

## Геофизика окружающей среды и инженерная геофизика

**Время реорганизовать инженерно-геологические методы преломленных волн? Is it time to re-engineer geotechnical seismic refraction methods?**

В 2005 г. Derecke Palmer (Университет Нового Южного Уэльса, Сидней 2052, Австралия. E-mail: [d.palmer@unsw.edu.au](mailto:d.palmer@unsw.edu.au)) принимал участие в проведении программы выдающихся лекторов EAGE. Основная тема его краткого курса была посвящена необходимости модернизировать большую часть приповерхностных сейсмических работ, которые выполнялись для инженерно-геологических исследований. Здесь он предлагает свою собственную оценку того, что необходимо сделать.

За последние пять десятилетий приповерхностные методы преломленных волн не испытали существенного развития по сравнению с тем развитием, которое испытали многие другие геофизические методы. Очевидный качественный показатель развития это количество и восприимчивость к новшествам статей, опубликованных в журналах наук о земле. Методы преломленных волн по существу не представлены в большинстве журналов по той веской причине, что в течение многих десятилетий существуют считанные подлинные достижения.

Важным приложением методов поверхностных преломленных волн является инженерно геологическая характеристика площади исследования. Однако основная часть этих исследований недостаточно описывается 12-или 24-канальными системами возбуждения, и в результате, они используют неэффективный анализ источников информации. Небольшое число каналов заставляет использовать статические установки, которые обычно требуют почти вдвое больше пунктов возбуждения колебаний, столько же, сколько работы, общепринятые для методов отраженных волн, с движением по расстановке. Более того, данные, полученные со статическими установками, не способствуют эффективной или новаторской обработке. Сочетание операций, недостаточно описывающих среду исследования, с неэффективным сбором данных и обработкой обычно приводит к получению результатов с низкой разрешающей способностью. Таким образом, большая, основная часть работ методами приповерхностных преломленных волн фактически устарела и давно просрочена из-за большого объема технологического обновления!

При сравнении, за последние 50 лет методы отраженных волн имели впечатляющие результаты при постоянно успешном введении инноваций, преобразующих их. Эти инновации включают развитие эффективных полевых работ с методами CMP (общей глубинной точки) в 1960-е годы, эффективную обработку данных методами цифровой обработки всей трассы в 1970-е годы, 3D детальное геологическое моделирование в 1980-е годы, детальный параметрический анализ в 1990-е годы и более качественное исследование свойств пород 3D методами в 2000-е годы. Пришло время методам преломленных приповерхностных волн совершить аналогичный путь, тогда в значительной степени застойная наука будет модернизирована.

**Трехмерные методы преломленных волн  
Обычные двухмерные глубинные разрезы**

Рисунок 1 демонстрирует традиционный двумерный глубинный разрез, который был зарегистрирован через главную зону нарушений в круто падающих до вертикального падения силурийских метаосадках на Mt Bulga, близ г. Ориндж в юго-восточной Австралии.

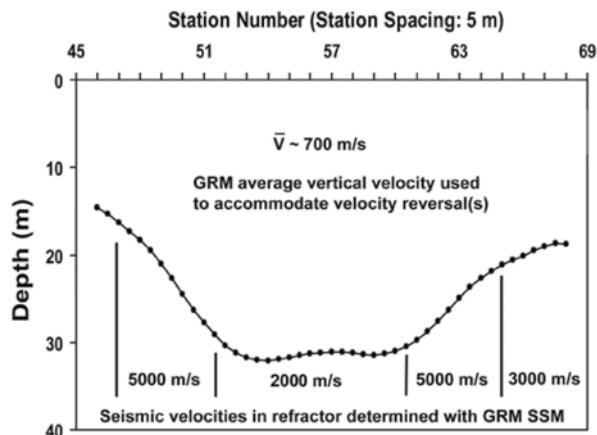


Рис.1 Глубинный разрез через основную зону нарушений, которая имеет приблизительно 50-метровую ширину (10 станций) между станциями 51-61.

Он представляет часть 3D съемки преломленными волнами при исследовании азимутальной анизотропии (Palmer, 2001a). Результаты представлены вдоль линии наблюдения 17, расположенной параллельно ранее проведенному 2D профилю, ориентированному ортогонально к предполагаемому простиранию зоны нарушений. Данные времен пробега были переобработаны методом статистического сглаживания по универсальному методу взаимного распределения (GRM SSM) (Palmer, 2006), который является развитием универсального метода взаимного распределения (GRM) (Palmer, 1980, 1981, 1986).

Зона нарушений представлена низкими сейсмическими скоростями в  $2000 \text{ м с}^{-1}$  и значительной глубиной выветривания. Дальнейшие незначительные улучшения разреза могут быть получены, если он будет использован в качестве стартовой модели для преломленной томографии. Тем не менее, для большей части приложений результаты, приведенные на рис. 1, могут быть достаточно эффективно рассмотрены.

**3D изображения зоны нарушения**

Рисунок 2 представляет ту же самую зону нарушений в плане, где представлены результаты по семи пересечениям. Очевидно, зона нарушений значительно более сложная в 3D представлении. Хотя съемка была ориентирована так, чтобы линии съемки были ортогональны известной зоне нарушений и преобладающему направлению простирания локальной геологической структуры, которая, как предполагается, имеет меридиональное простирание, результаты 3D показали, что истинное простирание близко к северо-западно – юго-восточному. Более того, присутствует несколько значительных структур с секущим

\* University of New South Wales, Sydney 2052, Australia. E-mail: [d.palmer@unsw.edu.au](mailto:d.palmer@unsw.edu.au).

## Геофизика окружающей среды и инженерная геофизика

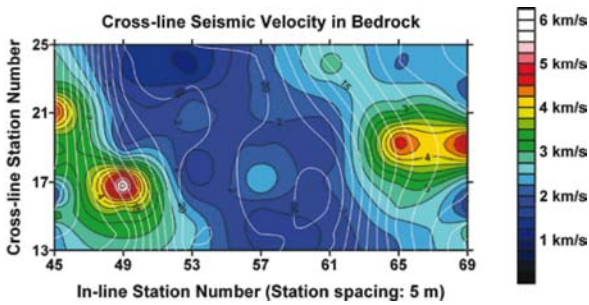


Рис. 2 Изображение в плане 3D съемки площади, показывающее глубины в метрах (белые контуры) и сейсмические скорости, рассчитанные для профилей 45, 49, 53, 57, 61, 65 и 69.

восток-северо-восточным простиранием, которые представлены латеральными изменениями сейсмических скоростей преломляющего горизонта. Эти восток-северо-восточные структуры, которые без труда определяются по единственному профилю с любой ориентацией, подчеркивают тот факт, что *все* геологические особенности, номинально установленные при 2D съемке, такие как на Mt Bulga или где-нибудь в другом месте, реально существуют в 3D.

Многочисленные нефтепоисковые работы и исследования обстоятельств добычи показывают, что двумерные методы часто порождают скорее неточные, чем неполные геологические модели (Nestvold, 1992). Существует общеизвестное наблюдение, что 3D результаты при сопоставлении с соответствующими 2D результатами могут показать циклический сдвиг в 45°, и даже до 90°, в направлении преобладающего простирания нарушения, а также изменение от нескольких нарушений с большими длинами по простиранию до многих нарушений с меньшими длинами по простиранию (Ruijtenberg et al., 1992, Рис. 2).

*Тезис 1 – 3D методы преломленных волн в этом десятилетии.* В каждом случае, когда внедрены высоко разрешающие геофизические 3D методы, результаты впечатляющие, и они серьезно и глубоко преобразуют эти отрасли. Разительные достижения в качестве результатов и быстрый рост количества требуемых данных привело к развитию в значительной степени более детальных геологических моделей, которые скорее являются результатом существенно более пространственного решения, чем любого улучшения точности определений глубины.

Исходно с введением любой новой технологии фокусирование может быть часто сосредоточено скорее на затратах, чем на результатах затрат. Хотя данные, полученные при использовании инновационных 3D методов преломленных волн, могут первоначально стоить больше, касательно их получения, обработки и интерпретации, возможная эффективность будет заключаться в значительном улучшении инженерно-геологической характеристики объекта исследования, существенном уменьшении степени неопределенности, что приведет к более эффективному техническому проектированию и строительству. Более того, затраты в целом сокращаются со временем, так как по мере осуществления новой технологии систематически вводятся новые показатели эффективности (Jarchow and Cura, 2000).

Если 3D методы являются одним из средств, которые генерируют новое развитие приповерхностных методов преломленных волн, тогда какие необходимы способы, чтобы 3D методы стали реальностью?

### GRM или томография преломленных волн?

*Порождающие стартовые модели для инверсии, основанной на использовании модели.* В последние годы томография преломленных волн (Lanz et al., 1998; Zhang and Toksoz, 1998), известная также как томографическая инверсия, широко применяется многими практикующими специалистами методов приповерхностных преломленных волн. Томография преломленных волн является лишь одним примером инверсии, основанной на использовании модели, в которой исходная стартовая модель систематически улучшается посредством итерационного сопоставления смоделированного отклика с полевыми данными. Томография преломленных волн предлагает много преимуществ, таких как скорость обработки, потребность в минимальной технической квалификации и привлекательные методы представления результатов. Тем не менее, давнишние методы, такие как GRM, могут занимать большой объем при создании стартовой модели для томографии преломленных волн.

В настоящее время общепризнано, что неоднозначность является существенной реальностью при инверсии фактически всех наборов геофизических данных (Oldenburg, 1984; Treitel and Lines, 1988). Обычно выбор стартовой модели определяет, которое из многих возможных неоднозначных решений будет результатом процесса инверсии. К сожалению, может быть существенное нерасположение к методу, связанное с проблемой неоднозначности при инверсии данных преломленных волн, из-за причастности к спору (тяжба) относительно инженерно-геологических областей применения.

Алгоритм 1D tau-p (Barton and Barker, 2003), который является оператором, устанавливаемым по умолчанию фактически во всех программах преломленной томографии, подчеркивает разрешающую способность по вертикали множества слоев. Напротив, алгоритмы инверсии 2D GRM подчеркивают пространственную разрешающую способность отдельных контактных поверхностей. Однако, сомнительно, может ли успешно алгоритм инверсии 1D tau-p разрешить 2D преломляющие границы с обширными латеральными изменениями сейсмических скоростей на каждой.

*Инверсия 2D полевых данных Mt Bulga.* Рисунок 3 демонстрирует томограмму преломленных волн, созданную волновой эйкональной томографией времен пробега (WET) (Schuster and Quintus-Bosz, 1993) по 2D профилю, зарегистрированному на Mt Bulga (Palmer, 2001b,c, 2003). Для создания стартовой модели используется алгоритм 1D tau-p. 2D профиль практически совпадает с линией наблюдения 19 на рисунке 2, хотя номера станций приблизительно связаны со станциями секущей линии. Томограмма показывает, что сейсмические скорости в нижних слоях превышают 4000 м с<sup>-1</sup> для всего профиля, и что не существует областей с сейсмическими скоростями, которые бы указывали на зоны нарушений. Область между станциями 40-50 интерпретируется как локальное возрастание глубины выветривания, а не как зона нарушения, так как сейсмическая скорость в нижней части томограммы все еще 4000 м с<sup>-1</sup> или выше.

Рисунок 4 представляет другую томограмму, созданную теми же данными времен пробега и улучшенную по тому же программному комплексу.

## Геофизика окружающей среды и инженерная геофизика

волновой томографии WET. Однако в этом случае стартовая модель создается по алгоритмам 2D GRM (Palmer, 2003).

На этой томограмме могут быть распознаны две области на преломляющей границе с низкими сейсмическими скоростями между станциями 53-61 и 68-73. Эти сейсмические скорости, которые менее  $2500 \text{ м с}^{-1}$  и на 40% ниже самой низкой сейсмической скорости на преломляющей границе, показанной на рис. 3, дают важное доказательство существования одной или более зон нарушения. Более того, 3D скорости секущего профиля, показанные на рис. 2, подтверждают существование основной зоны нарушения между станциями 53-61. Напротив, томограмма 1D tau-p показывает обратную картину между станциями 53-61, с увеличением сейсмических скоростей в самом глубоком слое одновременно с уменьшением глубины до него.

*Амплитуды головных волн – другие 50% данных.* Амплитудные всплески составляют другую половину объема сейсмических данных (первая половина – времена пробега), которая может быть использована в самых стандартных операциях с приповерхностными преломленными волнами. Фактически, 1D и 2D анализ амплитудных всплесков может обычно обеспечить дополнительную полезную информацию, которая поможет разрешить многие неопределенности и в общих (1D) и детальных (2D) моделях сейсмических скоростей.

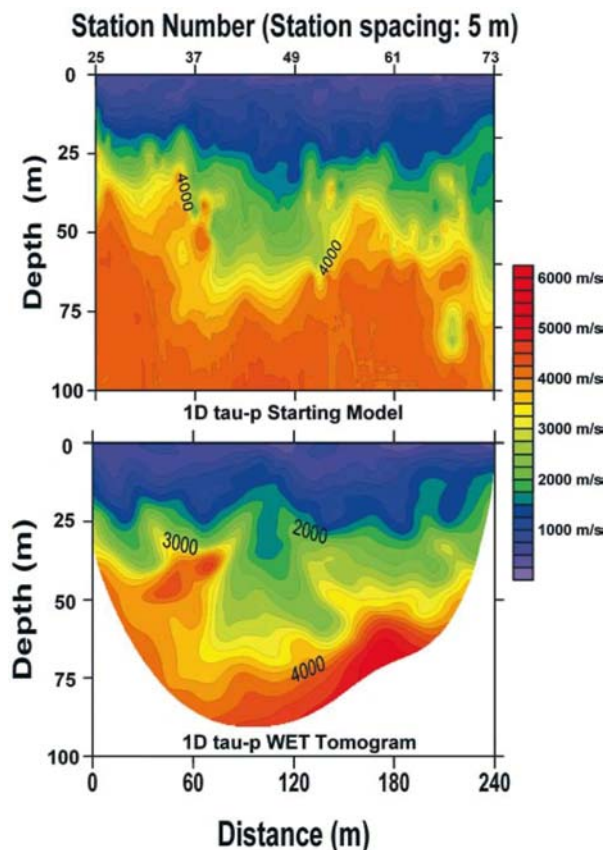


Рис. 3 Томограмма преломленных волн, полученная по WET томографии, использующей алгоритм tau-p для создания стартовой модели, по 2D профилю, зарегистрированному через главную зону нарушений на Mt Bulga.

1D анализ региональных амплитудных всплесков часто может указывать на то, постоянны ли сейсмические скорости, существует ли вертикальный градиент скоростей, или даже инверсии скоростей. Там, где имеют место относительно постоянные скорости, амплитуды головной волны уменьшаются с расстоянием между источником и датчиком. Однако там, где имеет место вертикальный градиент скоростей, амплитуды головной волны возрастают с расстоянием между источником и датчиком (Cerveny and Ravindra, 1971, p. 242). Такие модели преломляющей границы, в которых имеют место непрерывная преломляющая граница и рефрагированные волны, широко используются в томографии преломленных волн. Более того, общее резкое уменьшение амплитуд, которое обычно распознается как последовательные скачки или «кулисообразная структура» на сейсмограммах ОПВ, является показателями инверсии скоростей.

Амплитуды головной волны для пунктов взрыва, расположенных на расстоянии на станциях 1 и 97 для профиля Mt Bulga, уменьшаются с расстоянием между источником и приемником, и показывают, что вертикальный градиент скоростей незначителен на главной преломляющей границе. Более того, амплитуды головной волны для пунктов взрыва, расположенных на станциях 25, 37, 49, 61 и 73 в полосе приемников, характеризуются инверсией скоростей. Эти результаты не подтверждают подразумеваемое использование вертикального градиента скоростей, приведенного на рис. 3.

В поле ближней зоны, где имеет место большая часть съемок при инженерно-геологических исследованиях, геометрическое расхождение преобладает над наблюдаемыми амплитудами головной волны. Palmer (2001b) продемонстрировал, что 2D анализ амплитудных всплесков с усилением прямых и обратных амплитуд эффективно вводит поправку при геометрическом расхождении и что результирующая амплитудная составляющая в основном пропорциональна квадрату коэффициента образования головной волны. Palmer (2001c) также продемонстрировал, что коэффициент образования головной волны, который является эквивалентом преломленной волны в уравнениях Zoeppritz в сейсморазведке методом отраженных волн, приблизительно пропорционален отношению удельного акустического сопротивления (результат сейсмической скорости и плотности) в покрывающем пласте к удельному акустическому сопротивлению на преломляющей границе. Следовательно, низкие сейсмические скорости на преломляющей границе представляют в результате высокие амплитуды, в то время как, наоборот, высокие сейсмические скорости на преломляющей границе дают низкоамплитудный результат, обусловленный тем, что сейсмические скорости в покрывающем пласте не проявляют существенных пространственных вариаций.

Рисунок 5 показывает сейсмические скорости, вычисленные на каждой станции по GRM SSM, и амплитудную составляющую, которая скорректирована для аномалий, возникающих в приповерхностном почвенном слое, и обработана, чтобы подчеркнуть влияние сейсмических скоростей на преломляющей границе. Этот рисунок подтверждает сейсмические скорости на преломляющей границе, вызванные GRM и показанные на томограмме на рисунке 4.



*Тезис 2 – время использовать 2D алгоритмы инверсии*

Исследование примера Mt Bulga является убедительной демонстрацией принципиальных неоднозначностей всех инверсий приповерхностных преломленных волн. Кроме конкретных показателей, привязанных к неоднозначностям, представление единственной томограммы преломленных волн, которая с достаточной точностью соответствует данным времен пробега, не демонстрирует, что результат корректный, или даже самый правдоподобный.

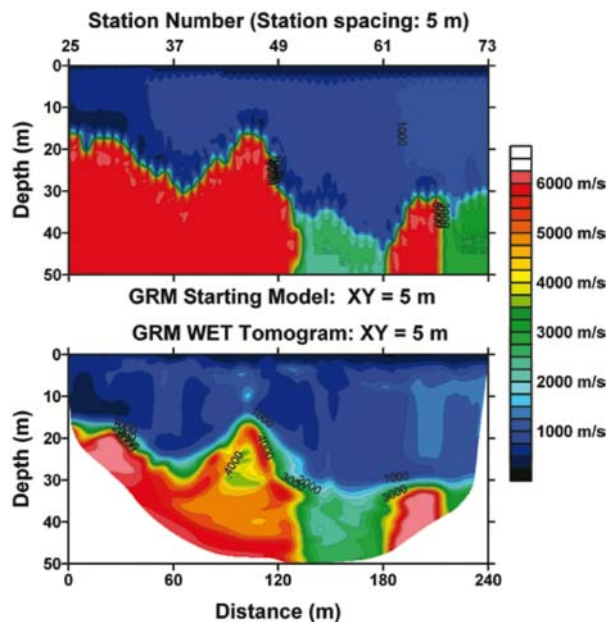


Рис. 4 Томограмма преломленных волн, полученная по WET томографии, используя алгоритмы GRM для создания стартовой модели, по 2D профилю, зарегистрированному через главную зону нарушений на Mt Bulga.

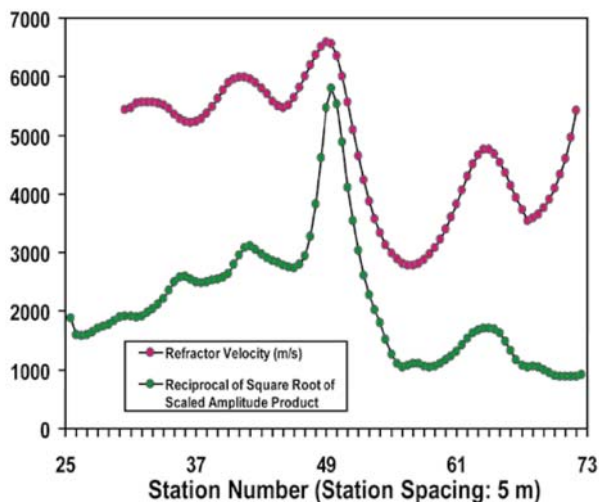


Рис. 5 Сейсмические скорости, вычисленные на каждой станции, и составляющая амплитуд головной волны для пунктов взрыва 2 м 97, обработанные, чтобы отразить эффект скоростей преломленных волн. Более низкие значения обработанных амплитуд на обоих концах траверса являются результатом остаточного геометрического расхождения, не полностью удаленного усилением прямых и обратных амплитуд.

Алгоритм инверсии 1D tau-p в настоящее время используется как оператор, устанавливаемый по умолчанию, для создания стартовых моделей по большинству программ томографии преломленных волн. Однако, исследования Mt Bulga и других ситуаций показывают, что алгоритм 1D tau-p не способен выделить даже низкоскоростные зоны нарушения шириной более 10 станций, и что требуются скорее 2D алгоритмы инверсии, чем 1D инверсионные алгоритмы, там, где первостепенной целью является детальный пространственный анализ сейсмических скоростей на преломляющей границе.

В таких случаях, где признано реальное существование неоднозначности, самым элементарным подходом является употребление априорной информации. Обычно такая априорная информация содержится либо в скважинных данных, либо в массивах данных других геофизических методов. К сожалению, такие априорные данные обычно не доступны при инженерно-геологических исследованиях в рекогносцировочной съемке или на площадях зеленых полей.

Однако, амплитуды головной волны, другие 50% данных, дают непосредственно доступный источник априорных данных, на который часто не обращают внимания. 1D и 2D анализ амплитуд головной волны может обычно разрешить многие неопределенности, связанные с инверсией преломленных волн. Основное преимущество использования амплитуд головной волны заключается в том, что амплитуды и времена пробега являются различными компонентами одного и того же сейсмического сигнала, и, следовательно, относятся к тем же самым слоям и поверхностям и тем же самым петрофизическим свойствам сейсмической скорости. Согласованность между амплитудами и временами пробега устанавливает внутреннюю согласованность в пределах сейсмических данных и относится к показателю надежности инверсионной обработки.

Полное принятие алгоритма 2D инверсии как оператора, устанавливаемого по умолчанию, при томографии преломленных волн непременно приведет к существенным улучшениям пространственного разрешения сейсмических скоростей, и может быть ускорено необходимостью давать результаты, согласующиеся с подлинными 3D съемками методом преломленных волн при близко расположенных линиях наблюдения. Более того, стандартный анализ амплитуд головной волны также продвинет применение 2D алгоритмов инверсии. Таким образом, можно утверждать, что требуется новое поколение программ томографии преломленных волн, в которых все данные, включающие амплитуды головной волны, смоделированы в явной форме.

#### Разрез конволюции преломленных волн

##### RCS

Разрез конволюции преломленных волн (RCS) создается конволюцией пар отдельных прямого и обратного ходов (Palmer, 2001b, c, d; Palmer and Jones, 2005; de Franco, 2005). Операция свертывания (конволюции) суммирует времена пробега и усиливает амплитуды, и, следовательно, создает ту же временную структурную модель преломленной границы, что модель, полученная по алгоритмам GRM. Более того, усиление амплитуд эффективно уравнивается вследствие компоненты геометрического расхождения с результатом, в котором RCS амплитуды в основном пропорциональны квадрату коэффициента образования головной волны.

## Геофизика окружающей среды и инженерная геофизика

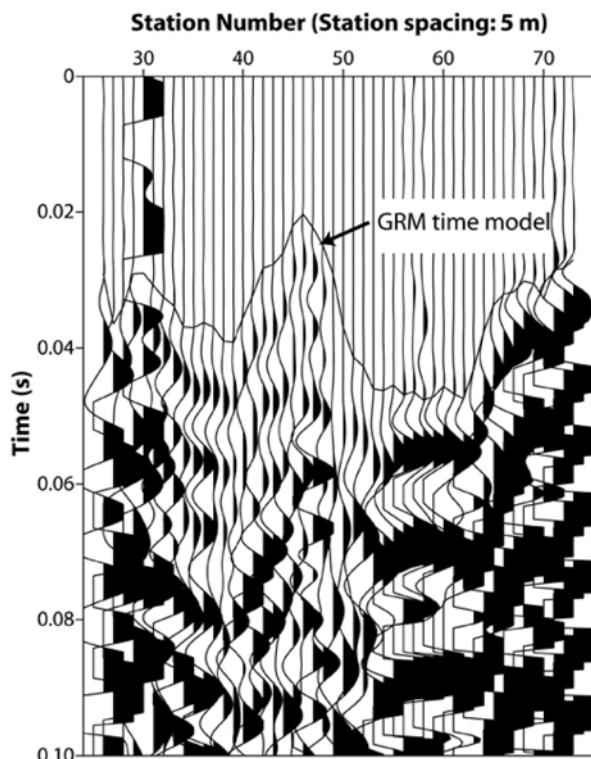


Рис. 6 RCS, созданный по двум сейсмограммам для станций 1 и 97, зарегистрированных на Mt Bulga. Существует хорошее соответствие между единичным сгибом на RCS и единичным сгибом на временной модели GRM, так же, как и на рис. 4

Рисунок 6 представляет RCS, созданный по сейсмограммам ОПВ для выносных пунктов взрыва, расположенных на станциях 1 и 97 для профиля Mt Bulga. Рисунок 6 демонстрирует, что временная модель, созданная по RCS, согласуется с временной моделью, созданной по GRM, и что амплитуды первых вступлений RCS совпадают с результатами, приведенными на рисунке 5.

Рисунок 7 приводит разрез расположенных друг над другом RCS, созданных по данным, зарегистрированным вдоль траверса в окрестности железной дороги Wirrinya, частично огибающей региональную сейсмическую съемку Lachlan (Jones and Drummond, 2001) в юго-восточной Австралии. Данные были получены с помощью 240-канальной системы, использующей приемники, расположенные с 10-ти метровым интервалом, симметричную расстановку сейсмографов и один или иногда два 30-тонных вибрационных сейсмических источника. Рисунок 7 показывает GRM временную модель, которая находится в исключительном соответствии с RCS.

Главная польза интенсивного сгиба по суммированному RCS заключается в том, что он значительно смягчает артефакты взаимной корреляции (Roberto de Franco, pers. comm.). Такие артефакты могут быть созданы суммированием прямых вступлений от одной преломляющей границы с обратными вступлениями от другой преломляющей границы. В результате, там, где используется суммирование, могут быть распознаны подлиннее более поздние явления, такие как дифракция, дополнительно к хорошо известным первым вступлениям преломленных волн.

Рисунок 7 представляет временную модель GRM, которая приблизительно представляет первую кратную волну траектории преломленного луча в слое выветривания. Связь между первой кратной волной слоя выветривания и многими эпизодами в RCS очень хорошая. Этот результат показывает, что могут быть также обнаружены другие эпизоды. В частности, ожидается, что головные поперечные волны, конвертированные по преломленным продольным волнам, могут быть изображены по соответствующим трех компонентным данным (3C) с использованием RCS.

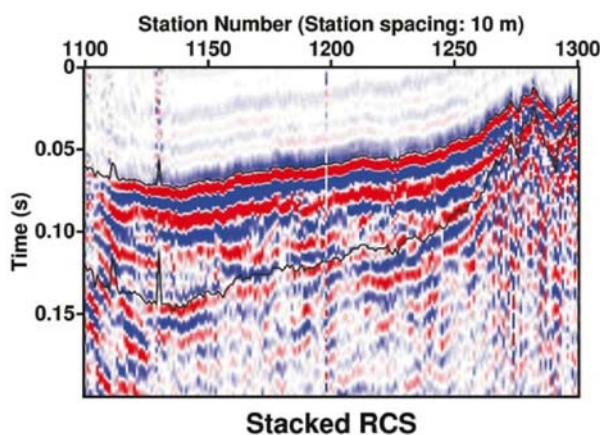
Рисунок 8 представляет часть RCS над известняковым плато в засушливой области на Среднем Востоке. Он показывает множество гиперболических дифрагированных волн, которые образованы от каверн под подошвой выветривания на глубинах приблизительно 0.015-0.020 с. (Отчетливое вступление на 0.180 с является граничной или поверхностной волной).

Исчезновение дифрагированных волн при перемещении или отображении требует точно определенных вертикальных или миграционных скоростей в перекрывающихся слоях. Предполагается, что такие скорости дадут дополнительные методы для распознавания и аккомодации инверсии скоростей или сейсмической анизотропии в слоях выветривания.

В конечном счете, создание многоуровневого суммированного RCS (de Franco, 2005) повышает возможность альтернативных методов инверсии преломленных волн. Возможна ли инверсия преломленных волн по «модели свертки преломленных волн» тем же путем, как выполнена инверсия данных отраженных волн по модели конволюции отраженных волн (Sheriff and Geldart, 1995, p.139; Yilmaz, 1987, p.85)?

Тезис 3 – время для полной обработки трассы.

Рис. 7 Суммированный RCS над участком профиля Wirrinya



с наложенной временной моделью GRM. Сгиб находится на расстоянии приблизительно 40. Суммирование уничтожило артефакты взаимной корреляции, и могут быть опознаны факты, которые тесно коррелируются с временной моделью GRM.

RCS переводит обработку данных преломленных волн в формат, который совместим с громадными программными ресурсами, которые существуют для обработки данных отраженных волн. Даже элементарные операции, такие как суммирование, могут давать результаты, которые способствуют извлечению большей

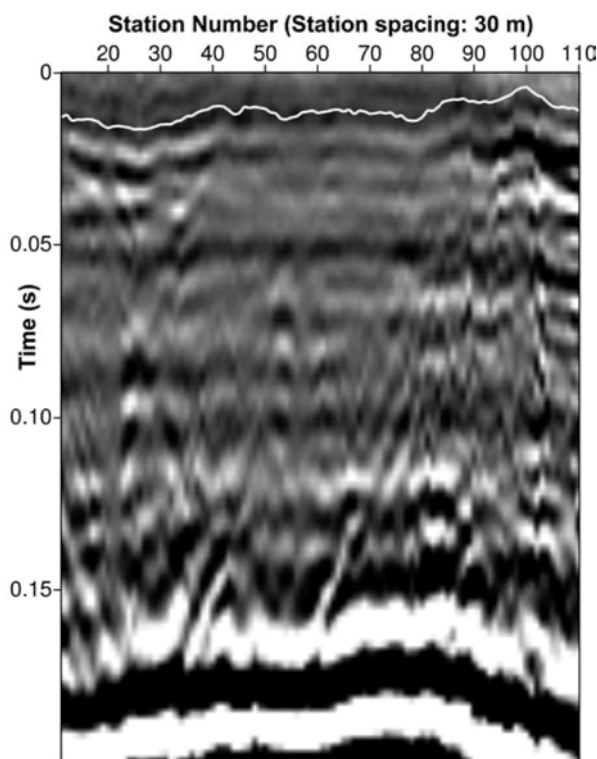


Рис. 8 Часть суммированных RCS по известняковому плато. Белая линия представляет временную модель подошвы выветривания. Подразумевается, что дифракция возникает на карстовых структурах внутри известняков.

информации из данных преломленных волн, например, по более поздним событиям, таким как дифракция и, возможно, даже поперечные (сдвиговые) волны. К тому же более совершенные операции, такие как создание изображения, предлагают дальнейшие возможности для разработки лучшего разрешения преломляющих границ, особенно там, где существуют неоднородности, такие как пустоты, и где существуют боковые волны.

Основное преимущество RCS заключается в том, что он дает практический метод для обработки значительных объемов характеристик 3D массивов данных. Более того, RCS предоставляет удобную область, в которой могут быть использованы амплитуды, а также времена пробега. Однако, оптимальное преимущество RCS лучше всего достигается при современных и эффективных методах сбора данных. Основные процедуры, такие как суммирование, требуют наборов данных, по которым могут быть созданы многочисленные RCS со стойким отношением сигнала к помехе, с равномерным разделением между парами прямого и обратного взрыва. Такие данные лучше всего приобретаются по методам перемещения ОСТ, широко используемым в методах отраженных волн.

#### Параметры съемки

*Статическая установка в сравнении с перемещающейся расстановкой*

Ранее системы возбуждения в природоохранных и инженерно-геологических приложениях применяли только 12 или 24 канала. Такие системы не способны регистрировать вступления от всех преломляющих границ по единичному пункту взрыва, и в результате применялось множество источников, чтобы

последовательно зарегистрировать все преломляющие границы.

Обычный способ осуществления этого – статическая установка сейсмоприемников, в которых регистрируется много сейсмограмм, в то время как установка остается стационарной. Когда эти сейсмограммы зарегистрированы, вся установка возвращается в прежнее состояние и затем передислоцируется на место рядом с предыдущей установкой, часто с перекрытием приемников. В результате большинство положений пунктов взрыва повторяется, по крайней мере, дважды, а часто и три раза. К тому же, регистрация останавливается, пока установка возвращается в прежнее состояние, а затем передислоцируется.

Альтернативный метод сбора данных применяет существенно большее число каналов регистрации и операцию непрерывных перемещений расстановок, аналогично той установке, которая используется методами отраженных волн CMP, в которых каждый пункт взрыва захватывается только один раз. Основное преимущество операций с движением по расстановке состоит в том, что может быть значительно уменьшено число сейсмограмм, которых требуется половина, а часто и одна треть, по сравнению с методом статической установки. Непрерывная регистрация и уменьшение числа сейсмограмм может быть существенно важно, когда выполняются работы методом преломленных волн в городских районах и в окрестности существующих транспортных зон, где главной задачей может быть минимум беспокойства для обычной деятельности.

Таблица 1 представляет сопоставление статических расстановок, каждая с 11 пунктами взрыва, с движением по расстановке при той же длине профиля 420 м с интервалом между станциями 2.5 м. Даже с 60-канальной системой имеем довольно значительное уменьшение числа сейсмограмм при стандартной ежедневной производительности сбора данных.

*Тезис 4 – время приобретает лучшие данные при более низких затратах*

В настоящее время использование систем возбуждения только с 12 или 24 регистрирующими каналами приводит к весьма неэффективным полевым работам, использующим статические приемные установки. Там, где используются системы возбуждения с большим числом каналов, могут быть получены 2D, 3D и 3C объемы высоко разрешающих сейсмических данных при более низких затратах.

#### Особенности работы

*Контраст между науками о земле и прикладными науками.* Многие инженерно-геологические работы показали только скромные достижения в течение прошедшего полувека из-за того, что во многих случаях инженерно-геологические геофизики более заинтересованы скорее использованием обычных процедур, повсеместных «практических руководств» и «испытанных» приемов, чем усовершенствованием науки. Этот подход более типичен для прикладных областей с неприятием риска и инноваций.

Таблица 2 сопоставляет неписанные нормы специалистов области наук о земле с таковыми инженерно-геологических специалистов. Подчеркивается, что ни одна профессиональная деятельность не является «корректной», так как каждая деятельность свойственна задачам, за которые она отвечает. Очевидно, там, где безопасность и минимизация риска являются главными задачами, как

www.firstbreak.org © 2008



## Геофизика окружающей среды и инженерная геофизика

например, инженерное сооружение и рабочие проекты, там свойственны консервативные методы, практические руководства и использование «испытанных» приемов. Однако, можно доказать, что принятие инженерно-геологической профессиональной деятельности (профессиональной культуры) специалистами наук о земле не целесообразно. Практическое руководство устанавливает скорее минимальные стандарты, чем поддерживает выдающееся мастерство и инновации.

*Тезис 5 – время заново создать профессиональную культуру.*

Существует много важных различий между нефтяной отраслью и отраслью инженерных сооружений. Тем не менее, обе содержат в себе несопоставимые профессиональные культуры, каждая из которых требует поддержки, тогда они могут эффективно сотрудничать. Принятие преобразованных в отрасли 3D, 4D и 3C сейсмических методов инженерами-нефтяниками потребовало много лет и междисциплинарный комплексный подход. Проблема заключается скорее в интеграции, чем замещении одной профессиональной культуры другой господствующей культурой (Richardson and Sneider, 1992).

В прошлом, реализация 2D сейсмических методов преломленных волн, как методов с низкой стоимостью, для определения глубин до коренных пород имела лишь небольшой успех в значительной степени из-за того, что они не обращались к фундаментальным инженерным потребностям минимизировать риск. Затраты являются обычно второстепенным соображением там, где риск является главной задачей. Хотя общепризнанно, что все работы по преломленным волнам нацелены на то, чтобы обеспечить как точную оценку глубин, так и являются практическими (целесообразными), необходимо отметить, что наблюдается более значительное преимущество 3D методов преломленных волн и аэрогеофизических методов благодаря скорее их более высокой способности пространственного разрешения при создании более детальных геологических моделей, чем из-за усовершенствованных методов глубинной инверсии.

Большая польза методов преломленных волн будет наблюдаться только тогда, когда все группы профессионалов, работающие по инженерно-геологическим и экологическим проблемам, сойдутся во взглядах по двум фундаментальным принципам. Первый принцип – геофизические или косвенные выборочные методы скорее дополняют, чем соперничают, с бурением или прямыми выборочными методами. Другими словами, более детальные инженерно-геологические модели приповерхностной среды могут быть получены

	Статические установки	Движение по расстановке	Различие
Число каналов	24	60	+150%
Шаг между пунктами взрыва	6 станций	6 станций	
Полное число пунктов взрыва	78	29	-62%
Полное число трасс	1950	1740	-11%
Трассы от покрывающих пород	39%	46%	+18%
Трассы от преломляющей границы	61%	54%	-11%
Зона охвата преломляющей границы	395 м	420 м	+7%
Трассы на каждую станцию приемника	17	10	-41%

Таблица 1 Сопоставление деталей приобретения по статическим и «динамическим» расстановкам для траверса длиной 420 м, используя трассовый интервал 2.5 м. Эти параметры являются представителями типичного профиля дороги при сооружении автомагистрали.

	Наука о земле	инженерно-технические разработки
Задачи	Разведка & обнаружение	Продукция & строительство
Методика	Принятие риска – как иначе совершить обнаружение?	Минимизация риска – рассмотрение безопасности и окружающей среды
Данные	неполные, неточные и противоречивые	Стеснены погрешностями, неоднозначностью и непредвиденными обстоятельствами
Управление	Ясное структурирование и усовершенствования	Иерархическое и подотчетное
Технические журналы	Многочисленные, ориентированные на исследования и инновации	Немногочисленные, ориентированные на стандартные процедуры и практические
Разработка продукции	Проведение экспериментов составная часть культуры	Предпочтение рассматривать только испытанные результаты

Таблица 2 Сопоставление профессиональных культур.

## Геофизика окружающей среды и инженерная геофизика

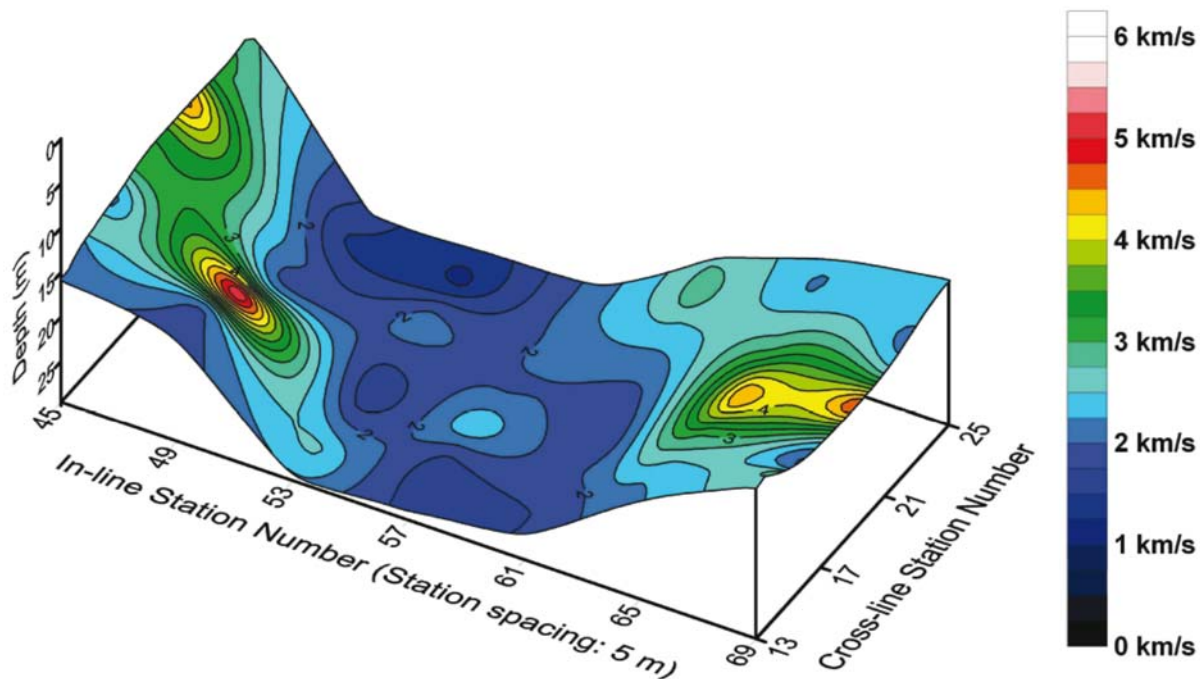


Рис. 9 Представление в сплошном каркасе 3D результатов рисунка 2. Сейсмические скорости на преломляющей границе, показанные цветом, наложены на глубины преломляющей поверхности.

сочетанием 3D геофизическим методов, имеющих пространственное разрешение высокого качества, со скважинными результатами с высоким качеством разрешения по вертикали.

Второй принцип – значительная временная и стоимостная экономия может быть достигнута, в-первых, осуществлением относительно низких затрат, используя геофизические методы с высокой степенью пространственного разрешения, чтобы добиться целого, или предварительного понимания положений, а затем употреблением более медленных, более дорогостоящих и более детальных прямых методов исследования, чтобы принять решение по любому региону, для которых гарантируется большее понимание. Другими словами, геофизические методы с высокой степенью разрешения признаются как более эффективные в смысле затрат методы для создания первичной детальной 3D модели, тогда как бурение и другие методы прямого обследования признаются как более эффективные методы в смысле затрат для контроля, детализации и представления в количественной форме первичной инженерно-геологической модели.

Приглашаем читателя рассмотреть объем бурения, который требуется для создания инженерно-геологической модели приповерхностной среды, эквивалентной той, которая возможна по результатам, приведенным на рисунках 2 и 9. Пожалуй, более полезное упреждение следует сделать, чтобы спланировать эффективное в отношении затрат бурение и тестовые программы, которые смогут скорее проверить, чем продублировать, любую инженерно-геологическую модель, основанную на рисунках 2 и 9.

Сложной проблемой является разработка и использование технологий, которые способствуют эффективной интеграции и анализу различных массивов данных, использующих устойчивость противоречивых профессиональных культур. Такая интеграция неизбежно

приведет к значительной экономии времени и затрат, уменьшению риска благодаря более детальной инженерно-геологической характеристике объекта исследования и, в конечном счете, более эффективному инженерному проектированию и строительству.

Принятие нефтяной отраслью 3D методов отраженных волн создало множество методов для визуализации результатов, чтобы извлечь максимальное количество информации (Nelson, 2000). Аналогичные методы могут способствовать детальной интерпретации соответствующих 3D данных преломленных волн. Нам необходимо вновь создать культуру экспериментирования и инноваций в инженерно-геологической геофизике.

### Выводы

#### Задача на будущее

Инженерно-геологическое возрождение является необходимым постоянным процессом для всей инженерно-ориентированной продукции. В противном случае, консервативные структуры, которые не вкладывают денежные средства в новые технологии, вероятно, станут неприемлемыми (Jarchrow and Cura, 2000). Здесь я пытаюсь разработать концепцию для приповерхностных инженерно-геологических методов преломленных волн на будущее. Можем ли мы согласиться с тем, что 2D глубинный разрез является вчерашним продуктом? Каков должен быть завтрашний продукт? Какие продукты, кажется вам, могут быть реализованы? Какие должны быть драйверы для инновации и введения любой новой технологии?

#### Концепция для методов преломленных волн

Самая важная проблема заключается в признании того, что 3D методы преломленных волн могут создавать более детальные инженерно-геологические модели приповерхностной среды, так как они могут обеспечить пространственное разрешение высокого качества,



## Геофизика окружающей среды и инженерная геофизика

которое является огромным преимуществом геофизических методов. Другое преимущество 3D методов преломленных волн состоит в измерении структуры пород и трещиноватой пористости по азимутальной анизотропии (Palmer, 2001a).

Первым этапом применения 3D методов является установление более эффективных методов сбора данных. Необходимо заменить статические установки более эффективными «динамическими» расстановками, чтобы лучше регистрировать данные, которые предназначаются для обработки по полным трассовым методам, таким как RCS. Необходимо использовать намного больше каналов и в результате технологию MEMS (Mougenot and Thorburn, 2004), чтобы способствовать регистрации данных с более высокой степенью разрешения по трехкомпонентным сейсмоприемникам.

Вторым этапом является интеграция времен пробега и амплитуд, так как времена пробега составляют только половину данных. Включение амплитуд в стандартный анализ данных преломленных волн, который может быть всегда выполнен по существующим приповерхностным 2D работам, может разрешить много неопределенностей в модели параметризации, выявить неоднородности, такие как пустоты, и создать плотностные модели (Palmer, 2006).

Третий этап – применить полную обработку трасс, например, по методу RCS, чтобы получить преимущество громадных ресурсов, имеющихся в распоряжении, для пакета программ обработки отраженных волн (и пост обработки), и, таким образом, эффективной обработки огромных объемов данных, полученных 3D методами преломленных волн. Более того, RCS автоматически объединяет времена пробега и амплитуды, лучше способствуют созданию изображения или миграции по истинным 3D объектам, включающим пустоты и другие неоднородности, и является потенциально более эффективным для обработки данных продольных (сдвиговых) волн. Применение методов пост обработки, таких как атрибутивный анализ, который повторяется по 3D данным отраженных волн (Chopra and Marfurt, 2007), предлагает возможность извлечения большей информации по данным преломленных волн и, в свою очередь, значительно усовершенствованной детальной инженерно-геологической характеристики объекта исследования.

В конечном счете, необходимо представить любую новые результаты и интегрировать несопоставимые профессиональные культуры по более эффективной информации, использующей современные методы визуализации и представления.

За прошедшие 50 лет отрасль отраженных волн продемонстрировала впечатляющую регистрацию при успешном введении преобразованных отраслью инноваций по приобретению данных, обработке данных и интерпретации и представлению результатов. Пришло время методам приповерхностных преломленных волн следовать аналогичным путем, такое направление деятельности потребует концепции и руководства, тогда весьма застойная наука будет модернизирована.

### References

- Barton, R. and Barker, N. [2003] Velocity imaging by tau-p transformation of refracted traveltimes. *Geophysical Prospecting*, 51, 195-203.
- Červený, V. and Ravindra, R. [1971] *Theory of Seismic Head Waves*. University of Toronto Press.
- Chopra, S. and Marfurt, K. J., [2007] *Seismic Attributes for Prospect Identification and Reservoir Characterization*. Geophysical Developments No. 11, SEG, Tulsa.
- de Franco, R. [2005] Multi-refractor imaging with stacked refraction convolution section. *Geophysical Prospecting*, 53, 335-348.
- Jarchow, C.M. and Cura, G.H. [2000] An incomplete review of research and technical innovation. *The Leading Edge*, 19, 610-613.
- Jones, L.E.A. and Drummond, B.J. [2001] Effect of smoothing radius on refraction statics corrections in hard rock terrains. *15<sup>th</sup> ASEG Conference and Exhibition*, Brisbane, Abstract.
- Lanz, E., Maurer H. and Green, A.G. [1998] Refraction tomography over a buried waste disposal site. *Geophysics*, 63, 1414-1433.
- Mougenot, D. and Thorburn, N. [2004] MEMS-based 3D accelerometers for land based seismic acquisition: is it time? *The Leading Edge*, 23, 246-250.
- Nelson, H.R. (Ed.) [2000] Special Section: Immersive Visualization. *The Leading Edge*, 19, 505-543.
- Nestvold, E.O. [1992] 3-D seismic: is the promise fulfilled? *The Leading Edge*, 11, 12-19.
- Oldenburg, D.W. [1984] An introduction to linear inverse theory. *Trans IEEE Geoscience and Remote Sensing*, GE-22, 665-674.
- Palmer, D. [1980] *The Generalized Reciprocal Method of Seismic Refraction Interpretation*. SEG, Tulsa.
- Palmer, D. [1981] An introduction to the generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation. *Geophysics*, 46, 1508-1518.
- Palmer, D. [1986] *Refraction Seismics: the Lateral Resolution of Structure and Seismic*. Geophysical Press.
- Palmer, D. [2001a] Measurement of rock fabric in shallow refraction seismology. *Exploration Geophysics*, 32, 907-914.
- Palmer, D. [2001b] Imaging refractors with the convolution section. *Geophysics*, 66, 1582-1589.
- Palmer, D. [2001c] Resolving refractor ambiguities with amplitudes. *Geophysics*, 66, 1590-1593.
- Palmer, D. [2001d] A new direction for shallow refraction seismology: integrating amplitudes and traveltimes with the refraction convolution section. *Geophysical Prospecting*, 49, 657-673.
- Palmer, D. [2003] Application of amplitudes in shallow seismic refraction inversion. *16<sup>th</sup> ASEG Conference and Exhibition*, Adelaide, Abstract.
- Palmer, D. [2006] Refraction traveltime and amplitude corrections for very near-surface inhomogeneities. *Geophysical Prospecting*, 54, 589-604.
- Palmer, D. and Jones, L. [2005] A simple approach to refraction statics with the generalized reciprocal method and the refraction convolution section. *Exploration Geophysics*, 36, 18-25.
- Richardson, J.G. and Sneider, R.M. [1992] Synergism in reservoir management. In: Sheriff, R.E. (Ed.) *Reservoir Geophysics*. SEG, Tulsa, 6-11.
- Ruijtenberg, P.A., Buchanan, R. and Marke, P. [1992] Three-dimensional data improve reservoir mapping. In: Sheriff, R.E. (Ed.) *Reservoir Geophysics*. SEG, Tulsa, 122-130.
- Schuster, G.T. and Quintus-Bosz, A. [1993] Wavepath eikonal traveltime inversion: theory. *Geophysics*, 58, 1314-1323.
- Sheriff, R.E. and Geldart, L.P. [1995] *Exploration Seismology*, 2<sup>nd</sup> edn. Cambridge University Press.
- Treitel, S. and Lines, L. [1988] Geophysical examples of inversion (with a grain of salt). *The Leading Edge*, 7, 32-35.
- Yilmaz, O. [1987] *Seismic Data Processing*. SEG, Tulsa.
- Zhang, J. and Toksöz, M.N. [1998] Nonlinear refraction traveltime tomography. *Geophysics*, 63, 1726-1737.