

## Многодисциплинарный выпуск

# Другой взгляд на построение полноволновых сейсмических изображений. Another look at full-wave seismic imaging

Jason Criss из Input/Output дает обоснование построению полноволнового сейсмического изображения и приводит некоторые примеры недавних съемок в качестве иллюстрации преимуществ этой быстро развивающейся технологии.

**В** своем чистом виде, концепция построения полноволнового (многокомпонентного) сейсмического изображения существовала в нашей индустрии уже несколько десятилетий. Только за последние несколько лет регистрирующая сейсмическая аппаратура и методы обработки продвинулись достаточно для того, чтобы сделать концепцию жизнеспособной. Введение систем с высоким числом каналов в конце 1990х дало возможность развивать некоторые аспекты полноволнового изображения; при комбинировании высокого числа каналов с трехкомпонентными цифровыми датчиками (3С), первые съемки, полностью соответствующие требованиям о полноволновой съемке, стали реальными на практике.

В действительности концепция полноволнового представления очень проста. Идея заключается в записи данных отраженных сейсмических волн с точностью и тем способом, что отражает реальное движение частиц в разрезе. Иными словами, мы хотим, чтобы регистрация, инструменты, и методы работы были, насколько возможно, наиболее прозрачными, тогда как в то же время, записывать наиболее точный полный сейсмический сигнал, который нам дает Земля. Если достигнута эта цель, то обработка данных, анализ, и интерпретация не будут принципиально ограничиваться самим этапом регистрации данных. Таким образом, записывающая аппаратура, является жизненным аспектом построения полноволновых изображений и получения сейсмических данных лучшего качества и более универсальных, практически в каждом регионе мира.

## Обзор полноволновой концепции

Конечной целью полноволновой сейсмики является сбор и интерпретация изображений разреза с лучшим разрешением, более «разумным» и более гибким способом, прокладывая путь для более ценных сейсмических данных. Для достижения цели и придания процессу сбора данных большей прозрачности, геофизикам требуется более продвинутая аппаратура сбора данных и комплексная оперативная стратегия.

## Требования к построению полноволновых изображений

- 1). Трех-компонентные точечные датчики с высокой точностью воспроизведения
- 2). Превосходные методы работы с источниками, направленные на ограничение искажений данных
- 3). Системы регистрации с высоким числом каналов, характеризующиеся
  - a. записью широкоазимутальных полностью дискретизированных данных,
  - b. записью данных в реальном времени
  - c. Высокоэффективной работой в поле
- 4). План съемки, настроенный на построение изображение объектов, а не ограничения оборудования

За последние несколько лет, операторы E&P и сейсмические подрядчики начали использовать полноволновую концепцию во многих частях земного шара. Они начали © 2007 EAGE

получать обещающие результаты на областях с улучшенным качеством изображения разреза, эксплуатационной производительностью, и успехами в области техники безопасности. По мере того, как промышленность продолжает свой путь к полноволновому представлению, пришло время взглянуть по-другому на его прогресс.

## XinChang, Китай

Southwest Gas, дочерняя компания Sinopec, уже многие годы активно разрабатывала регион к северу от Chengdu. Добыча газа в этом регионе ведется из коллекторов, расположенных в интервале глубин от 2500 до 6000 м. Большая часть из них может быть отнесена к газу, залегающему в плотных породах. Наиболее успешные скважины были пробурены на основе детальной модели разреза, который включает точную структурную карту на целевой глубине, а также информацию о модели разломов в коллекторе. Ранее проведенная сейсмическая съемка на этой области дала частичные ответы на вопрос о характеристиках коллектора; однако, для полной разведки запасов компании Southwest Gas потребовались лучшие результаты.

В 2000 г., Southwest Gas уже начала оценку потенциала методики построения полноволновых изображений в регионе Chengdu. После проведения геофизического анализа и пилотных тестов, Southwest Gas перешла к широкому развертыванию полноволновой методики. Команда по внедрению включала Southwest Gas в качестве оператора E&P, I/O в качестве провайдера методики и услуг построения изображения, и BGP в качестве владельца оборудования для полноволновой методики съемки и поставщика услуг по полевой регистрации данных.

Регистрация сейсмических данных проводилась в октябре 2004 г. BGP записала данные самого крупномасштабного и агрессивного полноволнового проекта из документированных. Компания использовала в поле 6000 станций (18,000 каналов) сконфигурированных для цифровой регистрации 3С. Внимание BGP к деталям регистрации проекта задавало стандарт, который должен являться мерилем всех других проектов. Уделяя внимание таким деталям работы как планирование съемки, развертыванию датчиков, оптимизацию источников, учитывая полноволновую стратегию, BGP записала данные, которые дали поразительные результаты. Даже для исходных данных до суммирования, заметны поразительные улучшения в соотношении сигнал-шум (Рисунок 1).

Контракт на обработку и интерпретацию данных был выигран в июле 2006 г. компанией GX Technology (GXT), дочерним предприятием I/O. Несмотря на то, что обработка и интерпретация все еще были не завершены на момент публикации данной статьи, ранние результаты являются многообещающими. Предварительные результаты говорят о том, что дополнительная значимость данных была приобретена путем использования методов обработки с учетом анизотропии в XinChang. Было показано, что этой области свойственны азимутальные вариации скоростей р-волн (Рисунок 2).

Поскольку методы полноволнового сбора данных улучшают качество и информативность сейсмических данных в анизотропных коллекторах, Southwest Gas



## Многодисциплинарный выпуск

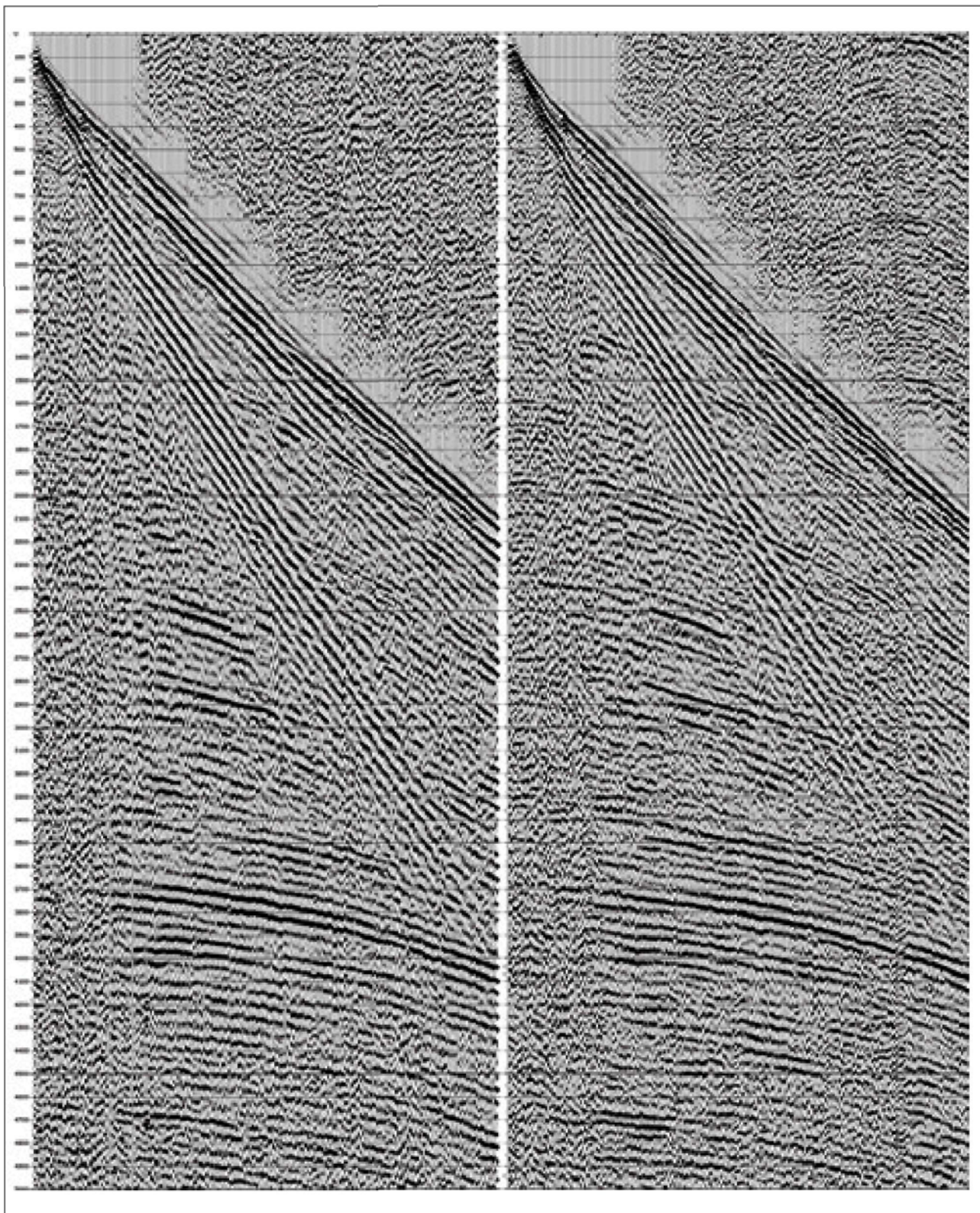
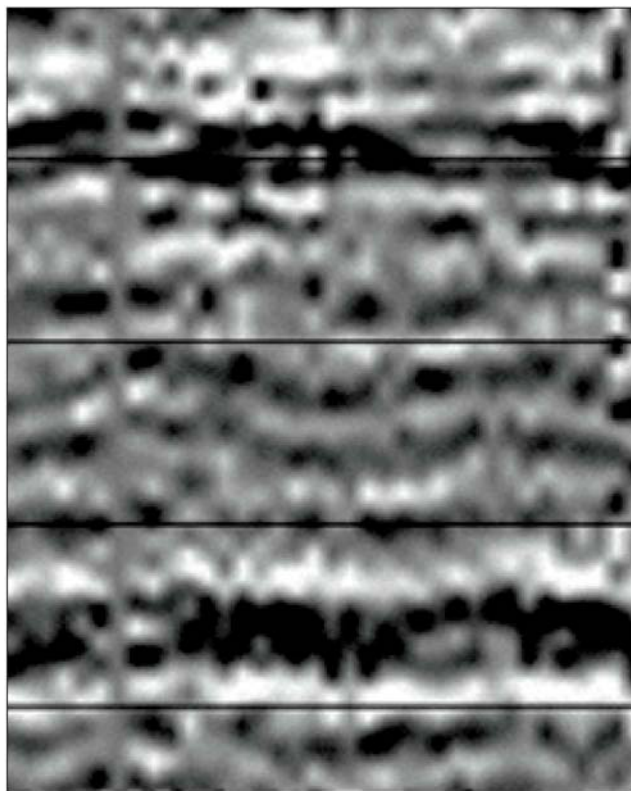


Рисунок 1 Записи для двух пунктов возбуждения, приведенные на рисунках, представляют прямое сравнение между традиционными методами получения данных (слева) и полноволновыми методами (справа). На полноволновой записи виден высокий уровень сигнала на фоне участков шумной записи и в общем, улучшенное соотношение сигнал-шум.



## Многодисциплинарный выпуск



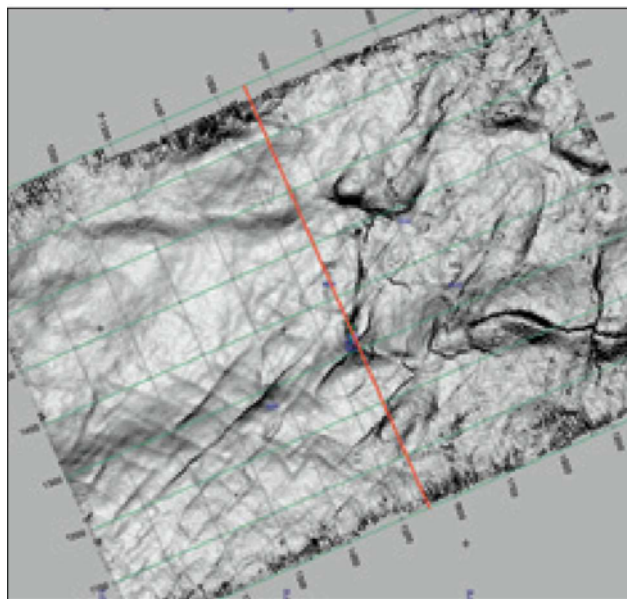
**Рисунок 2** Выборка несуммированных трасс с проекта Southwest Gas, отсортированных по азимуту. В центре изображения, появляется ось синфазности с синусоидальной формой. Она указывает на присутствие азимутальных вариаций скорости, которые могут говорить об изменениях напряжений или разломообразовании в породах.

Получает новую информацию о структуре, разломах, и трещинообразовании на газовом месторождении XinChang gas field. Несмотря на то, что анализ моделей и интенсивности разломов еще находится на ранней стадии, предварительные результаты говорят в пользу двупреломления поперечной волны на участке коллектора, что делает возможным построение карт интенсивности разломообразования, как та, которая показана на Рисунке 3.

Будущая обработка будет уделять особое внимание глубинным изображениям и дополнительному анализу данных обменных волн для того, чтобы увидеть какая полезная информация может быть получена. Проведение такого разнообразного анализа и интерпретация возможны только с использованием полноволновой стратегии в сочетании с грамотным оборудованием, стратегии проведения работ, и продвинутых методов обработки и интерпретации.

### Wamsutter, Вайоминг

Одной из первоочередных целей построения полноволновых изображений является полная дискретизация. Термин полная дискретизация может означать многие вещи. В контексте проекта Wamsutter, он означает экспериментирование с данными ультравысокой плотности, полного азимута, полных наборов удалений, и моделью проведения работ, которая может сделать этот тип построения сейсмических изображений практичным.



**Рисунок 3** Разрез подобия для проекта XinChang. При сочетании с другими атрибутами, полученными по полноволновой методике, детали, наблюдаемые на этом типе изображения можно прокоррелировать с другими измеренными атрибутами физических трасс в целях улучшения конечной интерпретации данных.



**Рисунок 4** FSU (полевой блок станции) - сердце беспроводной системы FireFly компании I/O. FSU, разработанная как полностью автономный блок станции, она уменьшает вес системы FireFly и упрощает ее развертывание. Когда сейсморазведка не ограничивается косами, геофизики свободны в разработке схемы съемки 3D и используют шаг дискретизации, который гармонирует с картируемыми объектами разреза.

В 2005, BP America приступила к агрессивной разработке газовых запасов в Северной Америке. Были намечены инвестиции в газовое месторождение Wamsutter в размере \$2.2 миллиардов в течение следующих десяти лет в целях удвоения добычи. Также было получено \$120 миллионов на применение технологии полевых испытаний, включая новые геофизические

## Многодисциплинарный выпуск

методы, такие как ВСП, межскважинная томография, и получение сейсмических данных высокой плотности.

Геологическое строение области Wamsutter относительно хорошо известно, она включает систему отложений прибрежных песков, залегающих на различных глубинах. Успех бурения этих плотных пород, содержащих газ, подкрепляется детальными моделями разломов, изменений литологии, и соотношений напряжений в пределах газоносных пластов.

Одной из главных препятствий на пути высокоплотной записи всегда было регистрирующее оборудование и необходимость в больших партиях для перемещения аппаратуры. Массивные системы, загруженные разъемными кабелями и сложной электроникой, стали приближаться к пределу физических возможностей полевых бригад в плане развертывания и работы в реальном времени. В сотрудничестве с BP, Apache, и другими нефте-газовыми компаниями и подрядчиками, I/O сконструировала и построила новую систему сбора данных FireFly, которая решает эти проблемы (рисунок 4).

FireFly – безкабельная система, разработанная на основе современных технологий питания, хранения данных, коммуникации и позиционирования. Задуманная как часть операционной среды или 'экосистемы', FireFly бросает вызов всем современным методам сбора данных. Основанный на модели дизайн, управляемая GPS станция, развертывание источника, и модульная беспроводная архитектура системы формируют сейсмическую регистрирующую платформу с неограниченными возможностями станции и являются операционной моделью, которая практична для эффективной, высокоплотной сейсмической записи.

На области проекта Wamsutter исторически были получаемы сейсмические данные высокого качества, на которых прослеживались высокоамплитудные отражения вплоть до самой целевой зоны. Однако, область Wamsutter, и в реальности большая часть региона Rocky Mountain, характеризуется шумами, которые влияют на качество и пригодность данных; одной из ключевых движущих сил проблемы шума является энергия обменных волн.

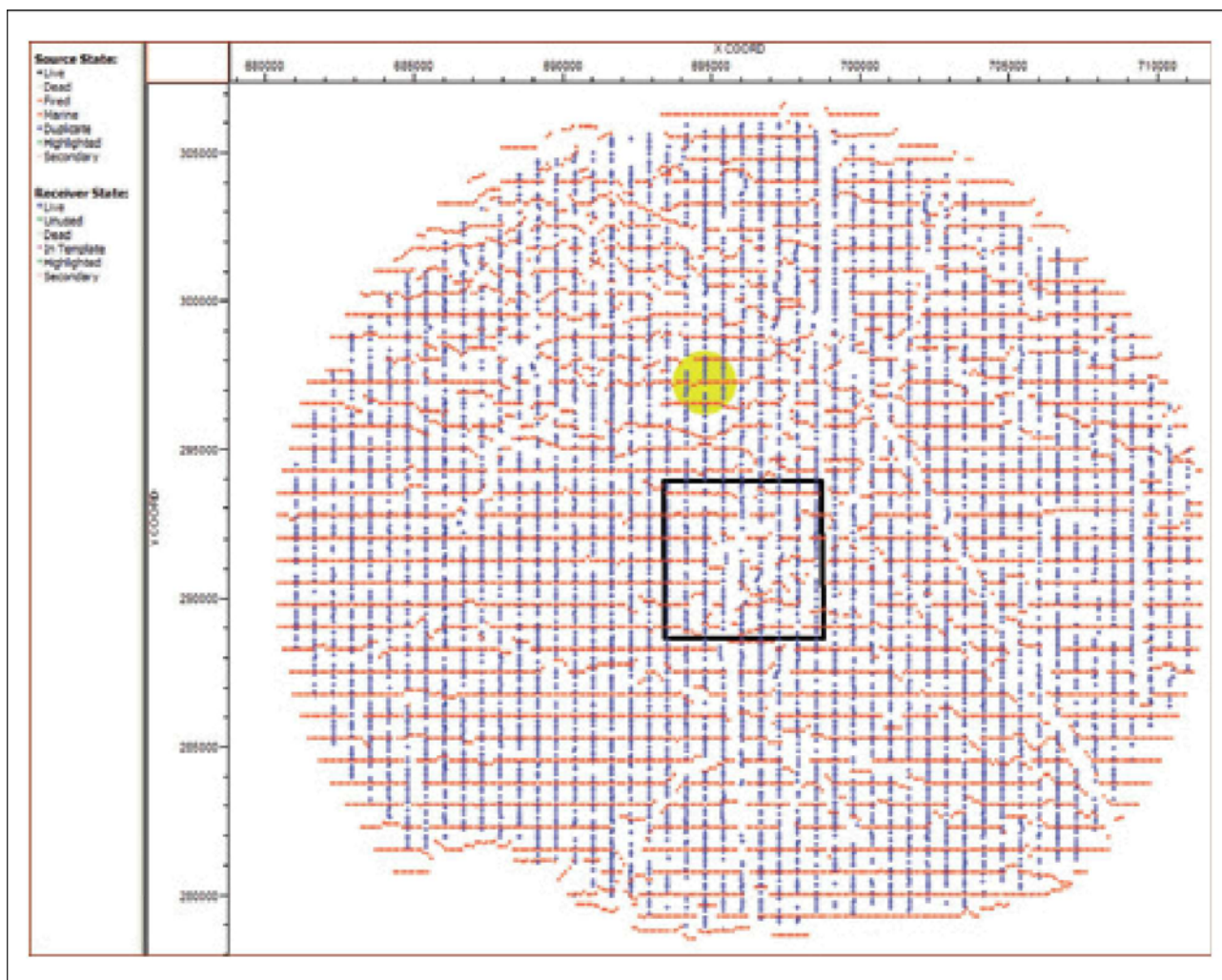


Рисунок 5 Финальная схема съемки, площадью 36 кв. мили на проекте Wamsutter, на которой показаны пункты возбуждения красным цветом и пункты цифровых датчиков синим. Изъятия в схеме вызваны культурными препятствиями и областями с историческими артефактами. Черный квадрат выделяет область площадью одна кв. миля в разрезе, на которой была намечена высокоплотная, широкоазимутальная, запись данных полного набора удалений.



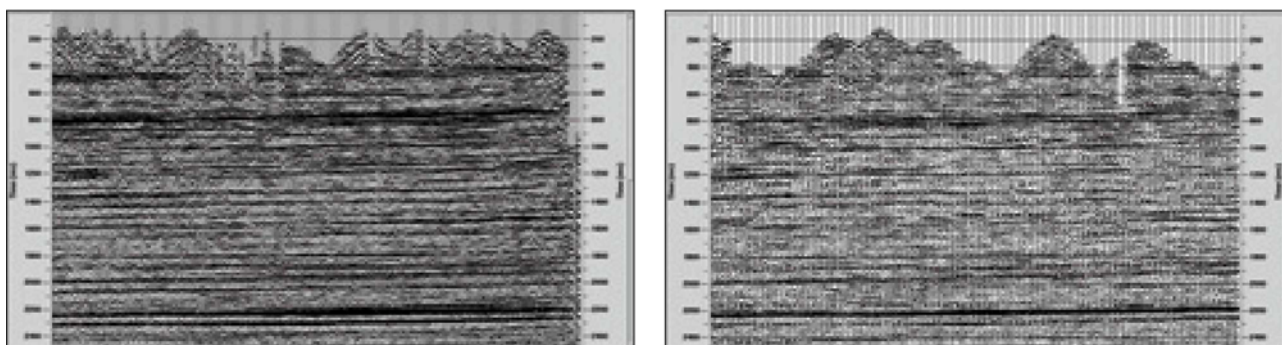


Рисунок 6 Суммарный разрез FireFly (слева) можно сравнить с суммарным разрезом, полученным для того же пункта традиционными сейсмическими методами (справа). Суммарный разрез FireFly характеризуется лучшим соотношением сигнал-шум, более широким частотным диапазоном, и существенно лучшей детальностью отражений.

К счастью, полноволновые методы предназначены для работы с загрязнением шумами от обменных волн. Высокоточные, 3С данные предоставляют достаточно информации обработчикам для того, чтобы они могли выделить формы сигнала на записях. Путем выделения энергии обменных волн, возможно устранить эту энергию из данных однократных продольных р-волн. При успешном применении, этот метод сделает данные по р-волнам на дальних удалениях более полезными на стадии интерпретации, что способствует проведению анализа анизотропии и AVO анализа. Вдобавок, этот метод может расширить полосу частот записи, увеличивая разрешающую способность изображения целевого горизонта. Если интерпретаторам удастся лучше выявить разломы и идентифицировать «лакомые куски», которые в настоящее время лежат за пределами разрешения сейсмической записи, BP сможет наращивать успех при бурении и улучшить экономические показатели разведки в этой области.

Другой важнейшей целью полевых испытаний FireFly было доказательство того, что съемка с большим числом станций может быть возможной без увеличения риска для здоровья, безопасности и окружающей среды (HSE) при выполнении программы регистрации данных. Заботам о HSE всегда уделяют большое внимание при съемках с большим числом станций из-за увеличения числа оборудования, вертолетов, динамита и полевого персонала.

Модель работы с FireFly была разработана для сокращения требований, предъявляемых к полевым партиям при съемках с высоким числом станций. Проект Wamsutter, заверченный в январе 2007, доказал, что сейсмические данные высокой плотности можно получить при сокращенном числе партий. Путем использования «беспикетного» подхода к съемке, была устранена необходимость посещать вновь и вновь точки съемки партиями для поддержания свежести маркировки съемки (рисунок 5). Кроме того, отсутствие кабелей означало, что требуется меньшее число персонала для выявления неисправностей, техобслуживания и починки кабеля.

Объединение беспикетного принципа съемки и беспроводных систем означает, что меньшее число часов работы партии требуется для получения данных высокой плотности с FireFly, чем для получения меньшего количества хорошо дискретизированных данных с использованием традиционных партий, работающих с косами. Это дает гораздо более низкий риск HSE.

Первичная цель проекта Wamsutter заключалась в получении лучшего изображения и помощи геофизикам BP в построении более надежной и точной модели строения разреза. Задачей этого проекта было как можно ближе © 2007 EAGE

подойти к полной дискретизации, учитывая практичность. Набор полностью дискретизированных данных крайне полезен при планировании анализа данных и, в конечном итоге, интерпретации изображения. Методы обработки, такие как «offset vector tiling» (OVT), которые не практикуются при работе с традиционными данными, дают возможность рассматривать данные в новых областях. OVT кажется очень обещающей процедурой для применения методики подавления дискретного шума, он также способствует применению различных методов миграции до суммирования, для которых крайне важно получать сейсмические изображения превосходного качества.

В результате выполнения проекта Wamsutter был получен превосходный набор данных, который отличается высоким качеством и применимостью по сравнению с данными, полученными традиционными методиками. Данные Wamsutter FireFly имеют лучшую дискретизацию в нескольких отношениях – улучшена пространственная дискретизация, дискретизация по удалениям и азимутам более подробная, а данные являются полноволновыми сейсмограммами 3С с оптимизированной точкой возбуждения. Несмотря на то, что результаты обработки еще не готовы, предварительные результаты суммирования говорят о значительных улучшениях (Рисунок 6).

## Северная Африка

Пустынные участки на Ближнем Востоке и в Северной Африке в настоящее время являются одними из наиболее активных областей мира, где проводится сейсмическая разведка. Огромные пространства земли еще остаются неизученными с использованием современных методов. Засушливые, изменчивые поверхностные условия региона часто является коренной причиной проблем построения изображений, таких как генерируемый источником рассеянный шум и сложные вопросы статистики. Традиционный подход в таком регионе заключался в развертывании больших расстановок сейсмоприемников. С тех пор как была предложена концепция полноволновой регистрации с одним датчиком, было много вопросов о том, не пострадает ли качество данных без использования кос.

В 2006, было проведено две полноволновых съемки на областях, там, где ранее для подавления шума использовались длинные традиционные расстановки аналоговых сейсмоприемников. Результаты этих двух съемок показали, что многие

## Многодисциплинарный выпуск

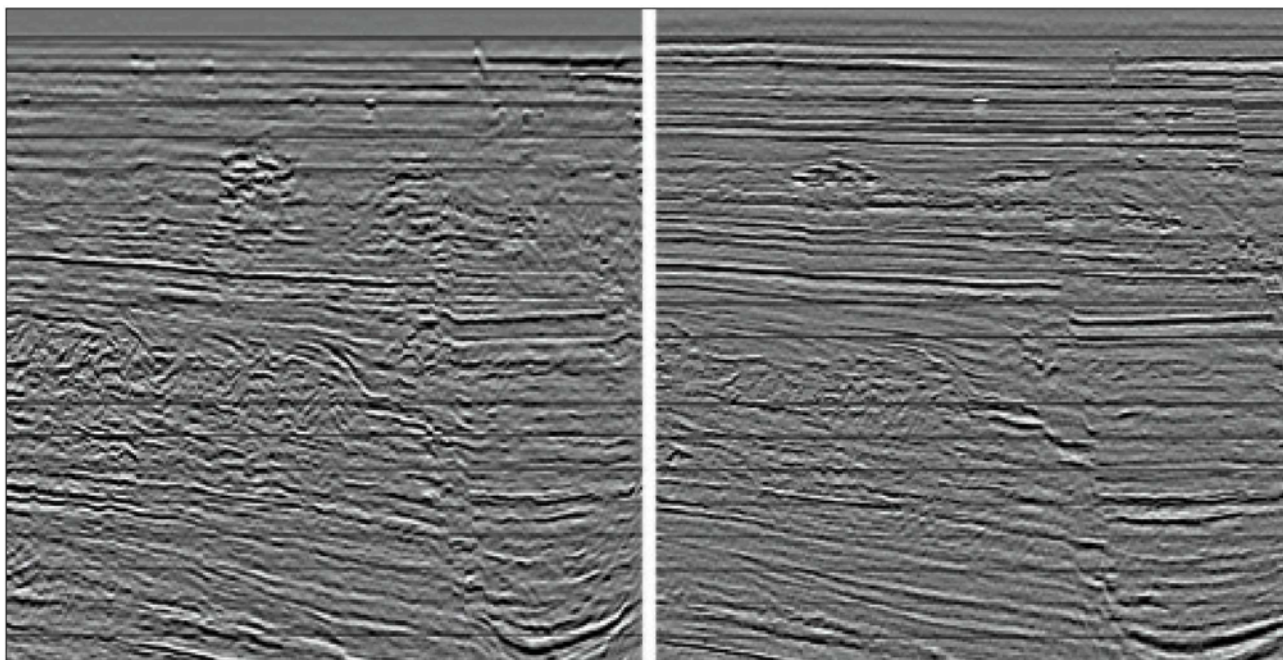


Рисунок 8 Миграция на левой панели получена по данным с традиционной косой. Миграция справа - данные VectorSeis Ocean на том же участке профиля. Явное улучшение качества данных и частотного состава прежде всего объясняется способом регистрации данных с датчиками, установленными на дно.

беспокойства, касающиеся записи с одним датчиком, были необоснованны. Данные, полученные в этих двух проектах, оказались такими же хорошими, или даже лучшими чем данные, записанные с помощью расстановок сейсмоприемников (Рисунок 7).

Пустынные области также известны как области, в которых наибольшая эффективность наземных партий достигается на регулярной основе;

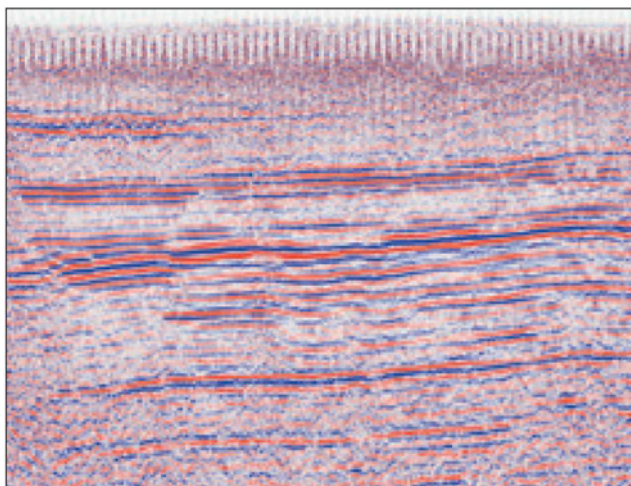


Рисунок 7 Пример полноволновых данных, записанных с точечными датчиками в пустынных областях, там, где единственным способом получить приемлемые данные считались длинные косы (предварительный разрез). Результаты сравнимы с данными, получаемыми традиционными сейсмоприемниками на той же области. Данные получены с интервалом между датчиками равным 25 м, который равен половине обычного интервала 50 м.

и не так редко приходится партии вибросейс на территории открытой пустыни отстреливать свыше 1500 пунктов возбуждения в день. Одним из главных преимуществ использования точечных датчиков при подобных работах является то, что при развертывании одного датчика требуется гораздо меньше усилий, чем при развертывании 24 или 36 сейсмоприемников на каждой станции. Эффективность партии, достигаемая при использовании точечных датчиков, может использоваться для более плотной дискретизации или для сокращения усилий партии. В любом случае, полноволновой подход приносит выгоду как подрядчику, так и клиенту нефтяной компании. Если доказать, что при использовании полноволновых методов и в частности, при использовании точечных датчиков ЗС, не жертвуют качеством данных, этот район может готовиться к обновлению методов сейсмической съемки, используемых традиционно.

### Построение изображений с морского дна (ОВС) в Мексиканском заливе

Одним из лучших примеров успешности применения полноволнового подхода стало применение донных океанических кабелей (ОВС). В ранее используемых методиках ОВС часто развертывался подвешенный на кардане сейсмоприемный датчик ЗС, комбинированный с чувствительным к давлению гидрофоном. Геофоны на карданном подвесе были сконструированы с целью достижения самоориентации на основе гравитации, тогда как коса тянулась далее по дну. Инженерная конструкция такого типа датчиков оказалась очень сложной и изоляция трех компонент была очень слабая, что вело к тому, что сейсмические данные отличались плохой точностью. Эти принципиальные ограничения сдерживали применение этого метода в течение десятилетия или более, даже когда большая часть



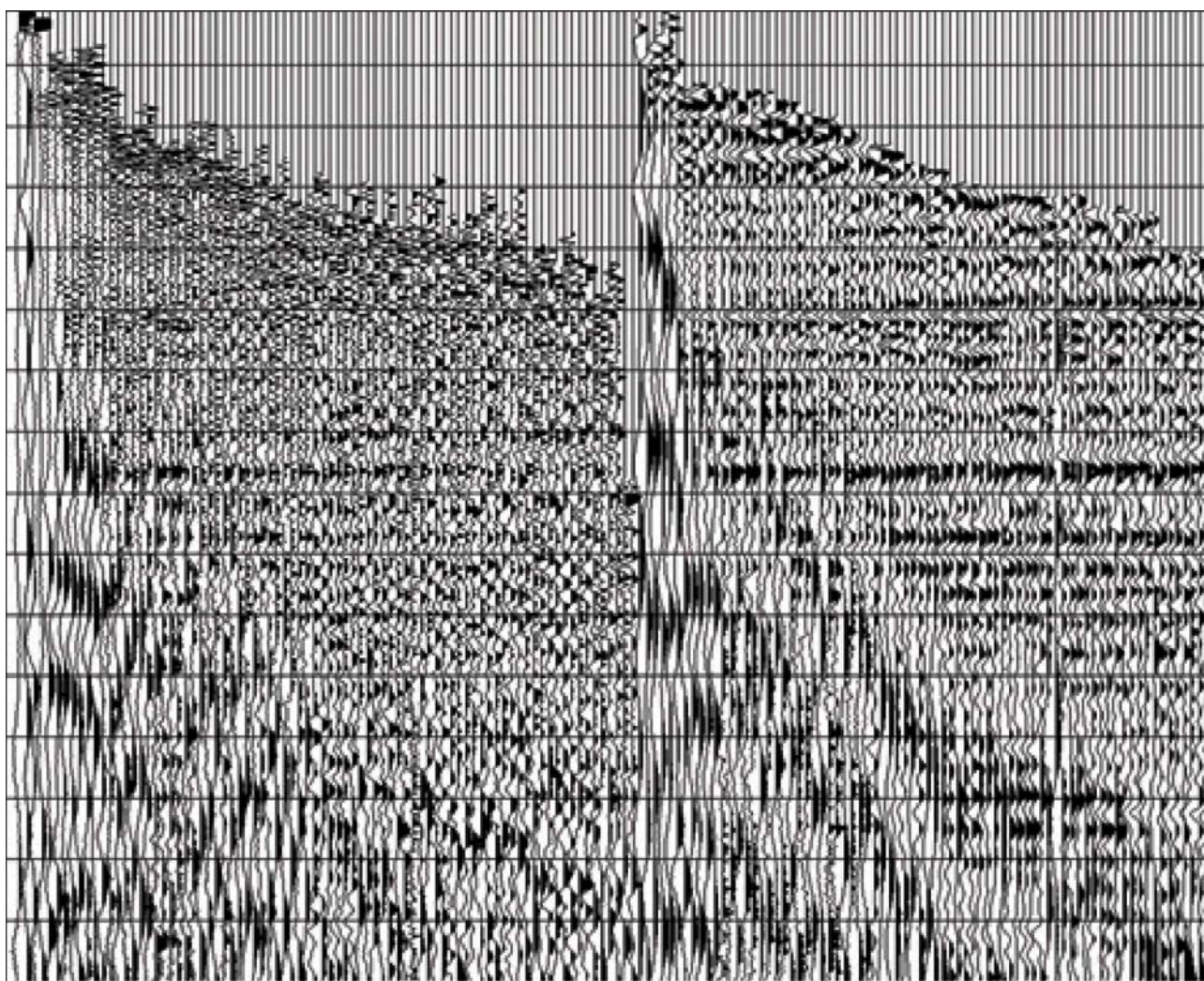


Рисунок 9 Две сейсмограммы ОПП для одного и того же положения источника и X-Y, но с 10 м дополнительного погружения источника в зону малых скоростей (правая панель). Отмечается явные различия в качестве и типах отраженных волн. К обеим сейсмограммам была применена обработка в виде АРУ (250 мс) и ввода кинематических поправок.

Перспективных участков земного шара казались идеальным местом для работы этого метода. Появление цифровых датчиков 3С полностью изменило положение.

I/O разработала и применила в партнерстве со специалистом по многокомпонентной регистрации, норвежской компанией RXT, перегруппируемую донную систему сбора данных, известную как Vector-Seis Ocean (VSO). Кабель VSO соединяет трехкомпонентные датчики, основанные на принципе акселерометров и гидрофон, обычно с интервалом 25 или 50 м. Одним из преимуществ использования акселерометров 3С является способность улавливать вектор силы тяжести для любого из углов выпуска с равной чувствительностью. Используя вектор гравитации и некоторые простые математические соображения, можно с большой точностью настроить данные, полученные с вертикальной и горизонтальной компоненты каждого датчика; фактически, с гораздо большей точностью, чем для геофона на карданном подвесе. Эта характеристика, совместно с дизайном корпуса датчика, предназначенного для

улучшения крепления на морском дне и изоляции датчиков от шума кабеля, переосмыслили путь будущего развития регистрации с морского дна.

Разница в качестве данных удивительная по сравнению с данными с морской сейсмокозой. Данные, полученные с морского дна характеризуются более широким частотным диапазоном, как для низких, так и высоких частот спектра, что обеспечивает получение изображений с большим разрешением, чем те, которые получены с использованием косы (Рисунок 8). Метод донной регистрации позволяет строить практичные схемы профилей съемки, практически такие же, как используемые в настоящее время на суше. По мере улучшения донных технологий и методов работы, должны существенно возрасти длина и число развертываемых кабелей, что сделает схемы с длинными удалениями и широким азимутом все более практичными, дискретизацию – более плотной, а полномасштабное построение изображений в морской среде станет реальностью.

## Многодисциплинарный выпуск

### Развертывание внутри среды и 4D сейсморазведка в Западной Канаде

Большей частью, постоянные сейсмические наблюдения (4D) все проводились на океаническом дне. Именно на таких крупных месторождениях как месторождения Северного моря компании тестировали экономичность проектов постоянных сейсмонаблюдений. Почти все примеры до настоящего времени можно отнести к успешным. Сейсмомониторинг в наземной модификации, к сожалению, идет с отставанием. Однако, компании начали проводить эксперименты с методом 4D, который может изменить соотношение сил. Интересно то, что многие подходы наземной сейсмики 4D хорошо подходят для использования полноволнового метода.

Rodney Calvert из Shell (SEG DISC Course) продемонстрировал, что возможность улавливать тонкие аномалии 4D в коллекторах напрямую связана с нашей способностью как можно более точно воспроизводить геометрию съемки. Чем лучше повторяемость геометрии, тем более тонкие вариации в коллекторе могут улавливаться. Существенным вопросом, который стоит при работах на суше, является сезонность изменения погоды в верхней части разреза. Плотность может существенно меняться от сезона к сезону или даже от года к году.

Эксперимент, проведенный в Канаде, в котором участвовала I/O, показал, что полноволновые датчики практически идеальны для развертывания в верхней части разреза (от 10 до 90 м), в том случае, когда датчики устанавливаются в верхней части ниже того участка, где имеют место сильнейшие изменения плотности. Преимущества два. Во-первых, возможно использовать постоянные датчики, положение которых будет точно повторяться год от года, и поскольку он погружен, он не будет подвергаться всем погодным сезонным колебаниям. Во-вторых, датчик устанавливается в спокойной обстановке, что может оказать существенное влияние на соотношение сигнал-шум регистрируемых данных.

Данные, записанные одновременно полноволновым датчиком на поверхности и сравнимым с ним датчиком на 10 м ниже поверхности, имеют огромные отличия (Рисунок 9).

Это ситуация, хорошо удовлетворяющая требованиям полноволновой технологии. Высокоточные, самоориентируемые, само-калибруемые полноволновые датчики обеспечивают хорошую повторяемость результатов год за годом. При дополнительных преимуществах соотношения сигнал-шум и возможности анализа данных обменных волн или даже с самого начала волн S-S, полноволновой метод имеет огромный потенциал для наземного применения при мониторинге.

### Заключение

Понятие полноволнового построения изображений включает много аспектов теории работ, дизайна оборудования, анализа и интерпретации данных. Использование этих концепций совместно или по-отдельности может помочь сфокусировать наше внимание на решении практических задач, стоящих перед современными компаниями E&P и подрядчиками. Примеры, приведенные в данной статье, затрагивают множество вопросов - все они получены из недавнего опыта и все, относятся к концепции получения лучших сейсмических данных посредством лучшего измерения сейсмического сигнала. Гибкое оборудование сейсмической регистрации способствует и бросает вызов ученому-разведчику в поиске новых взглядов на существующие сейсмические проекты, в его основе лежит фундаментальное утверждение о том, что методы получения данных не должны быть ограничителем потенциально извлекаемой информации.

### Благодарность

Автор хотел бы выразить признательность Apache, BGP, BP, Geofizika dd Zagreb, Geokinetics, RXT, и Sinopec, наряду с прочими компаниями, чья постоянная поддержка сделала возможным этот прогресс в геофизике. Также благодарю самоотверженную команду профессионалов и менеджеров из Input/Output за их желание разведывать неизведанные территории и разработку систем и методов обработки, освещенные в данной статье.