

## Новый вариант сейсмотомографической инверсии

### Tomographic inversion of common image gathers

**Флавио Аккайно (Flavio Accaino)<sup>1\*</sup>, Гуальтьеро Бом (Gualtiero Bohm)<sup>1</sup> и Умберта Тинивелла (Umberta Tinivella)<sup>1</sup>**

Интерпретация данных сейсморазведки МОВ в сложных геологических условиях требует хорошего сейсмического изображения, которое можно получить, только если поле скоростей известно с высокой точностью. При наличии изменений скорости по латерали для установления истинных глубин и геометрии структур необходима глубинная миграция до суммирования по ОГТ (pre-stack depth migration, PSDM). Скорости, используемые при суммировании по ОГТ не подходят для этого шага обработки, поскольку они рассчитываются для каждого положения ОГТ в рамках модели с горизонтальными границами и постоянными скоростями (Yilmaz, 2001). Чтобы избежать этой проблемы, нужно использовать более тщательный подход к анализу скоростей, такой как томографическая инверсия. Томограмма скоростей обычно применяется для расчета времен прихода при осуществлении PSDM. Удовлетворительные результаты миграции дают возможность оценить достоверность поля скоростей. Если поле скоростей верно, то отражения на результирующих разрезах до глубинной миграции имеют горизонтальные оси синфазности. В частности, если скорости завышены, то оси погружаются с удалением от ПВ, а если занижены – то поднимаются.

За 10 лет предпринято много усилий, чтобы более точно определять поле скоростей, используя результаты PSDM. Как показано в (Lafond and Levander, 1993), миграция до суммирования по ОГТ дает многочисленные данные, по которым можно определить поправки в скорости. Их, в свою очередь, можно использовать для улучшения фокусировки отражающих горизонтов. Этот метод основан на алгоритме Кирхгофа – алгоритме снятия слоев с геометрическим прослеживанием лучей в неоднородной среде. Таким образом, происходит итерационное уточнение скоростной модели и локализация отражающих горизонтов по глубине. Анализ когерентности разрезов используется для обновления скоростной модели при негоризонтальных отражающих границах (Liu, 1995). Эта процедура имеет те же ограничения, что и анализ скоростей для суммирования по ОГТ, поскольку считается, что скорости постоянны вдоль профиля. В работе (Kosloff et al., 1996) скорости и глубины определяются по томограммам общих точек отражения (ОТО; common reflecting point, CRP) мигрированного разреза. Этот метод основан на принципе томографии, связывающем изменения времени пробега по лучу с изменениями медленностей и глубин. Принцип томографии используется для преобразования ошибок в глубинах мигрированных ОТО в разность времен по паре лучей ОТО, то есть используется обычная томография во временной области. Преимущество этого метода состоит в том, что мигрированные разрезы используются целиком, а не для

анализа в отдельных точках. С другой стороны, при этом для получения окончательного разреза миграцию приходится проводить многократно. Поэтому авторами разработана процедура обновления скоростной модели путем томографической инверсии отдельных отражений, требующая лишь однократной миграции для каждого слоя. Задача состоит в том, чтобы добиться горизонтального положения выделенных отражений на всех томограммах. В этой работе представлена идея метода и несколько примеров обработки модельных и полевых данных.

#### Идея метода

В рамках метода глубинная миграция и томографический алгоритм во временной области используются для определения, с помощью итераций или снятия слоев, поля скоростей и получения удовлетворительного глубинного разреза.

Вначале проводится PSDM при постоянной скорости. Значение скорости определяется по результатам стандартного анализа при суммировании по ОГТ. После миграции на томограммах выбираются первые отражения как функции удаления от ПВ (рис. 1, сверху). Далее, по методу наименьших квадратов, в предположении гиперболической формы осей синфазности на всех томограммах, производится экстраполяция значений для нулевых удалений – начальных глубин (рис. 1, внизу, желтая линия). Таким образом, начальное приближение глубины отражающей границы получается интерполяцией данных по глубинам для нулевых удалений. Перед началом инверсии для каждой трассы рассчитываются опорные времена на расстоянии от ПВ, соответствующем истинному (опорное время – время пробега по лучу с точками отражения на выбранных глубинах, приведенных к нулевому расстоянию от ПВ – опорных глубинах; см рис. 1, в середине). Если скоростная модель, использованная при миграции, верна, опорные глубины совпадут на всех трассах всех томограмм. Если же модель неверна, то время пробега по лучам с точками отражения на нулевом расстоянии от ПВ (далее – начальное время; рис. 1, в середине) отличается от опорного (рис. 1, внизу).

Определив опорные времена, можно начинать инверсию. На первом шаге предполагается, что расхождение опорных и начальных времен связано только с ошибками определения скорости. Скорости меняют (допуская в пределах данной томограммы изменения и по латерали), пока опорные и начальные времена не совпадут для всех лучей. Разумеется, инверсия проводится с одновременным учетом отражений на всех томограммах.

<sup>1</sup> Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale-OGS-Borgo Grotta Gigante 42/c Sgonico (TS) 34010, Italy \* Corresponding author. E-mail: faccaino@ogs.trieste.it

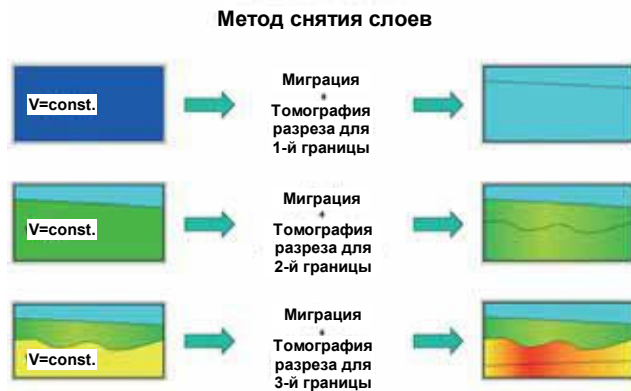


Рис.1. Блок-диаграмма метода снятия слоев



Рис. 2. Блок-диаграмма томографической инверсии полевой записи.

Второй шаг инверсии состоит в определении исправленных начальных глубин по исправленному полю скоростей для каждой томограммы. Эти два шага инверсии (исправление поля скоростей и исправление глубины слоя) итерационно повторяются, пока изменение начальных глубин за итерацию не станет меньше заданной величины. Окончательно глубины границы определяются интерполяцией между установленными глубинами точек отражения при нулевом расстоянии от ПВ.

Для инверсии используется программ Cat3D, разработанная авторами в OGS. В ней использована методика одновременного итеративного восстановления (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique - SIRT), описанная в (Stewart, 1993), и измененная версия метода прослеживания лучей по принципу минимального времени пробега, описанного в (Bohm et al., 1999).

Инверсия для второй отражающей границы начинается с миграции с учетом полученного поля скоростей в первом слое и постоянной скоростью во втором. Далее для оценки скоростей и геометрии второго слоя применяется описанная выше процедура. Отметим, что скорости и глубины получаются по методу снятия слоев, то есть параметры (как скорости, так и глубины) верхних слоев в ходе итерационного процесса считаются известными. Блок-схема процедуры инверсии приведена на рис. 2.

### Модельные примеры

Процедура инверсии испытана на модельных примерах, представляющих области со сложным строением и латеральными изменениями скоростей. Миграции выполнялись в системе Seismic Unix (Cohen and Stockwell, 2001). В обоих примерах моделировались морские работы со 135 положениями ПВ и с косой длиной 3000 м с 61 приемником. Шаг ПВ и шаг ПП были по 50 м. Объем данных, подвергнутых инверсии составил 8235 отсчетов времени на каждое отражение.

В первом примере рассмотрена простая модель с двумя наклонными отражающими границами и однородными слоями (рис. 3). Процедуру инверсии применили ко второму отражающему горизонту, считая параметры первого слоя известными, например из предыдущего шага инверсии. При миграции использована скоростная модель с постоянной скоростью во втором слое (2.7 км/с) и во всем интервале глубин модели (вторая отражающая граница при миграции не учитывалась). На рис. 3 внизу показан результат инверсии; глубина второй границы (красный пунктир) соответствует истинной (белая линия).

Во втором примере рассмотрена модель с горизонтальным градиентом (изменение на 0.4 км/с на протяжении 5 км) во втором слое (рис. 4). На рис. 4 внизу показаны результаты инверсии; отметим хорошее согласование глубины второй границы по результатам инверсии (красный пунктир) и ее истинной глубины (белая линия). Для полноты эксперимента скорость оценили также по когерентности томограмм. Для этого применена процедура, детально описанная в (Liu, 1995), реализованная в системе Seismic Unix. Максимальная ошибка по глубине алгоритма авторов составила 1.5%, а по алгоритму Лю - 3.7% (рис. 5). Следует отметить, что в алгоритме авторов для инверсии по каждому слою нужна лишь однократная миграция. При использовании анализа когерентности миграцию приходится выполнять много раз, в данном случае - шесть.

### Полевой пример

Процедуру инверсии применили для определения поля скоростей по данным многоканальной сейсморазведки, полученным на Антарктическом полуострове, где обнаружено присутствие газогидратов и газа по известным горизонтам Bottom Simulating Reflector (BSR) и Base of the free Gas Reflector (BGR), см. (Tinivella and Accaino, 2000). В этом случае имеются сильные изменения скоростей по латерали, связанные изменением фазового состояния газа и сложной геометрией аккреционной призмы. Скоростная модель определялась по алгоритму

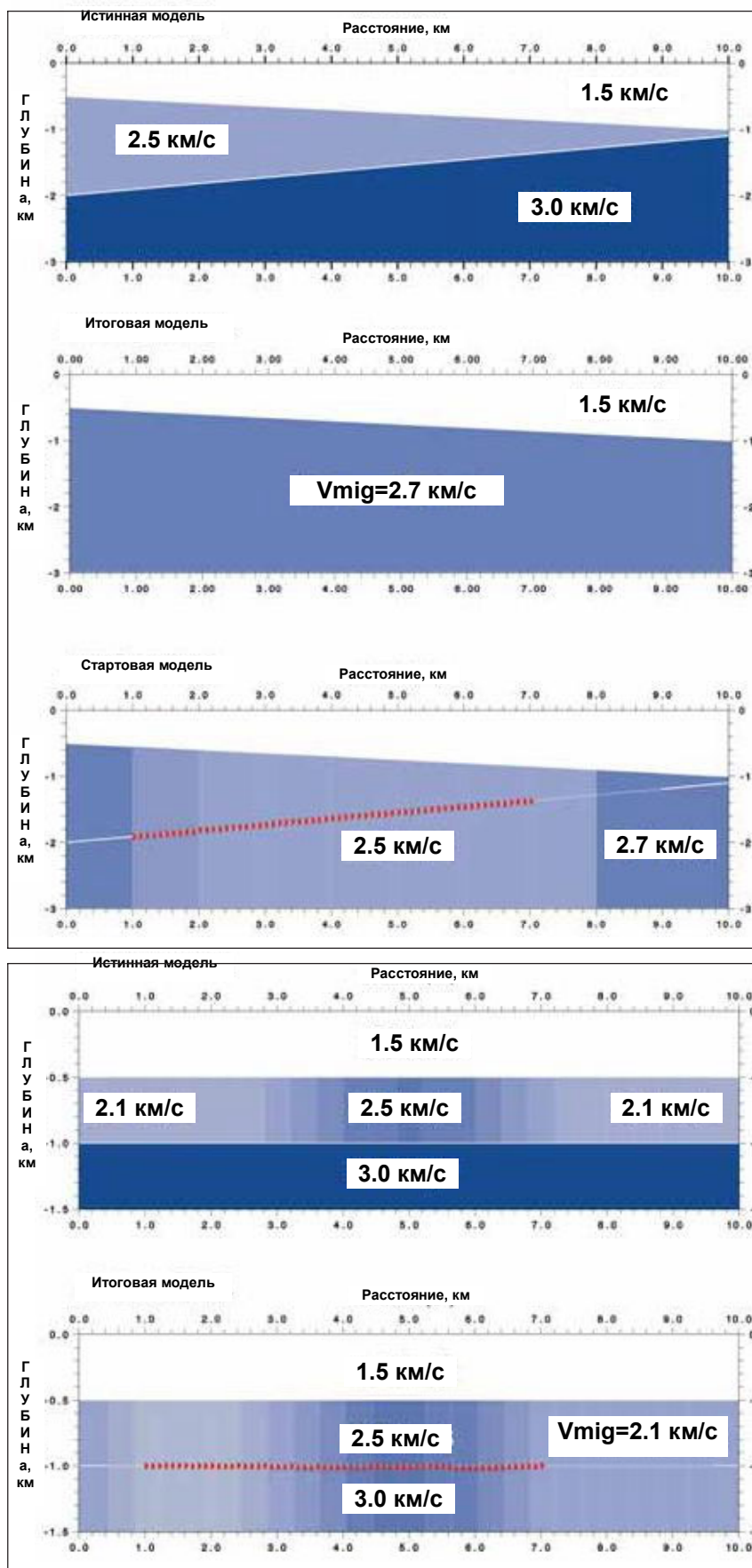


Рис. 3. Вверху: поле скоростей, использованное для расчета модельных данных. В середине: модель, использованная для миграции. Внизу: глубины и скорости по результатам инверсии (красный пунктир) в сопоставлении с истинной глубиной (белая линия).

Рис. 4. Вверху: поле скоростей, использованное для расчета модельных данных. Внизу: глубины и скорости второй границы по результатам алгоритма авторов (красный пунктир) в сопоставлении с истинной глубиной (белая линия)

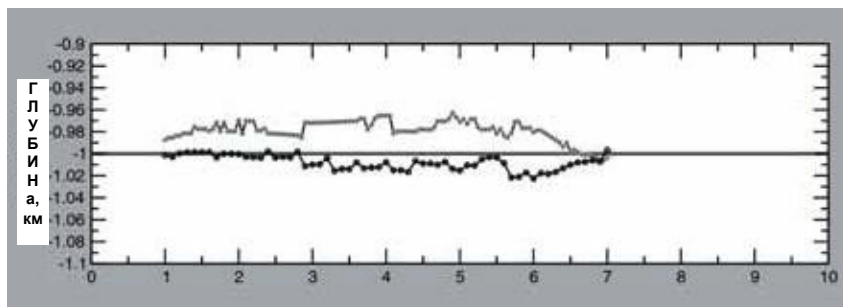


Рис. 5 Сравнение оценок глубин по алгоритму Лю (светло-серый) и по алгоритму авторов (черный).

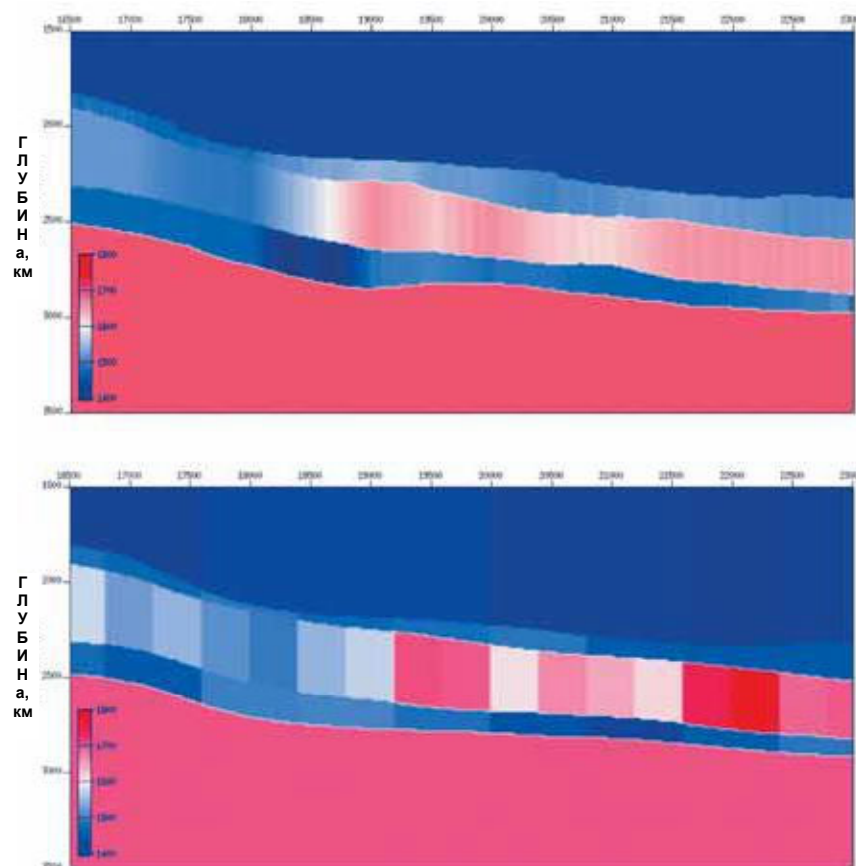


Рис. 6. Скоростные модели, построенные по алгоритму Лю (вверху) и алгоритму авторов (внизу).

авторов и по усовершенствованному алгоритму Лю. Для повышения когерентности отражений проведен анализ томограмм вдоль отражающих границ. Инверсия проведена для четырех границ: дна моря, BSR (подошва газогидратов), промежуточная граница и BGR. Стартовая модель для всех слоев – постоянная скорость 1500 м/с. На рис 6 показаны итоговые разрезы скоростей по обоим методам. В верхней модели (по алгоритму Лю) выше BSR имеется зона аномально высоких скоростей, связанная с присутствием газогидратов, а выше BGR – зона аномально низких скоростей, связанная с присутствием газа. Для четырех границ модели миграция проводилась, соответственно, два, три, шесть и четыре раза. В модели, полученной по алгоритму авторов (рис. 6, внизу), элементы изображения видны в каждом слое, как и требуется при томографической инверсии. Заметим, что в зоне газогидратов число элементов максимально, чтобы

увеличить детальность ее представления. Для получения результата потребовалось четыре миграции, а не 15, как в алгоритме Лю. На рис. 7 сравниваются результаты последних миграций с полученными скоростными моделями. Заметим, что на сейсмическом разрезе, полученном с помощью томографического анализа, энергия сфокусирована лучше, особенно на участках со сложной геометрией (на склоне).



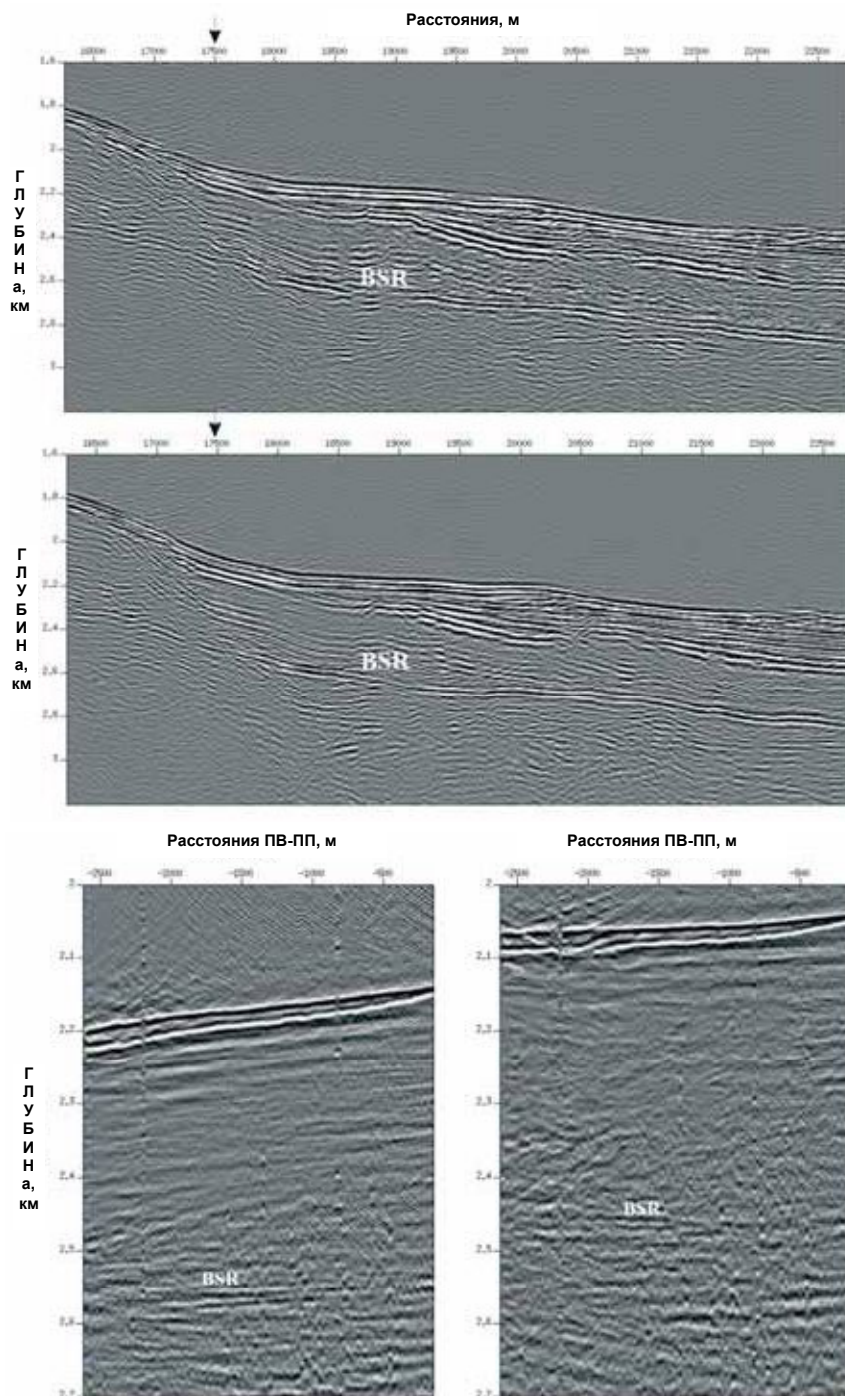


Рис. 7. Результаты миграции с использованием моделей полученных по анализу когерентности (вверху) и томографического анализа (внизу) полевых записей. Стрелкой показано положение записи рис. 8. Обозначен слой BSR.

Рис. 8. Сравнение записей, полученных при миграции с постоянной скоростью 1500 м/с (слева), по полю скоростей, полученному по алгоритму Лю (в середине) и по алгоритму авторов (справа). Обозначен слой BSR.

Чтобы подчеркнуть улучшение мигрированного разреза, полученного по алгоритму авторов, приведена также томограмма на ОГТ 17500 (вблизи склона- показана стрелкой на рис. 7), полученные с тремя различными полями скоростей: постоянная скорость 1500 м/с (Рис. 8, слева), поле скоростей, полученное по алгоритму Лю (Рис. 8, в середине), поле скоростей, полученное по алгоритму авторов (Рис. 8, справа). Можно сделать вывод, что на последней томограмме энергия лучше сфокусирована, а границы вполне горизонтальны

### Выводы

Предложенный метод улучшает стандартный анализ полевых разрезов с точки зрения определения поля скоростей путем итерационного применения миграции в сочетании со снятием слоев. Выделяется два главных преимущества этого метода. Во-первых, миграция проводится один раз для каждой границы, что резко снижает вычислительные затраты. Во-вторых, повышается разрешение итогового поля скоростей за счет допущения изменения скорости для каждого полевого разреза. Процедура дает удовлетворительный результат как на модельных, так и на полевых данных,

что убеждает в широкой применимости этого метода для улучшения качества сейсмического изображения и повышения точности поля скоростей при одновременном снижении вычислительных затрат и времени выполнения работы.

### Литература

- Bohm, G., Rossi, G., and Vesnaver, A. [1999] Minimum time ray-tracing for 3-D irregular grids. *J. of Seism. Expl.* **8**, 117-131.
- Cohen, J. K. and Stockwell, Jr. J. W. [2001] *CWP/SU: seismic Unix Reales 35: a free package for seismic research and processing*. Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines.
- Kosloff, D., Sherwood, J., Koren, Z., Machet, E., and Falkovitz, Y. [1996] Velocity and interface depth determination by tomography and depth migrated gathers. *Geophysics*, **61**, 1511-1523.
- Lafond, C. F. and Levander, A.R. [1993] Migration moveout analysis and depth focusing. *Geophysics*, **58**, 91-100.
- Liu, Z. [1995] *Migration velocity analysis*. PhD thesis, Colorado School of Mines, CWP 168.
- Stewart, R. [1993] *Exploration Seismic Tomography: Fundamentals*. Course Note Series, Vol 3, Ed. S. N. Domenico. Society of Exploration Geophysicists.
- Tinivella, U. and Accaino, F. [2000] Compressional velocity structure and Poisson's ratio in marine sediments with gas hydrate and free gas by inversion of reflected and refracted seismic data (South Shetland Islands, Antarctica). *Marine Geology*, 164, 13-27.
- Yilmaz O. [2001] *Seismic data analysis: processing, inversion and interpretation of seismic data*. SEG Series: Investigation in Geophysics 10, Tulsa, OK.