровнем дна, гидраты меняют свою фазу с фазы твердого льда на фазу жидкого газа, преимущественно ввиду возрастания геотермальной температуры. Отражение, повторяющееся отражение от дна (BSR) вызванное контрастом скоростей, является маркером границы между двумя фазами. Метан гидраты важны для предсказания стабильности и могут также стать крупным запасом углеводородов если и когда будет разработана технология добычи.

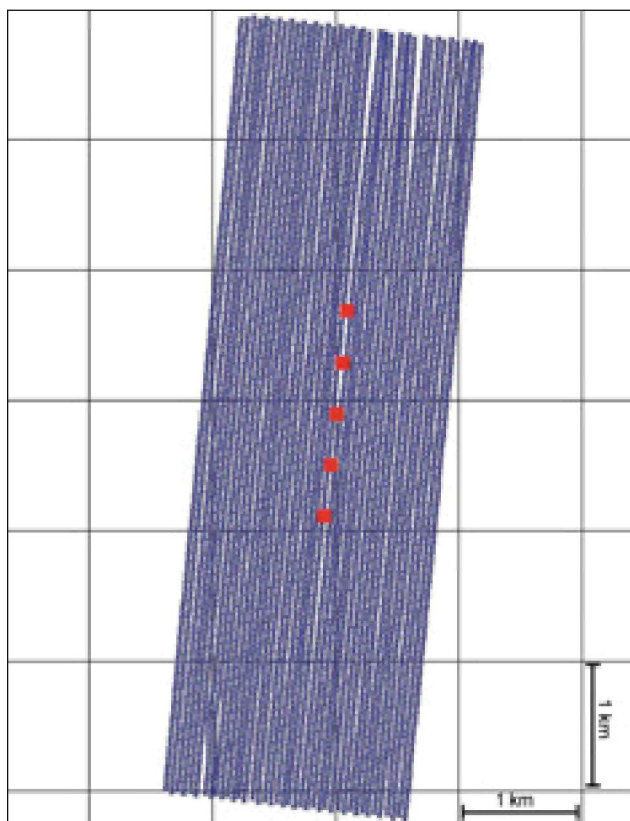
Для изучения метан гидратов и других особенностей Storegga, данные OBS обеспечивают широкоазимутальные данные P и S волн на самой крутой части северной торцевой стены. Целями съемки является малоглубинные осадки, содержащие газ-гидраты. Они были успешно отображены на нисходящих волнах, и продемонстрировали как целевые зоны менее 300 м под

морским дном могут быть отображены с помощью OBS, развернутых на расстоянии 400 м, даже при неполадках на узле (Рисунок 7).

Третий набор данных был записан на месторождении Girassol, оператором которого является Total Angola, на акватории Западной Африки. Для укладки пяти узлов с интервалом 400 м на глубинах 1300 м по прямой линии использовалось приспособление ROV. Судно-сейсмический источник выполняло серию проходов, над узлами для получения полосы из 21 линий возбуждения в прямоугольнике 2 x 6 км. Методика возбуждения flip-flop дало полную сеть с интервалом возбуждения 50 м x 37.5 м (Рисунок 8). Причиной данных испытаний было вехой в записи данных с целью заполнения данных косы, которой мешает глубоководная установка FPSO. Построение зеркального изображения успешно (Рисунки 9 и 10) и дает нам модель отражающей способности морского дна. Эта модель также полезна для подавления кратных от поверхности при помощи метода SRME, основанного на модели (Pica et al., 2006).

### Обсуждение

Мы находим, что изображение волн-спутников лучше, чем изображение на однократных волнах (Рисунки 6, 7, 9 и 10). Главной причиной является то, что освещение более широкое, особенно для малоглубинных целей. Вдобавок, волны-спутники менее чувствительны к вариациям скорости под дном, которые вызывают рассеяние, вариации амплитуд и статику на OBS и OBC (Рисунок 3). Это вызвано тем, что спутники проходят через воду дважды (вверх и вниз) после того, как прошли через аномалии морского дна. Более длинный путь через воду – это преимущество по той же причине, что коса для глубоководья

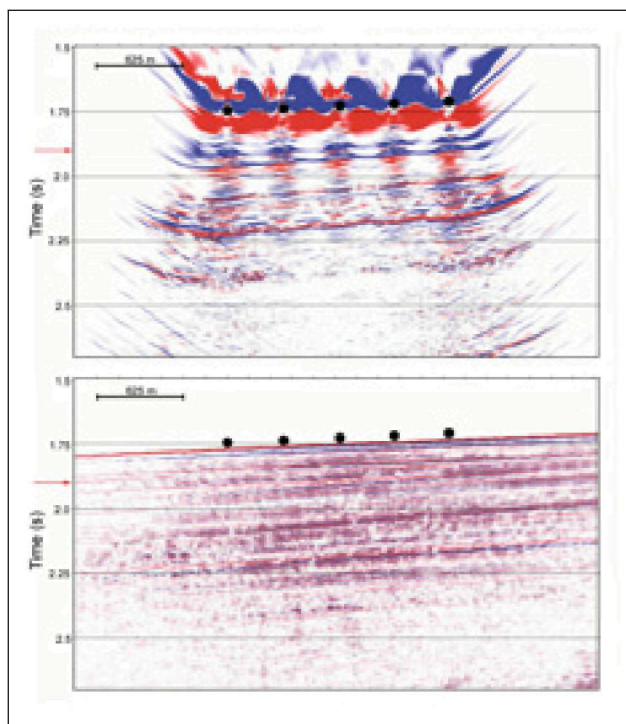


**Рисунок 8** Геометрия съемки на Западе Африки состоит из прямоугольной сети 2 x 6 км на линии из пяти узлов (красные квадраты). Глубина воды 1300 м.

имеет меньше статических эффектов, связанных с морским дном, чем для данных с косами на дне или на мелководье. Необходимо отметить, что это большее время пробега является потенциальным вопросом для проектов 4D, поскольку приливные и сезонные изменения свойств воды имеют большее влияние, чем при отображении однократных. Все же, вариации изменений скорости в водном слое компенсируются в стандартных процедурах при традиционной обработке 4D с использованием однократных волн, и те же методики применяются при построении отображений волн-спутников. Можно поспорить, что другой причиной улучшения изображений при помощи волн спутников является то, что они распространяются ближе к вертикали, чем однократные волны (Schuster 2005, личный разговор). Однако, желательны уменьшенные углы распространения из-за ограничений алгоритмов построения изображений, они также ограничивают эффективность AVO инверсии.

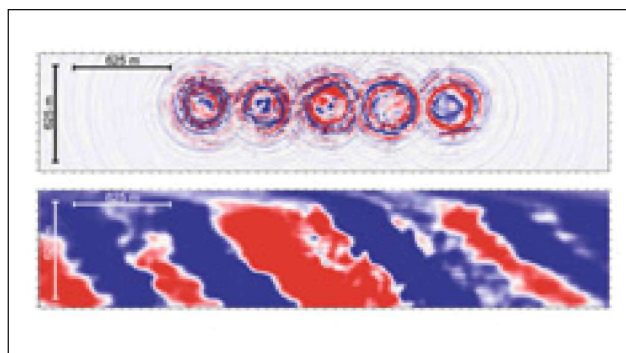
Как отмечено выше, зеркальные изображения обычно дают улучшенное освещение, особенно для малоглубинных целей. Однако освещение зависит от скоростной модели и не является свойством одной только геометрии расстановки. Поэтому возможно, что для заданной скоростной модели традиционное построение изображения может дать лучшее освещение, чем зеркальное для некоторых ограниченных областей пространства. Совместная миграция однократных волн и спутников может дать улучшенные результаты только для зеркальных изображений. Миграция удвоит стоимость зеркального и традиционного построения изображений, поскольку для каждого приемника на морском дне (Рисунок 4а) будет также получено зеркальное изображение приемника (Рисунок 4б).

© 2007 EAGE



**Рисунок 9** Разрез по инлайну по линии возбуждения над узлами (съемка в Западной Африке). Традиционные изображения для восходящих волн (сверху) и изображения, полученные с помощью зеркально метода (внизу). Красные стрелки на 1.9 секундах указывают на место временных срезов на рисунке 10. Отметим хорошее разрешение отражения от дна.

Необходимо также отметить, что более широкое освещение, которое дало зеркальное изображение дается за счет уменьшения кратности освещения. Например, на рисунке 4а и 4б число рассматриваемых лучей одно и то же, но в случае зеркального изображения (Рисунок 4б) они распределены на более широкой области. Однако, ожидается, что хорошее качество данных, достигаемое с помощью OBS, даст надежные изображения, несмотря на эту кратность покрытия. Показанные примеры подтверждают это наблюдение.



**Рисунок 10** Временной срез (1.9 секунд) традиционного изображения (съемка Западной Африки) отображает в основном артефакты миграции (сверху). Метод зеркального отображения компенсирует редкую дискретизацию приемников и отображает пологие отражающие границы (внизу).

Интересно отметить, что построение традиционных изображений с помощью восходящих волн имеет преимущество в том, что они менее чувствительны к эффектам волнения на море, чем при зеркальном отображении. В условиях волнений на море, высота водной колонны зависит от времени и пространства и влияет на волны-спутники как на приемнике, так на источнике (Kragh and Laws, 2006). На построение традиционных изображений, не влияют волны-спутники на приемнике, хотя на него все еще влияет волна-спутник на источнике. Однако, высота волны при нормальной сейсмической работе имеет порядок в несколько метров и это влияние обычно рассматривается как пренебрежимо малое при обработке морских геофизических данных.

### Заключение

Слабое освещение и чувствительность к аномалиям скорости являются проблемами, которые плохо влияют на построение изображений данных океанических данных станций (OBS) и кабелей (OBC). К счастью, имеется эффективное решение. Мы считаем, что можем получить лучшие изображения с использованием нисходящих волн-спутников на традиционных изображениях, получаемых с восходящих однократных отражений. Это большей частью благодаря улучшенному освещению и сокращению влияния малоглубинных неоднородностей под морским дном.

### Благодарности

Авторы хотят выразить признательность Total E&P Angola, Total, Sociedade Nacional de Combustiveis de Angola (Sonangol), Esso Exploration Angola (Block 17), BP Exploration (Angola), Statoil Angola Block 17, и Norsk Hydro за разрешение на публикацию примера данных Girassol. Данные Storegga любезно предоставлены в рамках проекта HYDRATECH EVK3-CT-2000-00043, который финансировала Европейская Комиссия, обработка произведена CGGVeritas. А также авторы благодарны Helmut Jakubowicz и анонимному рецензенту за конструктивную критику и комментарии к рукописи.

### Литература

Amal, R., Bertram, N., and Herron, D. [2005] An experimental nodal OBS acquisition from the Thunder Horse field, Gulf of Mexico. *The Leading Edge*, 24, 410-412.  
 Barr, F. J. and Sanders, J. I. [1989] Attenuation of water-column reverberations using pressure and velocity detectors in a water-bottom cable. *59<sup>th</sup> SEG Annual Meeting*, 653-655.  
 Berg, E., Svenning, B., and Martin, J. [1994] Sumic - a new strategic tool for exploration and reservoir mapping. *56<sup>th</sup> EAGE Conference & Exhibition*, G055.  
 Docherty, P., Hays, D., Shurtleff, R., and Paffenholtz, J. [2005] Data repeatability for a new multi-component OBS node system. *75<sup>th</sup> SEG Annual Meeting*.  
 Eiken O., Aronsen, H., Furre A. H., Klefstad L., Nordby, L.H., Osdal B., and Skaar M. [2003] Seismic monitoring of the Heidrun, Norne and Midgard fields using steerable streamers. *65<sup>th</sup> EAGE Conference & Exhibition*, A30.  
 Granger P.Y., Manin, M., Boelle, J.L., Ceragioli, E., Lefevre, F., and Crouzy, E. [2005] Autonomous 4C nodes used in infill areas to complement streamer data, deepwater case study. *75<sup>th</sup> SEG Annual Meeting*.

Godfrey, R. J., Kristiansen, P., Armstrong, B., Cooper, M., and Thorogood, E. [1998] Imaging the Foinaven ghost. *68<sup>th</sup> SEG Annual Meeting*, 1333-1335.

Jiang, Z., Yu, J., Schuster, G.T., and Hornby, B. E. [2005] Migration of multiples. *The Leading Edge*, 24, 315-318.

Kragh, E. and Laws, R. [2006] Rough seas and statistical deconvolution. *Geophysical Prospecting*, 54, 475-485.

Pica, A., Manin M., Granger P.Y., Marin D., Suaudeau E., David B., Poulain G., and Herrmann Ph. [2006] 3D SRME on OBS data using waveform multiple modeling. *76<sup>th</sup> SEG Annual Meeting*, 2659-2663.

Ronen, S., Ansorger, C., Leggott, R., Hawkins, K., Mills, K., Nicholls, P., Ratcliffe, A., and Scott, L. [2003] Combined Ocean Bottom Stations and Streamers (COBS). *CSEG Recorder*, October.

Ronen, S., Comeaux, L., and Miao, X.G. [2005] Imaging downgoing waves from ocean bottom stations. *75<sup>th</sup> SEG Annual Meeting*.

Threadgold, I. M., Zembeck, K., Aas, P. G., Fontana, P. M., Hite, D., and Boone, W.E. [2006] Implementing a Wide Azimuth Towed Streamer field trial: the what, why and mostly how of WATS in Southern Green Canyon. *76<sup>th</sup> SEG Annual Meeting*.

White, J.E. [1965] *Seismic waves: radiation, transmission and attenuation*. McGraw-Hill.