

# Подход Глобального Выноса в сейсморазведке: преимущества и ограничения (The Global Offset seismic approach: advantages and limitations)

Paolo Dell'Aversana (E-mail: [paolo.dell'avversana@agip.it](mailto:paolo.dell'avversana@agip.it), Eni E&P, Via Emilia 1, 20097

S. Donato Milanese, Milan, Italy)

## Введение

Получение и обработка сейсмических данных в районах с надвиговыми поясами являются перспективными задачами для геофизики. Неровная топография, сложность геологического строения и сильный контраст скоростей повышают сложность высококачественной регистрации сейсмических данных и понижают вероятность получения удовлетворительного сейсмического разреза. В этих обстоятельствах, применение глубинной миграции до суммирования (ГМДС) может помочь улучшить качество сейсмического разреза.

Однако успех ГМДС зависит от используемого диапазона выносов и от точности подобранной модели фоновых скоростей (Jin и Madariaga, 1994). В случае преобладания значительных вариаций скорости по латерали (Lynn и Claerbout, 1982), получение точной скоростной модели с помощью стандартного скоростного анализа может не увенчаться успехом. В этих случаях довольно полезно применить точные томографические методики, особенно к избыточным массивам данных, полученных при расширенном диапазоне выносов.

С этой точки зрения, преимущества и трудности регистрации данных на выносах превышающих 15-20 км хорошо известны в сейсморазведке методом преломленных волн в задачах изучения средних глубин Земной коры. Закритические отражения и лучи рефрагированных волн на дальних выносах в общем содержат много информации об упругих свойствах исследуемой среды. С другой стороны, риск приобретения артефактов при суммировании и миграции отражений с большими углами отражения может быть высоким, особенно в случае сложных геологических условий.

Типичные артефакты могут образоваться из-за боковых осей синфазности, появляющихся на итоговом мигрированном разрезе, или из-за отраженных волн, мигрированных в неправильном месте вследствие неправильного определения скоростного поля. Другие артефакты могут образоваться, когда отражения на больших углах должным образом не отличаются и не отделяются от преломленных волн. Как уменьшить эти риски, не отказываясь от выгод, предлагаемых данными, полученными на больших выносах - все еще нерешенный вопрос. В течение прошлого десятилетия было проведено много экспериментов с использованием подхода Глобального Выноса (Viña и др., 2002; Коломбо и др., 2004a; Коломбо и др., 2004b; Коломбо и др., 2003; Dell'Aversana, 2003), с целью проверки вклада этой методики в усовершенствование определения скоростного поля и построения сейсмического разреза.

Методика измерений по методу Глобального Выноса разработана для гарантии сохранения шагов источника и приемника, типичных для стандартной сейсморазведки МОВ с короткой расстановкой, но для расширенного диапазона выносов. Эксперименты с выносами, большими чем 30 км и расстояниями источник-приемник, сопоставимыми с теми, что

используются в промышленной сейсморазведке МОВ были выполнены за последние несколько лет (Dell'Aversana и др., 2001). В этом смысле Глобальный Вынос заполняет нишу между коммерческой сейсморазведкой МОВ (обычно используемой для поисково-разведочных работ в нефтяной промышленности), и сейсморазведкой МПВ на больших выносах (часто применяемой при академических исследованиях, нацеленной главным образом на исследования глубинного строения земной коры).

Докритические и закритические отражения и лучи рефрагированных волн на дальних выносах включаются в набор данных Глобального Выноса. Преимущество состоит в том, что отражения с большими углами могут демонстрировать высокое отношение сигнал-шум даже в тех случаях, когда сложно построенная толща покрывающих пород может помешать сделать запись данных с высоким качеством на коротких расстановках. Кроме того, при использовании больших выносов существует вероятность подстрела (сейсмические исследования с расположением пунктов возбуждения и приема с разных сторон от объекта) высокоскоростных неглубоких слоев, которые могут способствовать образованию экранирующего эффекта при распространении волнового поля (Dell'Aversana и др. 2003).

Вообще, глобальное применение томографии на отраженных и проходящих волнах - первый шаг, нацеленный на получение надежной скоростной модели (Dell'Aversana и др., 2003; Improta и др., 2000a, 2000b; Operto и др., 2004; Ravaut и др., 2004;). Она может с успехом использоваться для повышения качества глубинной миграции до суммирования (Dell'Aversana и другие, 2002). В этой статье мы показываем, на реальных примерах, как, рассмотрение данных с высокой кратностью, полученных на больших выносах может действительно улучшить сейсмический разрез и усовершенствовать процесс интерпретации. В то же самое время мы обсуждаем подводные камни, которые могут возникнуть при неаккуратном использовании данных, полученных на больших выносах, без необходимых ограничений. И наконец, мы объясняем, как эти проблемы можно уменьшить или избежать с использованием ряда определенных критериев.

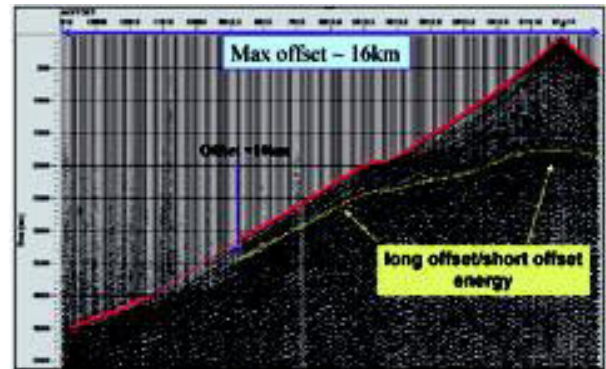
## Измерения по методу Глобального Выноса

Как предполагалось во введении, метод Глобального Выноса значительно отличается от обычного МОВ. Фактически, когда геофизики имеют дело с выносами, меньшими чем 4 или 5 км, они сосредотачивают внимание главным образом на той части волнового поля, которая распространяется почти вертикально от источников к приемникам, будучи отраженной от некоторой неоднородности по упругим свойствам на глубинах от нескольких сотен метров до нескольких километров. Главная часть измерений и обработки полученных данных

основана на вышеупомянутом предположении. Все попытки моделирования волнового поля перед съемкой, оптимизации параметров регистрации, регистрации и обработки данных предпринимаются для максимизации отношения сигнал-шум данной вертикально отраженной части волнового поля. Мало внимания уделяют отражениям с большими углами и лучам рефрагированных волн. Несмотря на это, главная цель в подходе Глобального Выноса состоит в том, чтобы максимизировать вклад той части волнового поля, которая распространяется на большие выносы. В то же самое время мы хотим сохранить все преимущества стандартной сейсморазведки МОВ, такие как высокая кратность наблюдений и высокая разрешающая способность. Это не есть вариант стандартной сейсморазведки МПВ на больших выносах, при которой регистрируют данные отраженных/проходящих волн на больших выносах, но жертвуют перекрытием и разрешающей способностью.

Фактически доступная технология позволяет проектировать (и производить) 2-D и/или 3-D съемки с большими выносами, которые гарантируют высокую кратность сейсмических наблюдений, так, чтобы каждое возбуждение могло быть одновременно зарегистрировано усовершенствованной расстановкой, которая включает в себя увеличенный диапазон выносов и азимутов. В этом смысле Глобальный (3-D) Вынос очень похож на подход 'Регистрации и обработки полного волнового поля' (Criss, C.J., и др., 2005). В 2-D случае расстановка метода Глобального Выноса активна по всей длине профиля, а пункты возбуждения перемещаются вдоль профиля, будучи зарегистрированными одновременно всеми сейсмоприемниками. Эта концепция проста только в теории. Фактически этот тип измерений может быть выполнен только при условии, что все локальные логистически-технические проблемы решены. Только подходящие полевые испытания (перед началом непосредственной съемки), проведенные совместно с адекватным технико-экономическим обоснованием (моделированием), может дать оптимальную измерительную расстановку. Существенное число экспериментальных результатов подтверждает, что расстановки метода Глобального Выноса в случае 2-D с длиной, превышающей 20-25 км, с расстоянием между приемниками 20-30 м, с расстоянием между пунктами возбуждения 50-100 м и с зарядами от 1 до 10 кг, могут успешно применяться на различных территориях, включая неровные ландшафты и населенные области с относительно маленьким увеличением затрат (5-15 %) и без увеличения времени проведения работ.

Пример сейсмограммы ОПВ, зарегистрированной недавно с типичной для метода Глобального Выноса расстановкой изображена на Рис. 1. Эта съемка была сделана в сложной области надвигового пояса, где коэффициент S/N обычных сейсмических разрезов вообще очень мал. Геология этого района характеризуется сложным перекрыванием комплексов глинистых известняков, флиша и карбоната, осложненного наличием офиолитов. Главные структуры развивались в типичной обстановке сжатия, с взбросами и складчатыми комплексами. Стратиграфическая последовательность представлена глубокозалегающими турбидитами (верхний Оligоцен - нижний Миоцен), более глубокая часть которых называется отложениями 'Marnoso-Arenacea' (нижний Миоцен) и покрывается глинистыми известняками (Langhian) и мелководными грубообломочными отложениями (Serravallian). Слой очень мелководных карбонатов замыкает эту последовательность. Геологическая/структурная обстановка отражается в геофизическом поле со сложным строением, с часто встречающимися скоростными инверсиями по глубине и резким контрастом скоростей в горизонтальном направлении. Все эти факторы приводят к низкому отношению сигнал-шум у полученного набора сейсмических



**Рис. 1. Полевые данные Глобального Выноса наземной съемки. Без всякой обработки видны оси синфазности на ближних и на дальних выносах. Четко видны отражения с большими углами, по крайней мере, до выноса 10 км (желтая пикировка). Эту ось синфазности можно проследить с нулевого выноса. Её негиперболическая форма очевидна. Кроме того, первые вступления прослеживаются вплоть до конца выборки сейсмоотрасс, на выносе почти 15 км (красная пикировка). В этом случае в качестве источника был использован динамит массой 5 кг на глубине приблизительно 25 м.**

данных, особенно по отношению к наклонным частям разреза, где уровень сложности достигает максимума. Полевые данные, без какой-либо обработки, показаны для демонстрации того, что сейсмограмма Глобального Выноса может содержать в себе отражения, как на малых выносах, так и на больших, а также первые вступления на дальних выносах.

Построение разреза по этому набору данных было выполнено как во временной области, так и в области глубин. Для получения сглаженного скоростного поля отложений на малых и средних глубинах была сделана лучевая томография по рефрагированным волнам. Статистические поправки, рассчитанные по томографии, были введены с использованием этого скоростного поля. После чего, обработка во временной области продолжилась: скоростной анализ, поправки NMO/DMO, суммирование и временная миграция. Обработка в области глубины была частично основана на поле скоростей, полученном на основе лучевой томографии по рефрагированным волнам. Это было чрезвычайно полезно при первой итерации скоростного анализа по глубине. Наконец, технологии сканирования скоростей суммирования были применены в области Общего Разреза (анализ остаточных глубин) к расширенному диапазону выносов (до 16 км). В следующих разделах мы будем кратко обсуждать главные преимущества после обработки этого набора данных Глобального Выноса в области глубины.

#### Томография по методу Глобального Выноса

После установки (и применения) соответствующих параметров и процедур измерения, вторым важным шагом рабочего потока по методу Глобального Выноса является полное использование первых вступлений. Эти данные, вообще говоря, заглушаются при обычной обработке, тогда как в нашем случае, как сказано в предыдущем параграфе, они представляют фундаментальный источник полезной информации. Фактически выгода регистрации высокочастотных данных в широком диапазоне выносов дает возможность получения томографической скоростной модели для глубоких частей разреза, по методу инверсии первых вступлений. Большая область прослеживания лучей рефрагированных волн гарантирована по всему

сейсмическому профилю, включая дальние выносы. Они являются фундаментальными, потому что глубина томографических моделей, полученных по методу инверсии первых вступлений пропорциональна максимально доступному выносу.

Подобные рассуждения могут быть сделаны и для трехмерного случая (Dell'Aversana и др., 2001). Скоростная модель, полученная этим способом, может одновременно использоваться и в задачах обработки (например, как альтернативное распределение скоростей в горизонтальном направлении для оптимизации статистических поправок), как руководство для интерпретации в смысле скорости (структуры), и в задачах глубинного преобразования/глубинной миграции. За последние 10 лет мы проверили много различных томографических подходов, совместно с некоторыми из основных научно-исследовательских институтов и университетов в Европе, и при сотрудничестве с основными специализированными сервисными компаниями.

Алгоритмы, основанные на методиках локальной минимизации невязки (типа метода сопряженных градиентов и алгоритмов LSQR), являются более эффективными в смысле времени вычисления, но вообще результат их работы сильно зависит от стартовой модели и от проблемы неоднозначности (Dell'Aversana и др., 2003). Мы также проверили подходы минимизации, основанные на методиках квазиглобального поиска в модельном пространстве, типа комбинации Симплексного спуска и методов Монте-Карло (Improtа и др., 2000a и b). Основное преимущество, предоставляемое этим подходом – это широкое исследование модельного пространства, что сильно уменьшает риск локальной сходимости. Итоговое решение нелинейной обратной задачи в основном не зависит от стартовой модели. Основным недостатком этого метода является очень большие временные затраты.

Конечно, информация о скорости содержится не только в первых вступлениях. Её также можно извлечь, вместе со структурными данными, из анализа полного волнового поля. Совместно UMR Geosciences Azur - CNRS, Observatoire Oceanologique de Villefranche-sur-Mer, мы проверили методику томографии с использованием полного волнового поля в частотной области (Operto и др., 2004; Ravaut и др., 2004). Частотная область предоставляет основу для разделения набора исходных данных на монохроматические подмножества данных. Каждое подмножество чувствительно к различным диапазонам волновых чисел. Эти подмножества данных инвертированы в поток с использованием многомасштабного подхода. Это означает, что высокие волновые числа прогрессивно включаются в скоростные модели. Рабочий поток идет от низко- к высокочастотным компонентам и смягчает нелинейность обратной задачи.

На Рис. 2а показан пример результатов инверсии этого типа, примененной к профилю, снятому по методу Глобального Выноса в Южных Апеннинах (Италия). Профиль имеет длину порядка 15 км. Расстояние между пунктами возбуждения – 60 м. Заряды динамита находились в пределах от 5 - 15 кг и были помещены в обсаженные скважины на глубину приблизительно 30 м. В этом случае (который представляет один из первых тестов методики Глобального Выноса, выполненных в Италии), были использованы две независимых измерительных расстановки. Первая расстановка состояла из симметричной расстановки, перемещающейся вдоль профиля, с шагом 60 м, с максимальным выносом 3.6 км и групп из 24 сейсмоприемников (10 Гц), расположенных через каждые 60 м. Вторая расстановка состояла из автономных станций, оборудованных сейсмоприемниками на 4.5 Гц, расположенными через каждые 90 м по профилю и постоянно активными по всей длине профиля, для каждого возбуждения

(для инверсии использовались только данные, зарегистрированные автономными станциями, результат инверсии показан в Рис. 2а). Геологическое строение района исследований представляло собой типичную надвиговую область, состоящую из последовательности карбонатных и сланцевых надвиговых отложений, флиша и отложений бассейна. Эта последовательность формирует очень сложную толщу, перекрывающую нижележащую Мезозойскую карбонатную платформу, которая представляет собой коллектор нефти. В этой области её глубина от уровня земной поверхности может превышать 6000 м.

На Рис. 2b показан результат структурной интерпретации скоростных моделей, показанных рис. 2а. Рисунок дает представление о сложности геологического строения этого разреза, и в, более общем виде, строение этой надвиговой области. Основная часть сейсмических данных, зарегистрированных от предыдущих съемок этой области, демонстрирует недостаточное отношение S/N. Серьезные проблемы, возникшие при построении сейсмического

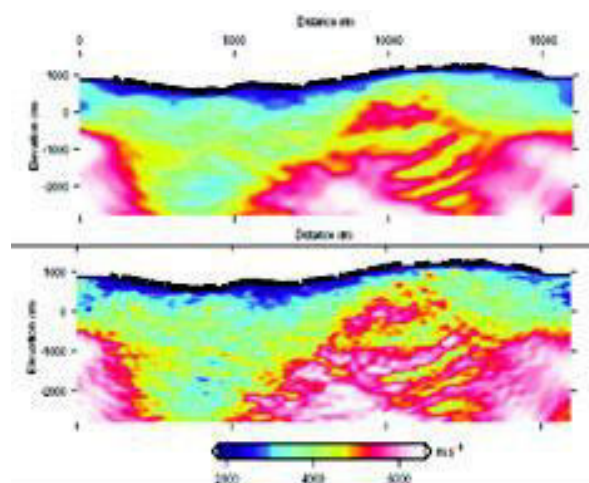


Рис. 2а. Скоростные модели, полученные в результате томографии на основе полного сейсмического сигнала для 5.38 Гц (верхняя панель) и 20.06 Гц (нижняя панель) частотных компонент соответственно [Согласно Ravaut и др., 2004].

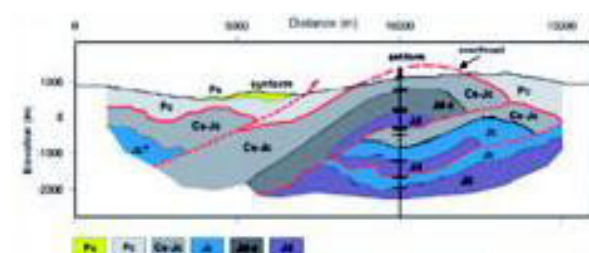


Рис. 2b. Схематическая структурная интерпретация скоростных моделей, показанных на Рис. 2а. [Согласно Ravaut и др., 2004]: Ps, Плиоценовые мягкие отложения; Pc, Палеоценовые глинистые отложения; Cs - Js, Меловые сланцы и юрские кремнистые сланцы; Jd-c, юрские кремнистые сланцы; Jd-с, сильно трещиноватые Триасовые кремнистые доломиты и кремнистые сланцы; Jd, твердые кремнистые доломиты. На рисунке обозначены основные плоскости надвига (пунктирные линии) и складка - надвиг Палеоценового покрова (сплошная линия). Геологические сосредоточенные неоднородности в локальном масштабе ограничены скважиной, пробуренной вдоль профиля.



разреза, оставались нерешенными даже в случае высокой кратности сейсмических наблюдений. Суммированные/мигрированные разрезы кажутся трудными для интерпретации, а проектная глубина до объекта часто остается неопределенной. В результате мы решили применять рабочий поток, существенно отличающийся от традиционно используемого.

Мы отпикировали все первые вступления вплоть до максимального выноса, и мы выполнили томографическую инверсию, используя несколько различных алгоритмов. Самая надежная и устойчивая среди моделей первых вступлений была получена при использовании методики оптимизации Симплекс-Монте-Карло, потому что результат работы этой методики зависит только от входных данных, и не требует никакого предположения о стартовой модели (Improta и др., 2000a).

Этот результат инверсии, полученный только на базе первых вступлений, использовался как стартовая модель для применения метода томографии полного волнового поля в частотной области. Передовой томографический подход в результате дал несколько моделей с различным уровнем детализации, относящимся к различным выбранным диапазонам частот (см. различные панели на Рис. 2a). Эти модели были полезны при интерпретации сейсмического разреза. Более того, они представляли собой основу для усовершенствования процесса обработки данных (статические поправки, скоростной анализ, миграции и так далее) и, наконец, для некоторой попытки улучшить сейсмический разрез (Ravaut и др., 2004; Operto и др., 2004).

Мы повторяем, что модели, показанные в Рис. 2a и b относятся к одному из первых экспериментальных исследований по методу Глобального Выноса. Оно было выполнено почти 10 лет назад, и тогда еще оставалось много ограничений при регистрации. Ограниченная доступность каналов 'старых' систем регистрации обязала нас использовать две независимых расстановки: одну для обычной сейсморазведки МОВ с короткой расстановкой (симметричная расстановка, перемещающаяся вдоль профиля) и одну для регистрации данных отраженных/преломленных волн на дальних выносах (состоящая из автономных станций, зафиксированных на земной поверхности). В результате интервал между пунктами приема неподвижной расстановки был все еще слишком большим и вероятно не идеально выдержанным для того, чтобы преодолеть проблемы алейсинга, связанные с регулярными помехами.

Даже если бы этот 'начальный' набор данных Глобального Выноса был полезен для того, чтобы получить томографическую модель глубоких частей разреза, он не был бы оптимальным для построения сейсмического разреза ГМДС. В последующие годы, когда инновационные многоканальные системы регистрации стали доступны, мы начали делать запись намного более плотных наборов данных Глобального Выноса, используя один единственный кабель, с интервалом между приемниками 25-30 м или меньше (см. следующие примеры). При тех технических новых обстоятельствах, подход Глобального Выноса был полезен не только для того, чтобы улучшить определение скоростного поля посредством томографии, но также и при построении сейсмического разреза по методу ГМДС или по другим методам.

Этот фундаментальная тема будет обсуждаться подробно в более поздних разделах статьи. Возвращаясь к томографическим моделям, вообще их надежность должна быть проверена не только через традиционные методики оценки моделей (Dell'Aversana и. ал., 2003; Improta и др., 2000a и b), но также с использованием критериев геофизической и геологической логичности и связанности. Этот ключевой пункт лучше разъяснен на Рис. 3, где часть

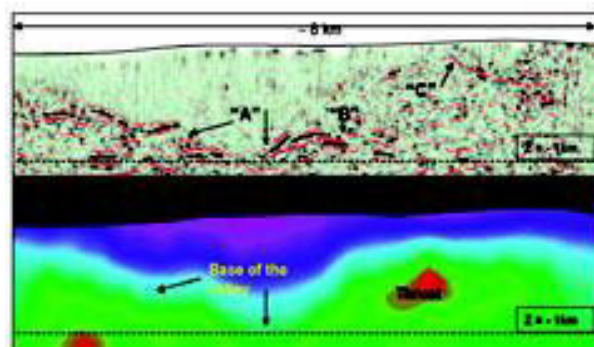


Рис. 3. Соответствие между осями синфазности A, B, и C в суммированном разрезе (после преобразования в глубину) и структурами, выделяемыми по скорости, на томографическом разрезе.

томографической модели (для другого профиля, но в той же самой надвиговой области), полученная с помощью инверсии данных первых вступлений Глобального Выноса сравнивается с соответствующей частью суммированного разреза. Скоростная модель основана на наборе данных (первые вступления, связанные с лучами рефрагированных волн), который не зависит от набора данных, использованного для построения разреза (однократные отражения). Если никакая априорная информация не включена в томографическую инверсию (в этом случае, мы начали с 1D модели с простым вертикальным градиентом скорости), то соответствие между этими двумя разрезами является показателем надежности.

На рис. 3 можно видеть общий уровень соответствия между основанием аллювиальной долины, характеризующейся низкоскоростными отложениями (от фиолетового до голубого:  $1000 < V < 3000$  м/с), и осями синфазности отраженных волн (отмеченных как A). Кроме того, возможно отметить соответствие между высокоскоростным телом (карбонат) в зелено-красных цветах ( $V = 4500-5500$  м/с) и отражениями B и C (соответственно, интерпретируемыми как его основание и его кровля, что подтверждено скважиной, пробуренной вдоль профиля). Наконец и сейсмические и томографические разрезы хорошо согласуются с геологической и структурной обстановками в области исследования (обнажения горных пород, ориентация надвига, скважинные данные и т.д.).

Мы полагаем, что возможность получения такой глубокой и устойчивой скоростной модели связана с расстановкой измерений по методу Глобального Выноса. Как было сказано ранее, этот подход является также подходящим для регистрации рефрагированных волн на дальних выносах, способствуя глубокому и избыточному обзору скоростных структур на значительных глубинах. Это одно из преимуществ, предлагаемых подходом Глобального Выноса по сравнению с использованием ограниченного диапазона выносов, доступного в любом традиционном наборе данных сейсморазведки МОВ. Другие преимущества данного подхода при построении сейсмического разреза будут более подробно описаны в последующих разделах, посвященных глубинной миграции.

Как было сказано выше, в специальном случае, который продемонстрирован в Рис. 3, мы использовали только одну фиксированную расстановку, которая состоит из групп 10 Гц геофонов с интервалом 30 м (12 10 Гц геофонов в каждой линейной группе). Общая длина активной части расстановки составила приблизительно 17 000 м, расстояние между пунктами возбуждения составило 60 м, а заряд

динамита изменялся от 1 кг до 10 кг и помещался на глубину 20-30 м. В этом случае все проблемы алейсинга, связанного с регулярными помехами, были решены. Шум от поверхностных волн был весьма просто устранен с помощью F-K фильтров и программ подавления линейного шума. Особое внимание должно было быть уделено статическим проблемам. Томографический скоростной разрез, полученный в результате инверсии первых вступлений (Рис. 3, низ), использовался как переменное скоростное поле для вычисления статических поправок.

Влияние на качество сейсмического разреза было различным в зависимости от диапазона выносов. Как ожидалось, построение разреза самой неглубокой части, особенно по отношению к долине, сильно улучшилось при использовании статических поправок, рассчитанных по томографии. Влияние на построение разреза самых глубоких отражающих горизонтов было менее очевидным, но одинаково важным.

#### Анализ данных и глубинная миграция в широком диапазоне выносов

Второе преимущество, предлагаемое подходом Глобального Выноса - возможность вовлечения в процесс временной/глубинной обработки высокоамплитудных отражений на дальних выносах с той же самой кратностью, что и в стандартной сейсморазведке на коротких базах (Zelt и др., 1998). Однако серьезные артефакты могут быть вызваны тем фактом, что отражения на больших углах могут быть спутаны с осями синфазности рефрагированных волн на дальних выносах. Попытка миграции и суммирования критических или закритических отражений может дать нежелательный эффект вовлечения как отраженной и неотраженной сейсмической энергии, так и осей синфазности

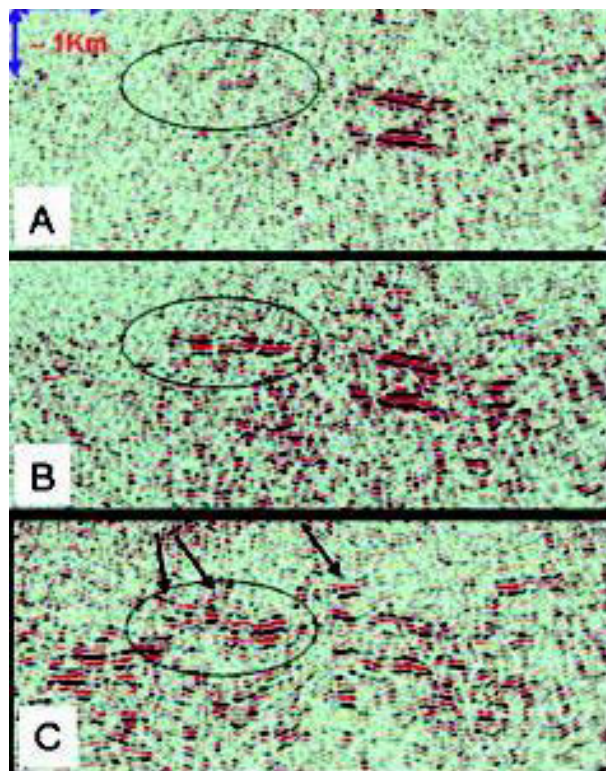


Рис. 5. Сравнение трех разрезов с различными параметрами:

- A) с использованием максимального выноса 3.6 км.
- B) с использованием максимального выноса 6.0 км.
- C) с использованием максимального выноса 12 км.

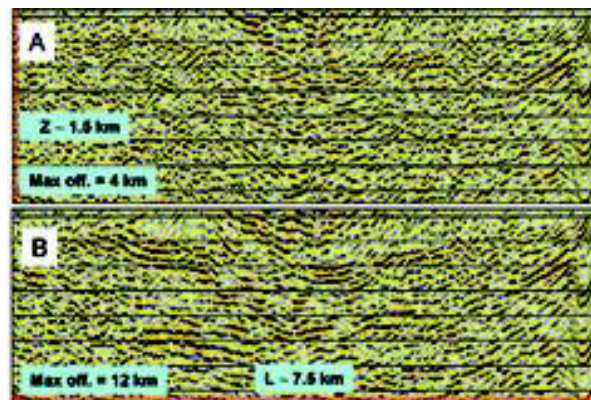


Рис. 4. Данные ГМДС и Глобального Выноса в сложной геологической обстановке (показана только часть разреза). Увеличение максимального выноса с 4 км (панель A) до 12 км (панель B) существенно повышает качество разреза. Любое дальнейшее увеличение выноса может привести к появлению артефактов в этой части разреза.

от боковых отражений в тот же самый процесс миграции. Кроме того, в данных, полученных на критических углах падения, могут обнаруживаться сдвиги фаз. Чтобы уменьшить эту проблему, при моделировании прямой задачи рекомендуется иметь надежное понимание максимального выноса, на котором не путаются оси синфазности отраженных и преломленных волн.

После понимания природы данных в области до суммирования, совместная инверсия данных, включая все первые вступления и времена пробега отраженных волн (как на ближних, так и на дальних выносах), может быть выполнена для создания предварительной модели скорости/границы. Следующий шаг будет представлять собой последовательность суммирования и миграции для того, чтобы увеличить диапазоны выносов. Начальная скоростная модель прогрессивно обновляется в процессе минимизации невязки, наблюдаемой на общих разрезах.

Первый фундаментальный критерий для исключения артефактов - проверка того, имеют ли улучшения при построении разреза (полученного после расширения диапазона выносов). Второй критерий - это то, что качество сейсмического разреза должно прогрессивно изменяться после расширения диапазона выносов, как показано в Рис. 4, панели A и B.

На этом рисунке мы можем видеть, как сигнал в эллипсе просто был 'усилен' при переходе от панели A к панели B, после добавления в набор данных с дальних выносов. Никакие 'волшебные' оси синфазности не появились после расширения диапазона выносов данных, используемых в процессе миграции. Однако если включение дополнительных выносов не улучшает, или не ухудшает качество разреза, мы можем предположить, что максимальный доступный диапазон полезных данных был достигнут. На панели C, например, появляются некоторые новые интересные оси синфазности (см. слева от эллипса), но кажется, появляются и некоторые артефакты (см. стрелки), и отношение S/N других осей синфазности понижается (см. справа от эллипса и в эллипсе непосредственно). В таких случаях как этот, природа этих 'новых сигналов' должна быть тщательно проверена путем пересмотра сейсмограмм ОПВ и проверки наличия соответствующей информации также в области до суммирования. Из этого примера можно сделать вывод, что интерпретация данных Глобального Выноса должна выполняться с использованием 'мультипанельных' разрезов,



где каждая панель представляет собой результат миграции для данного диапазона выносов.

Дополнительный интересный пример показан на Рис. 5. В этом случае проиллюстрирована часть разреза ГМДС (по набору данных, который был зарегистрирован в различных областях надвиговой области). Отношение S/N в этой области также было невысоким, и подход Глобального Выноса был проверен для увеличения разрешающей способности сейсмического разреза.

Общая длина профиля составила приблизительно 16 км, но здесь представлена только его часть: приблизительно 1.5 км в глубину (приблизительно на глубине целевого объекта) и почти 8 км в длину. Можно видеть существенное повышение качества разреза после увеличения максимального выноса от 4 км до 12 км.

Рассматривая сейсмограммы ОПВ (Рис. 1 служит примером таких сейсмограмм для этого профиля) мы можем видеть, что отражения с большими углами могут увеличить максимальный вынос до приблизительно 10-12 км. Остальные данные на выносах, больших чем этот, не только не дают существенных преимуществ при построении разреза, но и могут ввести артефакты в разрез. Этот случай – пример того, что процесс ГМДС и интерпретация данных Глобального Выноса должны быть выполнены при постоянном сравнении данных между областью до суммирования (сейсмограммы ОПВ и ОПП) и результатами после суммирования.

Наконец мы хотим показать другой важный пример артефакта. В этом случае он был вызван неправильным определением скоростной модели. На Рис. 6 показано, что эффект ложного поднятия по отражающему горизонту вызван наличием высокоскоростного неглубокозалегающего тела. К счастью для этого разреза набор данных Глобального Выноса был доступен, и томография первых вступлений ясно разрешила присутствие той скоростной аномалии в верхней части разреза. Только суммируя и мигрируя данные с подходящей томографической скоростной моделью можно исключить ошибки при интерпретации. Надо заметить, что путаница геологических структур и скоростных эффектов в надвиговых поясах возникает не редко, особенно когда скоростное поле не было правильно определено вследствие высокого уровня сложности строения этих областей. Теперь становится ясно, как, при этих обстоятельствах, Глобальный Вынос может представлять собой ценный инструмент для исключения бурения непродуктивных скважин на ложных структурах.

#### Некоторые ограничения и важность комплексирования

Ограничением метода Глобального Выноса является то, что сейсмическая томография особенно чувствительна к высокоскоростным слоям, а низкоскоростные отложения часто выделяются не достаточно хорошо. Оценка скорости этих слоев может быть неверной, или что ещё хуже, эти тела могут полностью игнорироваться томографической инверсией. Конечным эффектом может быть несоответствующая скоростная модель, которая соответствует данным, но далека от истинного распределения скоростей в разрезе. Очевидно, статические поправки и миграция будут работать неправильно из-за этого неточного результата.

В течение прошлых нескольких лет мы проводили различные эксперименты для выяснения того, как альтернативные геофизические методы могут внести вклад в решение этих проблем. Некоторые классы электромагнитных методов, типа магнитотеллурических методов (МТ), являются главным образом чувствительными к проводящим слоям, которые часто соответствуют низкоскоростным телам, типа глинистых или аллювиальных отложений. Это означает, что сейсмические и электромагнитные методы могут быть хорошо взаимно дополняемыми, по крайней мере, в значительном



Рис. 6. Пример артефакта, который образовался вследствие неглубокой скоростной аномалии.

числе случаев. Чтобы проверить эту гипотезу, мы выполнили много одновременных сейсмических и МТ съемок в течение последних десяти лет. Экспериментальная основа, состоящая из данных Глобального Выноса и МТ данных, полученных по одним и тем же профилям, фактически достаточна для того, чтобы подтвердить огромный потенциал комплексирования этих методологий (наземной и морской). Комплексирование таких данных может быть сделано посредством совместных инверсий: сначала один набор данных (например, данные Глобального Выноса) первым проходит инверсию, а затем, после соответствующей трансформации параметров на базе эмпирических зависимостей, её результат используется в качестве стартовой (или базовой) модели для инверсии второго набора данных (данных МТ). После чего, этот процесс последовательно повторяется, но в обратном порядке: полученная модель МТ преобразуется в скоростной разрез, который используется как улучшенная стартовая модель для новой томографической инверсии данных Глобального Выноса и так далее.

Недавние приложения этого подхода продемонстрировали, его эффективность в повышении достоверности определения поля скоростей и, наконец, при построении сейсмического разреза в сложных геологических условиях (Dell'Aversana, 2003). С другой стороны, инверсия обоих наборов данных (сейсмических и МТ) может быть выполнена одновременно (совместная инверсия). Этот подход намного сложнее, требует больше времени на выполнение, и все еще находится на стадии разработки, но он демонстрирует перспективные результаты по тестам на синтетических и реальных данных.

Итак, методология Глобального Выноса имеет существенный потенциал для комплексирования, включая методы гравиразведки. Совместная инверсия может быть сделана для получения моделей скорости/плотности, которые могут использоваться для миграции или непосредственно для интерпретации. Наши усилия сосредоточились на выполнении оптимизированного совместного процесса минимизации функции суммарной невязки, которая включает в себя остаточные эффекты на общих разрезах (в основе процесса ГМДС), остаточные эффекты, связанные томографией первых вступлений и, наконец, других остаточных эффектов, вычисленных в другой области геофизических данных (таких как электромагнитные свойства и/или сила тяжести). Поэтому знание связи между различными физическими параметрами, вовлеченными в процесс инверсии, может быть очень полезным.

#### 3D Глобальный Вынос

Почти все рассуждения, относящиеся к 2-D Глобальному Выносу, могут быть перенесены на 3-D случай. В случае проведения 3-D сейсморазведочной наземной съемки, планируются многие тысячи пунктов возбуждения. Увеличенная расстановка, в смысле и выноса и азимута, представляет собой естественное расширение идеи 2-D Глобального Выноса. Эта расстановка может использоваться как с многоканальными системами (с несколькими тысячами одновременно активных геофонов),

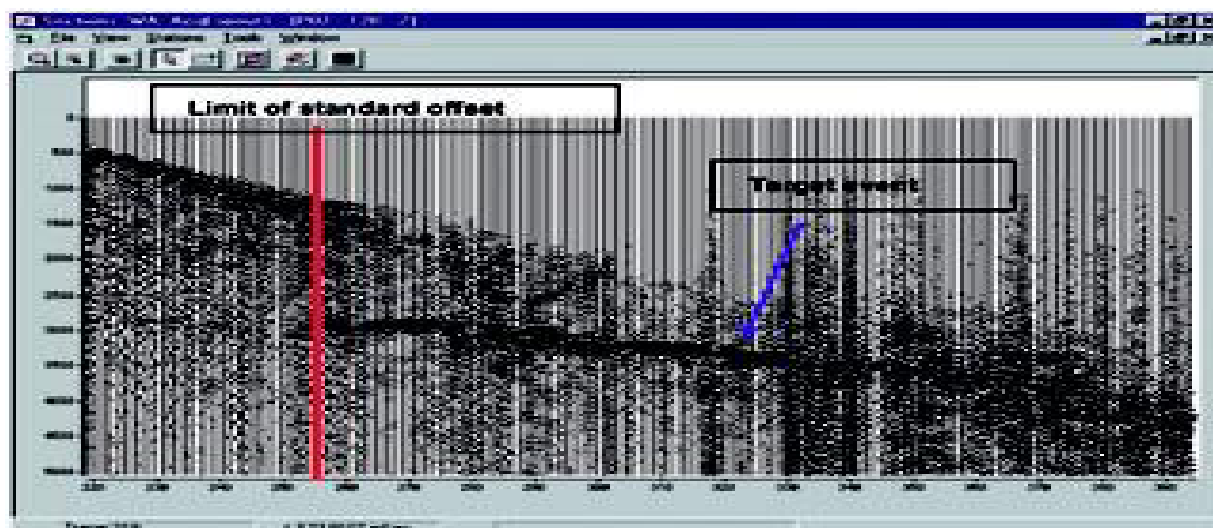


Рис. 7. Сейсмограмма ОПГ Глобального Выноса (для фиксированного азимута). Хотя никакая специфическая обработка не была применена к этому полевому примеру, сильное отражение с большим углом появляется на выносах, выходящих за пределы традиционно используемого диапазона (соответствующего приблизительно 3 км, в этом случае). Для этой трехмерной съемки использовался средний заряд динамита на 4-5 кг.

так и с автономными станциями, оснащенными 3-С геофонами, распределенными на большой площади, и которые ведут запись каждого возбуждения независимо. Подобный подход уже был проверен (и в настоящее время применяется) для 2-D и 3-D морских съемок с использованием донных многокомпонентных приемных модулей (Samson и др., 1995). Кроме того, как было сказано ранее, это понятие очень близко (или идентично) к подходу 'Регистрации и обработки полного волнового поля', хорошо описанному Criss C. J. и др. (2005). Недавно трехмерная наземная съемка по методу Глобального Выноса была сделана в надвиговой области в Италии. Высокие горы и неровная топография характеризуют основную часть этой области. Геологическое строение представлено сложными надвиговыми структурами, в которых Третичные/Мезозойские карбонаты и пачки аллохтонных обломочных пород покрывают автохтонную Мезозойскую карбонатную платформу. Инверсии скоростей встречаются на всех глубинах из-за присутствия сланца и глинистых пластов, чередуемых с надвиговыми отложениями известняков. Такая морфологическая и геологическая обстановка приводит к сильным многократным отражениям, явлениям рассеивания и кратным волнам, что уменьшает возможность сбора сейсмических данных высокого качества стандартными методами сейсморазведки на короткой базе.

Чтобы улучшить качество сейсмического разреза, в области, представляющей интерес были установлены 3-С автономные станции (оборудованные единичными геофонами). Они были установлены для регистрации возбуждений обычной трехмерной съемки, запланированной в той же самой области. Две независимых расстановки были одновременно активны: одна из них состояла из стандартных групп вертикальных сейсмоприемников, перемещающихся вдоль полосы площадной съемки (мы называем это 'стандартной расстановкой'), а другая состояла из почти 50 3-С автономных станций, зафиксированных на земной поверхности во время проведения измерений ('автономная расстановка'). Трехмерная автономная расстановка не мешала стандартным трехмерным измерениям, и никаких дополнительных затрат на сейсмические источники не было сделано. Дополнительные возбуждения, намеченные для трехмерной стандартной сейсморазведочной съемки, обеспечили высокую кратность

сейсмических наблюдений и для автономной расстановки. Каждая автономная станция независимо сделала запись нескольких тысяч возбуждений в широком диапазоне выносов и азимутов.

Четкий пример отражения на больших углах показан на Рис. 7. Очевидно, что амплитуда осей синфазности отраженных волн строго увеличивается для критических и закритических углов падения (на дальнем выносе). С другой стороны, в пределах обычных диапазонов выносов, отношение S/N очень мало: никакие когерентные и непрерывные оси синфазности не появляются и, как следствие, в области после суммирования качество разреза невелико, если используются только данные ближних выносов.

Интерпретация этих трехмерных данных Глобального Выноса потребовала бы другого подхода от любого стандартного потока обработки. Томографические методы по лучам рефрагированных волн, зарегистрированным в широком диапазоне выносов/азимутов, были применены для получения оценок скорости от дневной поверхности до глубины проникновения луча (по крайней мере, 4 км). Кроме того, томография на отраженных волнах, использующая отражения, зарегистрированные как на коротких, так и на длинных базах, применялась для получения детализированной глубинной структурной модели и интервальных скоростей.

#### Заключение и выводы

В данной статье был рассмотрен подход Глобального Выноса в сейсморазведке, с акцентом на его преимущества и внутренние ограничения, связанные с этой методологией. При использовании метода Глобального Выноса в течение последних лет, качество построения сейсмического разреза в нескольких трудных областях значительно возросло, что было продемонстрировано на многих проектах поисково-разведочных работ и разработки в сложных геологических условиях.

Самые важные результаты были получены в надвиговых областях, где глубинные структуры, не правильно идентифицированные традиционной сейсморазведкой, были детально восстановлены с использованием томографии

Глобального Выноса и ГМДС отражений, зарегистрированных на коротких базах. Однако риск приобретения артефактов и трехмерных эффектов на итоговых 2-D мигрированных разрезах все еще существует, особенно при использовании данных с выносом, большим, чем 9-10 км. Основные ограничения связаны с внутренней трудностью использования томографии для выявления низкоскоростных слоев. В таких случаях комплексирование с несейсмическими методами, типа МТ и гравirazведки, может быть фундаментально важным.

Другое важное ограничение данного метода — проблематичная миграция данных с дальних выносов, связанная с негиперболическим приращением времени. Моделирование прямой задачи и прогрессивное расширение диапазона выносов, используемых при суммировании/миграции, может ограничить риск приобретения артефактов. Мы заключаем, что, в тех сложных областях, где сейсмический отклик, как ожидается, будет иметь низкое качество, надо использовать метод Глобального Выноса в процессе создания предварительного технико-экономического обоснования. Параметры измерительной установки и параметры обработки должны быть установлены таким образом, чтобы включить данные дальних выносов в целый рабочий поток.

Подход Глобального Выноса может также сильно помочь в тех областях, где качество сейсмических данных уже приемлемо, но где имеются некоторые остаточные проблемы при построении разреза. Полученные томографические модели содержат в себе данные о проходящих и отраженных волнах и являются достаточно устойчивыми и надежными. Они могут внести свой вклад как в улучшение статических поправок, так в процессы глубинной и временной миграции.

И, наконец, рабочий поток Глобального Выноса разработан для комплексирования с другими несейсмическими методами путем выполнения совместной инверсии, представляя собой оптимальную основу для полностью комплексного геофизического подхода.

#### Благодарности

Автор хотел бы поблагодарить Eni E&P and British Gas International за разрешение на публикацию этой работы. Особая благодарность выражается к Daniele Colombo из Geosystem и Sergio Morandi из Shell за их содействие при разработке подхода Глобального Выноса.

#### Ссылки на литературу

Buia, M., Baldino, F., and Morandi, S. [2002] Thrust Belts Exploration - Limits of the Conventional Approach and Recent Innovation Efforts. The ESIT Project: Aims and Results, *EAGE Annual Meeting, Florence*, Extended Abstracts 64.

Colombo, D., Zucconi, V., Bruni, A., and Mantovani, M. [2004a] Seismic long offsets for imaging below complex overburden. *74<sup>th</sup> SEG Annual Meeting, Denver*.

Colombo, D., Carbonara, S., and Mantovani, M. [2004b] Wide offset depth processing of Canadian Foothills seismic data for improved structural images. *Canadian SEG*, paper S017. Colombo, D., Wilkes, M., Villani, L., and Mantovani, M. [2003] Feasibility study for long offset seismic acquisition in a thrust-belt. *73<sup>rd</sup> SEG Annual Meeting, Dallas*, ACQ II.

Criss, C. J., Kiger, C., Maxwell, P., and Musser, J. [2005] Full-wave seismic acquisition and processing: the onshore requirement. *First Break*, **23**, 53-61.

Dell'Aversana, P. [2003] Integration loop of 'global offset' seismic, continuous profiling magnetotelluric and gravity data. *First Break*, **21**, Nov, 32-41.

Dell'Aversana, P., Colombo, D., Morandi, S., and Buia, M. [2003] Transmission/reflection tomography of Global Offset seismic data in thrust belt exploration. *Geophysical Prospecting*, **51**, 1-13.

Dell'Aversana, P., Colombo, D., Morandi, S., and Buia, M. [2002] Esit: Time-Depth Processing Of Global Offset Data: A New Perspective For Seismic Imaging In Thrust Belt. *EAGE Annual Meeting, Florence*, Extended Abstract.

Dell'Aversana, P., Zucconi, V., and Colombo, D. [2001] Improvement in seismic acquisition by 3D Global Offset approach. *SEG Annual Meeting, San Antonio*, Extended Abstract.

Improta, L., Frattini, M., Zollo, A., Virieux, J., Herrero, A., and Dell'Aversana, P. [2000a] Non-linear inversion of global offset reflected arrivals in highly heterogeneous shallow crustal structure. *European Geophysical Society meeting, Nice, France*. Improta, L., Zollo, A., Virieux, J., Herrero, A., and Dell'Aversana, P. [2000b] Mapping Interfaces in an Overthrust Region by Non Linear Travel Time Inversion of Reflection Data. *American Geophysical Union, Fall Meeting*.

Jin, S. and Madariaga, R. [1994] Nonlinear velocity inversion by a two step Monte Carlo method. *Geophysics*, **59**, 577-590. Lynn, W.S. and Claerbout, J.F. [1982] Velocity estimation in laterally varying media. *Geophysics*, **47**, 884-897.

Operto, S., Ravaut, C., Improta, L., Virieux, J., Herrero, A., and Dell'Aversana, P. [2004] Quantitative imaging of complex structures from dense wide-aperture seismic data by multiscale traveltimes and waveform inversions: a case study. *Geophysical Prospecting*, **52**, 1-27.

Ravaut, C., Operto, S., Improta, L., Herrero, A., Virieux, J., and Dell'Aversana, P. [2004] Multiscale imaging of complex structures from multifold wide-aperture seismic data by frequency-domain full-waveform tomography: application to a thrust belt. *Geophys. J. Int.*, **159**, 1032-1056.

Samson, C., Barton, P.J., and Karwowski, J. [1995] Imaging beneath an opaque basaltic layer using densely sampled wide-angle OBS. *Geophysical Prospecting*, **43**, 4, 509-527.

Zelt, B.C., Talwani, M., and Zelt, C.A. [1998] Prestack depth migration of dense wide-angle seismic data. *Tectonophysics*, **286**, 193-208.