

Статические поправки данных вибросейс, полученных на песчаных дюнах в западной Ливии

Static corrections for Vibroseis data over sand dunes in western Libya

Абдурразак М.А.Ушах и Н.Р.Галти¹⁾
(Abdurrazag M.A. Ushah^{1,2} and N.R. Goulty¹)

Обзор

Участки Мурзугского бассейна в западной Ливии покрыты линейно-расположенными песчаными дюнами, достигающими высоты порядка 100 м выше уровня зандровой равнины. Песчаные дюны являются причиной значительного увеличения времени пробега отраженных волн на данных сейсмозаписи. Традиционным методом расчета полевых статических поправок было проведение интерполяции значений скорости в приповерхностном слое между данными вертикального времени. Обычно на профилях, которые пересекают дюны, результаты удовлетворительны, поскольку отраженные волны содержат ложные структуры, которые коррелируются с топографией песчаных дюн. Эти структурные артефакты вызваны остаточными статическими погрешностями, которые слишком велики для проведения коррекции в программах автоматической статики при обработке. Альтернативным методом расчета полевой статики является пикировка первых вступлений на полевых записях вибросейс, расчет времени задержки на каждом пикете, использование времени задержки напрямую как полевых статических поправок после применения линейной регулировки для подгонки их к данным вертикального времени. Эта простая версия на основе метода преломленных волн не требует построения глубинно-скоростных моделей для приповерхностной зоны, и дает гораздо лучшие результаты, чем традиционный метод полевой статики.

Многие из скоплений углеводородов в палеозойских осадках Мурзугского бассейна содержатся в структурах, связанных с обратными сбросами на больших углах. Эти сбросы осложняют использование метода расчета полевой статики по данным МПВ из-за того, что глубины границ, на которых образуются головные волны в первых вступлениях, резко меняются на сбросах. Проблема должна решаться путем применения другой процедуры интерполяции поперек сбросов. Такая процедура была применена к тестовому профилю, расположенному между дюнами и пересекающему сброс. Результаты весьма удовлетворительны, но не существенно лучше результатов использования традиционных методов расчета полевой статики. Однако, в ситуации, когда сейсмический профиль пересекает разлом, расположенный под песчаной дюной, рекомендуется использование полевой статики на основе метода преломленных волн (МПВ) с применением модифицированной процедуры интерполяции поперек разлома.

Введение

Целью этой статьи является проведение сравнения различных методов расчета полевых статических поправок на примере профилей вибросейс 2D, пересекающих песчаные дюны. Изучаемый участок расположен в пределах концессии NC151, в северо-западной части Мурзугского бассейна в западной Ливии (Рис. 1). Свыше 60 разведочных скважин было пробурено в бассейне, результатом бурения стало открытие

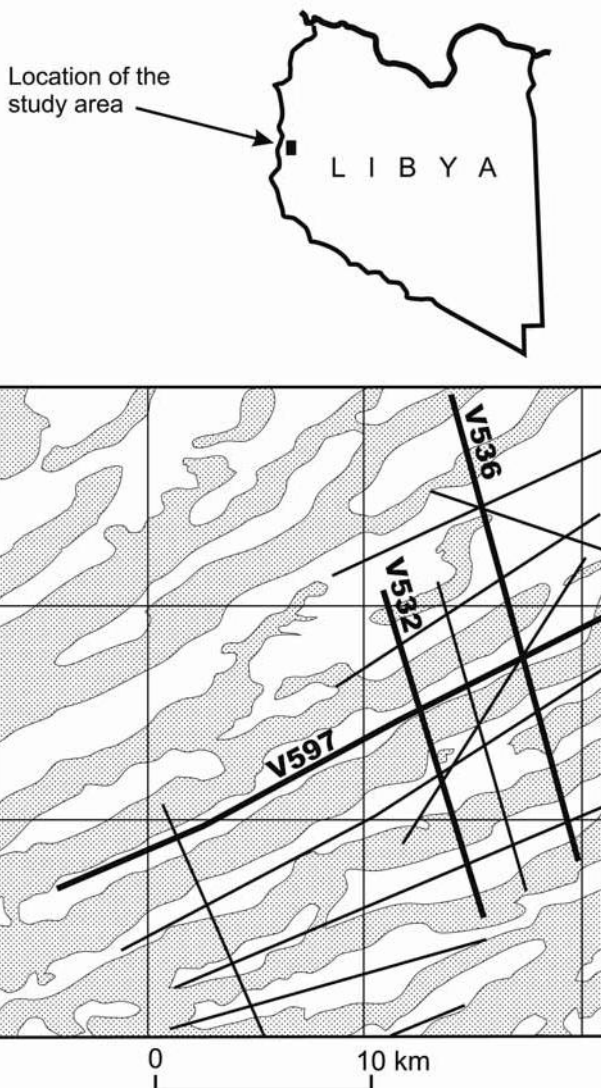


Рисунок 1. Карта района работ в концессии NC-151, Мурзугского бассейна, на которой показаны песчаные дюны (пунктиром) и сейсмические профили.

по меньшей мере 15 углеводородных залежей, расположенных в пределах палеозойских песчаников-коллекторов. Большая часть нефти добывается из песчаников-коллекторов Мемуниат позднеордовикского возраста, которые питаются из глинистых сланцев Танеззуфт раннесилурского возраста (Echikh and Sola, 2000). С 1960 года на участке работ ведутся сейсмические исследования. Карта на рисунке 1 показывает

¹Отделение наук о Земле, Университет Дурхэма, South Road, Durham DH1 3LE, UK.

²Настоящий адрес: Petroleum Research Centre, Exploration Department, PO Box 6431, Tripoli, Libya.

взаиморасположение некоторых сейсмических профилей, полученных при выполнении самой свежей съемки, используя метод вибросейс в 2000.

Область работ является одной из самых трудных участков западной Ливии для расчета точной статики из-за сложной топографии дюн. Песчаные дюны обычно имеют высоту порядка 100 м, длину 1-2 км и находятся на расстоянии около 3 км одна от другой. Они являются причиной возникновения практических трудностей при получении данных МОВ из-за крутизны угла естественного откоса торцевой части дюн. По крайней мере, приблизительно песчаные дюны можно считать грубо линейными, поэтому между ними вдоль зандровой равнины было проложено как можно больше профилей (Рис. 1). Однако, для того, чтобы привязать эти профили к сетке, некоторые профили должны быть проложены поперек дюн. Трудности расчета статических поправок вызваны не только топографией дюн, но также фактом, что песок в дюнах сухой и ему свойственна крайне низкая скорость. Низкие значения скоростей распространения сейсмических волн ведут к большим временным задержкам вступления отраженных волн.

Традиционный метод, который использовался ранее для расчета статических поправок над песчаными дюнами, на этом участке не обеспечивает удовлетворительных результатов. Три сейсмических профиля общей длиной 51 км (профили V532, V536 и V597 на Рис. 1) были полностью переобработаны в Дурхеме с использованием ProMAX, сначала с помощью традиционного метода полевой статики и затем с использованием прямого метода МПВ для вычисления статической поправки. Метод на основе МВП дал лучшие результаты.

История статических поправок

Обзор статических поправок был представлен Марсденом (Marsden, 1993a, b, c), а всесторонний обзор дается в учебнике Кокса (Cox, 1999).

Статические поправки – это временные сдвиги, применяемые к сейсмическим трассам для коррекции времен прихода отражений и их приведения ко времени, которое бы наблюдалось, если бы все источники и приемники были расположены на горизонтальной плоскости (или любой другой гладкой поверхности, выбранной в качестве линии приведения) без зоны выветривания или зоны малых скоростей. Когда статические поправки введены неправильно, появляются ошибки в структурах, уменьшается разрешение и появляется невязка разрезов в точках пересечения профилей.

Статическая аномалия, у которой пространственная длина волн больше, чем длина расстановки, называется 'низкочастотная статика', тогда как статическая аномалия, пространственная длина волн которой короче чем длина расстановки, называется 'высокочастотная компонента статики'. Если известна топография в точках расположения источника и приемника вдоль сейсмического профиля и скорости распространения волн и мощности приповерхностных слоев, можно получить полное решение для статических поправок. Оценка этого решения называется расчетом 'полевой статики'. Статические поправки могут быть также рассчитаны с помощью различных методов при проведении обработки данных. Эти компьютерные методы называются расчетом 'автоматической' или 'остаточной статики'. Они предназначены для оценки ошибок, которые остаются после введения полевых статических поправок, и рассчитываются скорее статистическими, чем детерминистскими методами.

Танер и др. (Taner *et al.* 1974) ввел обобщенную методику расчета поверхностно-согласованной остаточной статики. Относительные временные сдвиги между отраженными волнами на отдельных сейсмограммах, после ввода кинематической поправки находят путем взаимной корреляции. Эти сдвиги выражаются в виде остаточных поправок для каждого положения ПВ и ПП, остаточной кинематической поправки, и остаточного структурного члена для каждой общей средней точки (ОСТ), и формируют набор одновременных линейных уравнений. Набор уравнений решают для остаточных статических поправок источника и приемника, используя критерий наименьших квадратов. Существуют несколько вариаций этого общего метода расчета поверхностно-согласованной остаточной статики. Вслед за применением поверхностно-согласованной остаточной статики при обработке, для оптимизации разреза ОСТ часто используют расчет статики на основе корреляции между соседними трассами. Поскольку временные сдвиги для статических поправок на основе корреляции не согласованы с поверхностью, максимально допустимые временные сдвиги обычно ограничиваются несколькими миллисекундами.

Оценка полевых статических поправок

Микросейсмокаротаж (МСК)

При проведении сейсмических исследований в Мурзугском бассейне, данные МСК были получены с интервалом порядка 4 км вдоль каждого сейсмического профиля. Данные МСК помогают получать точные оценки статических поправок, необходимых в каждой точке проведения МСК. Они используются как опорные точки для оценки статических поправок за ПП и ПВ на всех пикетах вдоль профиля.

Результаты одного МСК, полученные в скважине, пробуренной на борту песчаной дюны, показаны в качестве примера на Рис. 2. В рапорте буровика отмечены пески до глубины порядка 69 м, и залегающие под ними осадочные породы. Превышение поверхности 537 м, превышение сейсмической линии приведения 500 м, забой скважины 454 м. Статическая поправка – это разность между двумя вертикальными временами пробега до (или от) забоя, из которых

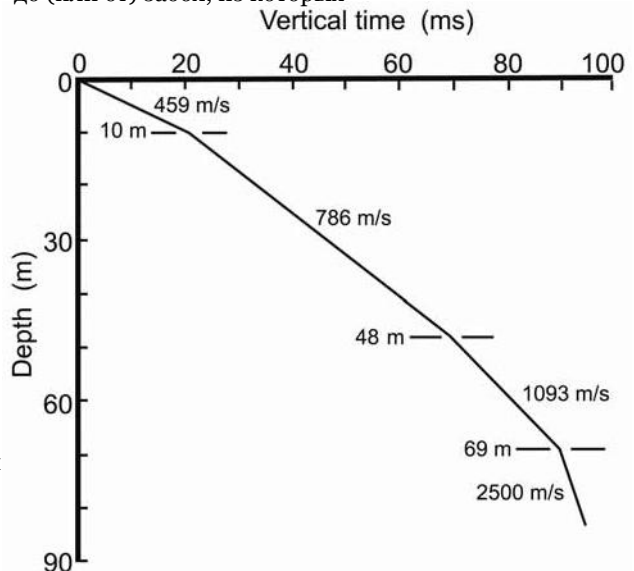


Рисунок 2. Интерпретация данных микросейсмокаротажа (МСК) для станции 1356 на сейсмическом профиле V532.

одно гипотетическое, а другое получено из наблюдений. Гипотетическое время пробега – от линии приведения до забоя в предположении о постоянной ‘скорости смещения’, которая выбирается как интервальная скорость, наблюдаемая по данным МСК для самого глубокого интервала (2500 м с^{-1} в нашем случае). Вертикальное время пробега от поверхности грунта до забоя скважины – 94.4 мс (Рис. 2). Статическая поправка в мс, таким образом, будет равна,

$$\left(\frac{500 - 454}{2500} \right) \times 1000 - 94.4 = -76.0 \text{ мс.}$$

Традиционный метод расчета полевой статистики, который ранее применялся к данным вибросейс в Мурзугском бассейне и метод статических поправок на основе МПВ, изложенные в работе, отличаются способом интерполяции статических поправок между скважинами.

Традиционный метод оценки полевых статических поправок

Для сейсмических профилей, расположенных между песчаными дюнами, скоростную модель для расчета полевой статистики можно получить путем интерполяции мощностей слоев и интервальных скоростей между скважинами в которых получены данные МСК. Интервальные скорости для всех слоев и мощности слоев 1 и 3 можно получить путем линейной интерполяции между скважинами. Мощность, Z_N , слоя на промежуточном пикете N между скважинами на пикетах А и В интерполируется как:

$$Z_N = \frac{Z_A(B-N) + Z_B(N-A)}{(B-A)} + 0.75 \left[H_N - \frac{H_A(B-N) + H_B(N-A)}{(B-A)} \right], \quad (1)$$

где Z_A – мощность слоя 2 на пикете А, и H_A – превышение поверхности на пикете А, и т.д. Имеется два члена Z_N в уравнении (1). Первый член – это линейная интерполяция мощности слоя 2 между А и В. Это единственный член Z_N для случая линейного измерения превышения поверхности от А к В. На практике, превышение поверхности отличается от прямой линии между точками А и В. Отклонение на пикете N умножается на коэффициент мощности 0.75 для получения второго члена Z_N . Значение 0.75

Таблица 1. Значение мощности слоев и интервальных скоростей в скважинах, точках пересечения профилей и контрольных точках вдоль части сейсмического профиля V532.

	Пикет №	Превыш. (м)	Мощн. Слой 1 (м)	Мощн. Слой 2 (м)	Мощность Слой 3 (м)	Скорость Слой 1 (м/с)	Скорость Слой 2 (м/с)	Скорость Слой 3 (м/с)	Скорость Слой 4 (м/с)
Пересечение	1105	496.7	4.0	4.0	6.0	571	832	1591	2932
Контр. точка	1146	484.8	4.0	4.0	7.5	571	832	1591	2932
Скважина	1161	517.9	16.0	20.0	8.0	546	745	1818	2609
Контр. точка	1238	481.7	6.0	2.3	2.9	625	1002	2162	2717
Пересечение	1281	471.2	6.0	2.3	0.1	625	1002	2162	2717
Контр. точка	1304	468.4	6.0	2.3	6.5	625	1002	2162	2717
Скважина	1356	536.7	10.0	38.0	21.0	459	786	1093	2500
Контр. точка	1397	481.2	4.0	4.0	15.5	354	952	1818	2703
Пересечение	1408	475.4	4.0	4.0	14.0	354	952	1818	2703

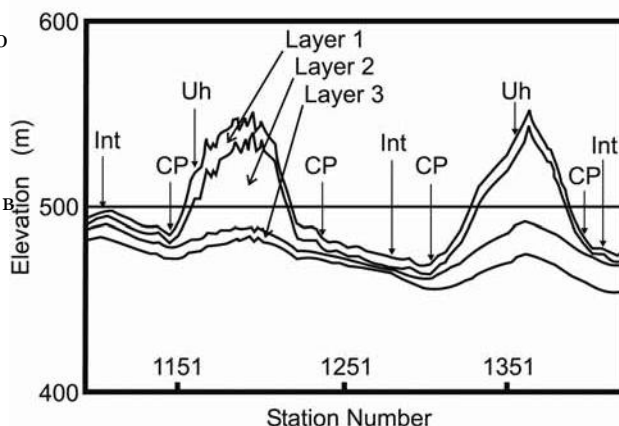


Рисунок 3. Мощность приповерхностного слоя вдоль части сейсмического профиля V532, интерполированная между пересечениями профилей и контрольными точками и между контрольными точками и скважинами, для расчета полевой статистики традиционным методом.

коэффициента мощности – субъективный выбор, который был сделан предыдущими исследователями, на основе тестов. При проведении переобработки в Дурхеме также тестировались другие значения (Ushah, 2004), они не дали никаких значительных улучшений.

Для сейсмических профилей, пересекающихся над песчаными дюнами, некоторые скважины располагались на бортах дюн, дополнительная информация была получена на пересечении с профилями, расположенными между песчаными дюнами. Здесь в качестве примера мы используем часть сейсмического профиля V532 (Рис. 3). Для интерполяции приповерхностной скоростной модели между пересечениями профилей и скважиной на близлежащей песчаной дюне, в качестве контрольной точки выбрана станция, расположенная на задровой равнине вблизи основания песчаной дюны. В контрольной точке, мощность слоев 1 и 2 и интервальные скорости всех четырех слоев предполагаются одинаковыми, как и в точке пересечения (Таблица 1). Мощность слоя 3 в контрольной точке получают путем линейной интерполяции между пересечением профиля и скважиной.

Далее, скоростную модель приповерхностного слоя между контрольной точкой и скважиной на песчаной дюне интерполируют с помощью метода, используемого между скважинами на сейсмическом профиле между песчаными дюнами, как было описано выше.

МПВ для оценки полевой статистики

Метод «плюс-минус», разработанный Хагедорном (Hagedoorn, 1959) был одним из самых популярных методов интерпретации МПВ. Он разработал метод «плюс-минус» для оценки скорости в коренных породах и глубины под каждой станцией ПП на обращенном профиле МПВ. Метод требует, чтобы первые вступления были пропикированы очень точно, пикирование первых вступлений на данных вибросейс обычно не простая процедура, которая требует большого количества времени и является трудной задачей.

Предположим, что А и С - ПВ, времена прихода преломленной волны, измерены в точках В и С из точки А и в В с точки С, как показано на Рис. 4. Время T_+ , и время T_- , в точке В определяются

$$T_+ = t_{ADEB} + t_{CGFB} - t_{ADGC} \quad (2)$$

, и

$$T_- = t_{ADEB} - t_{CGFB} \quad (3)$$

Времена пробега справа в этих уравнениях – это времена прихода головной волны для трех лучей, показанных на Рис. 4. Время с плюсом - это удвоенное время задержки в В, которое приблизительно равно вертикальному времени пробега от преломляющей границы до поверхности земли при большом контрасте скоростей сейсмических волн между преломляющим горизонтом и покрывающей толщей. Время с минусом также должно рассчитываться для проверки того, были ли получены времена вступления головных волн от одной и той же преломляющей границы, используемой для получения времен с плюсом. Для небольших углов падения, графики времени с минусом как функции удаления имеют градиент, равный удвоенному значению обратной скорости в преломляющем горизонте. Поэтому изменения в преломляющем горизонте обычно проявляются в виде изменений градиента графика времени с минусом. Для сейсмических профилей, рассмотренных в этой работе, скорость преломляющего горизонта в каменноугольных осадочных коренных породах, определенная по графику времени с минусом, была порядка 3800 м с⁻¹.

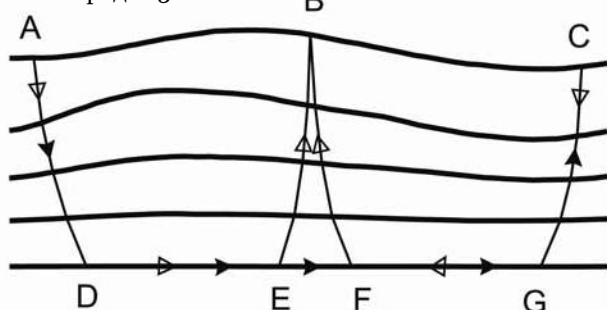
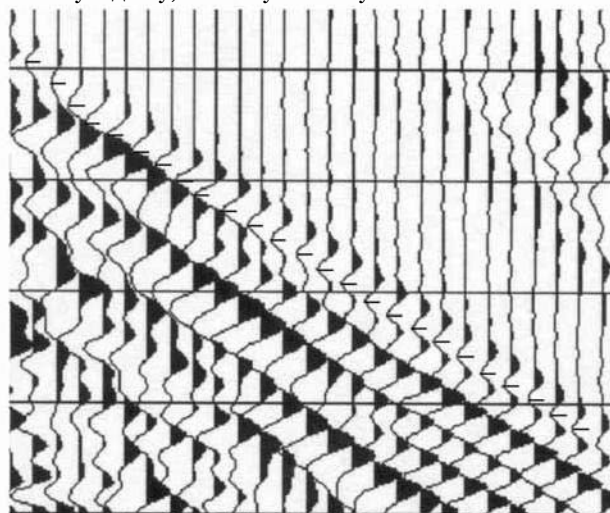
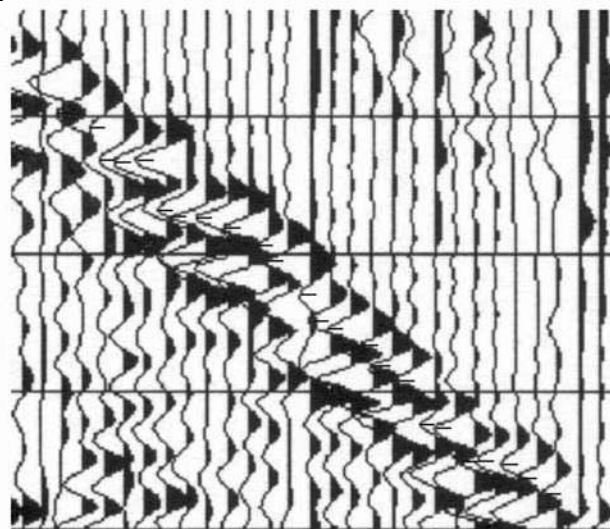


Рисунок 4. Схема траектории лучей первых вступлений головной волны, используемая для расчета статистики по методу МПВ с использованием метода плюс-минус Хагедорна.

Поскольку данные МПВ, используемые в этом проекте, были получены с использованием вибросейс, и импульс источника в данных вибросейс должен быть нуль-фазовый (и поэтому симметричный), после выполнения взаимной корреляции исходных трасс с свип сигналом, первые вступления нельзя видеть напрямую (Сох, 1999). На Рис. 5 даны два примера. В первом (Рис. 5а), станции приема и источника все расположены на зандровой равнине между песчаными дюнами, поэтому минимумы можно видеть и пикировать достаточно просто (впадины имеют тенденцию к выравниванию по прямой линии). На втором примере (Рис. 5b), расстановка пересекает песчаную дюну, поэтому минимумы



(а)



(б)

Рисунок 5. Примеры первых вступлений с полевой коррелированной записи вибросейс (а) источник и приемник расположены на зандровой равнине между песчаными дюнами, и (б) приемники пересекают песчаную дюну. Пикированные первые вступления показаны горизонтальными метками.

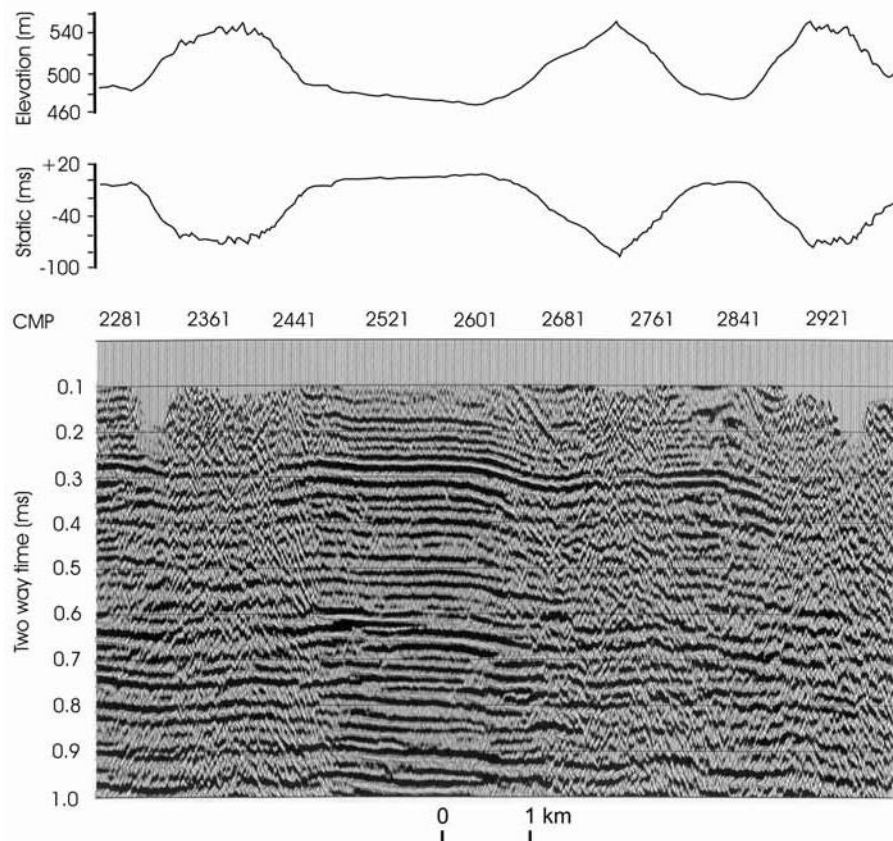


Рисунок 6. Суммарный разрез для части сейсмического профиля V532 после применения традиционной полевой статики.

смещаются вверх и вниз. При расстановке приемников на песчаных дюнах, минимумы пикировать не легко, а в некоторых случаях для оценки их позиций может быть необходима интерполяция. Первые вступления были пропикированы вручную на трех профилях, используемых в данной работе. Если бы первые вступления пикировались автоматически, могла бы потребоваться очень точная ручная проверка пикировок.

Все сейсмические профили в NC151 были записаны на 120-канальной симметричной расстановке с пропуском 6-станций и номинальным интервалом группирования 25-м, это давало вынос ближних трасс порядка 87.5 м. Для пикирования первых вступлений (впадин), были выбраны встречные профили с максимальным удалением 650 м и наложением 325 м между профилями. На песчаных дюнах, интервал группирования уменьшался до 12-20 м и самый короткий вынос источник-приемник лежит в интервале между 200 м и 257 м. Таким образом, скорости в приповерхностном слое не измерялись. Невозможно получить скоростную модель в приповерхностном слое без измерения скоростей в приповерхностных слоях, поэтому времена с плюсом были интегрированы со скважинными данными. Время задержки, $T_+/2$, аппроксимирует вертикальное время пробега в одном направлении через приповерхностные слои в каждой точке приема, а его значение в точке каждой скважины было отрегулировано с помощью расчетной статической поправки, рассчитанной для точки скважины. Корректировки были интерполированы линейно между скважинами и добавлены к значению $T_+/2$ в каждой точке приема для получения полевой статики за ПП. Поскольку ПВ были расположены между ПП, полевые статические поправки за ПВ были получены с использованием полевых статических поправок за ПП путем интерполяции.

© 2004 EAGE

При применении расчетных статических поправок к сейсмическим данным МОВ, обычно предполагают, что траектории лучей в приповерхностном слое вертикальны. Временная разность (погрешности) между временем пробега в одном направлении по вертикали и временем задержки в скважинах была рассчитана в предположении о том, что нижний интервал, выбранный в каждой скважине, простирался до преломляющей границы. Например, ошибка в скважине 1356 равна 7 мс, тогда как в скважине 1531 ошибка равна 10 мс. Ошибки достаточно небольшие и одного знака, поэтому они могут быть устранены путем корректировки значений $T_+/2$ относительно скважинных данных.

Необходимо, чтобы все пропикированные первые вступления были головными волнами от одной и той же преломляющей границы и чтобы эта граница между скважинами была приблизительно плоской. Очевидно, что эти требования не выполняются поперек крупных разломов. На сейсмическом профиле V597 имеется разлом с вертикальным смещением порядка 100 мс двойного времени пробега, который расположен между песчаными дюнами, поэтому необходимо применить альтернативный метод для расчета полевых статических поправок поперек разлома, который описан ниже.

Работа с сейсмическим профилем, пересекающим песчаные дюны

Суммарный разрез части сейсмического профиля V532, пересекающего три песчаные дюны с применением полевых статических поправок на основе традиционного метода показан на Рис. 6. Обработка включала $f-k$ фильтрацию сейсмограммы ОПВ, предсказывающую деконволюцию до суммирования, ввод кинематических поправок в сейсмограммы ОСТ, и суммирование. Под песчаными

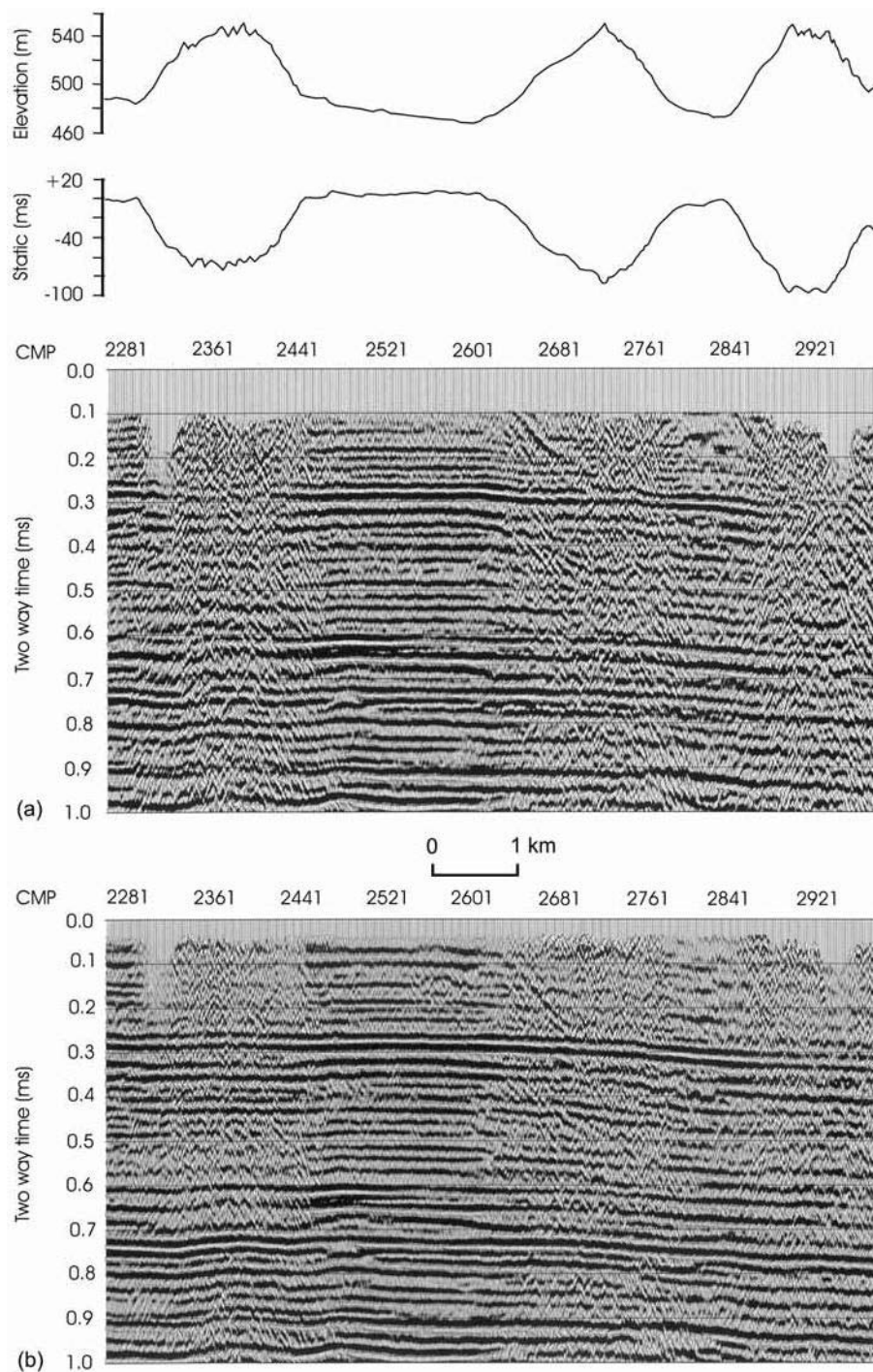


Рисунок 7. Суммарный разрез для части сейсмического профиля V532 после применения полевой статики на основе МПВ (а) с тем же графом обработки, что и для разреза на Рис. 6, и (б) с двумя итерациями автостатики по максимальной мощности и скоростным анализом, и статикой на основе корреляции для ОСТ.

дюзами видны ложные структуры, где данные также имеют низкое соотношение сигнал-шум. На двух панелях в верхней части рисунка показано превышение поверхности вдоль профиля и полевые статические поправки, рассчитанные традиционным способом.

Для непосредственного сравнения, та же часть сейсмического профиля V532 суммирована с применением полевых статических поправок на основе МПВ на Рис. 7а. Абсолютно тот же граф обработки был использован, исключая другой способ ввода полевой статики. Ложные структуры под песчаными дюнами были практически убраны, хотя отношение сигнал-шум под песчаными дюнами все еще низкое. Использование программ расчета автоматических статических поправок

значительно улучшает соотношение сигнал-шум. На суммированном разрезе на Рис. 7б были проведены две итерации автостатики по максимальной мощности (Ronen and Claerbout, 1985) и применен скоростной анализ, вслед за которым использована статика на основе корреляции для ОСТ. Единственным отличием графа обработки по сравнению с Рис. 7а было применение другого типа верхнего мьютинга. При обработке данных с традиционной полевой статикой, автоматические программы статики были не способны убрать ложные структуры на Рис. 6.

Использование полевой статики на основе МПВ помогло внести существенное улучшение

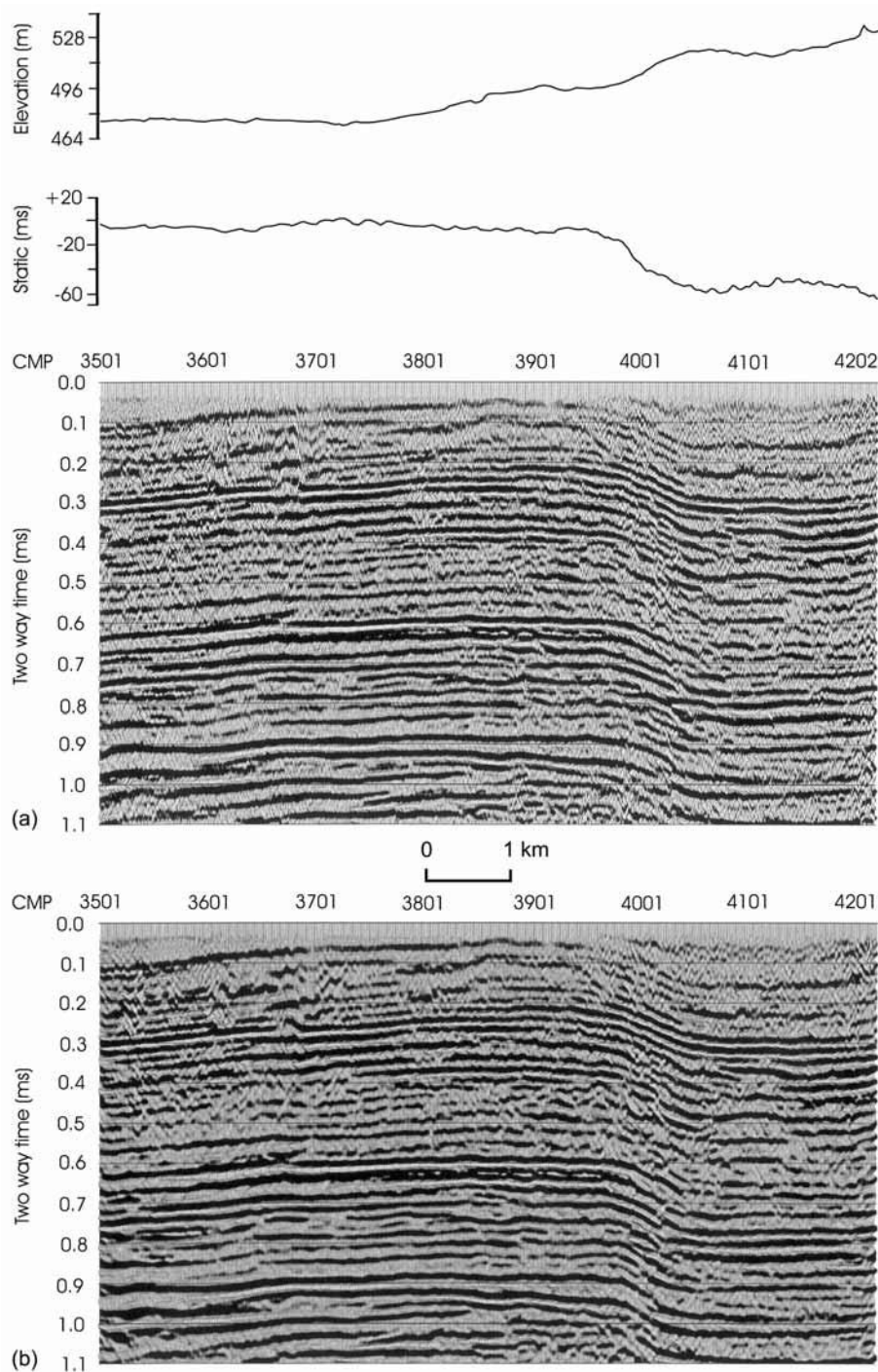


Рисунок 8. (а) Суммарный разрез восточного края сейсмического профиля V597 после применения полевой статики на основе МПВ с начала профиля до ОСТ 3922 и простого способа расчета полевых статических поправок за превышение, примененного между ОСТ 3922 и ОСТ 4242 на конце профиля. Граф обработки тот же, что и на Рис. 7б. (б) Мигрированный разрез (а) используя временную миграцию Кирхгофа после суммирования.

в обрабатываемый разрез для параллельного сейсмического профиля V536 (Ushah, 2004), который также пересекает песчаные дюны (Рис. 1).

Работа с сейсмическим профилем, пересекающим разлом

Сейсмический профиль V597 лежит между песчаными дюнами (Рис. 1) и вблизи от их восточного края пересекает большой разлом. Значения полевых статических поправок ясно указывают на то, что имеется вертикальное смещение преломляющей границы поперек разлома. На ОСТ 4242 на восточной оконечности профиля и на ОСТ 3922 к западу от

разлома имеется скважина. Поэтому в этом случае было решено использовать полевую статику на основе МПВ до ОСТ 3922, и проинтерполировать полевые статические поправки между ОСТ 3922 и 4242 пропорционально изменению рельефа поверхности. Получившийся суммарный разрез показан на Рис. 8а.

Мигрированный разрез (Рис. 8б) оказывает, что на разломе нет резкого прекращения прослеживания осей синфазности, соответствующих отражающим горизонтам. Фактически, разлом является резкой вертикальной моноклиной в ордовикско-каменноугольных осадках, картируемых нами

со смещением порядка 100 мс вниз на восток. На многих из открытых месторождений и изучаемых объектах, идентифицированных в Мурзукском бассейне, имеются взбросы под большим углом, месторождения обычно находятся в висячем блоке или в складках над разрывами (Davidson *et al.*, 2000). Ориентация разломов в бассейне характеризуется значительной вариацией, хотя преобладающая кластеризация вокруг тренда север-юг предполагает влияние позднедокембрийских пан-Африканских элементов в подстилающем основании. Основные периоды трансгрессии и взбросовых движений в бассейне имели место в середине мелового и начале третичного периодов (Davidson *et al.*, 2000); похоже, что сжатая моноклиналь, отображенная на Рис. 8, залегает сразу над верхней линией взброса со смещением под большим углом на глубине.

Необходимо сказать, что суммарный разрез на Рис. 8a незначительно отличается от суммарного разреза с применением традиционных полевых статических поправок (не показанного здесь по причине краткости сообщения). Таким образом, наиболее эффективным способом обработки сейсмических профилей на данном участке является обработка профилей между песчаными дюнами с использованием традиционного метода введения полевой статики, и последующая обработка сейсмических профилей, пересекающих песчаные дюны с использованием статических поправок на основе МПВ. Однако на участках где сейсмический профиль пересекает песчаные дюны и разлом, поперек самого разлома необходимо использовать какую-либо другую процедуру. Мы бы порекомендовали использовать статику на основе МПВ до точки вблизи разлома независимо от скважин, расположенных с другой стороны. В первую очередь, статика на основе МПВ будет применена к этой части профиля без использования линейной интерполяции, которая эквивалентна допущению о том, что между каждой скважиной и зоной разлома нет никакого наклона преломляющей границы. Далее, если на предварительном разрезе показано, что самые неглубокие отражения погружаются с одной из сторон разрыва, статика на основе МПВ будет модифицирована соответствующим образом, используя скорость смещения, полученную по скважинным данным. Статика на основе МПВ правомерна только там, где «время с плюсом» рассчитывается с использованием времен пробега головных волн (прямого и обратного) от одной и той же преломляющей границы, поэтому вблизи разрыва будет несколько пикетов, для которых нет пригодных значений статики на основе МПВ. Для интерполяции полевых статических поправок для этих пикетов могут использоваться некоторые типы статических поправок за превышение.

Обсуждение и выводы

Робинсон и Аль Хусейни (Robinson and Al-Husseini, 1982) недавно обратились к вопросу проведения сейсморазведки МОВ на участках с песчаными дюнами и описали методы, которые они приняли для получения и обработки данных. Из данные были получены в районе Руб аль Хали, Саудовская Аравия, там дюны также достигают в ширину около 1 км и в высоту порядка 100 м, но формируют связанную сеть с отдельными заплатками солончаков, окруженных дюнами. В качестве сейсмического источника был использован динамит, который применялся в группе, размер групп источников и приемной расстановки над дюнами был меньше. После применения полевой статики и до проведения обработки,

они комбинировали трассы для моделирования стандартных расстановок источников и приемников, используемых на плоских участках с солончаками между дюнами.

Средняя скорость распространения сейсмических волн в пределах дюн была около 600 м с⁻¹, поэтому отраженные волны имели временную задержку порядка 150 мс на гребне дюн. Обычно трудно разместить буровые установки вблизи вершины дюн, а бурить в сухом песке затруднительно. Поэтому, Робинсон и Аль Хусейни (1982) построили кросс плот времени пробега и превышения поверхности дюн, над солончаками или основанием дюны, используя данные, полученные по нескольким дюнам в данном районе. Этот кроссплот был использован для построения начальной оценки полевой статики, которая в дальнейшем была уточнена при помощи анализа остаточной статики на основе МПВ. Преломляющий горизонт, на котором образовывались головные волны в первых вступлениях, представлял собой неглубокозалегающую формацию ангидрита, а анализ данных МПВ был основан на предположении о «локальной гладкости» этой границы под каждой дюной. Авторы также заметили, что необходимо убрать низкочастотную компоненту статики, связанную с дюнами, но не пояснили то, как они это делали.

Наилучшие методы оценки низкочастотных компонент статики основаны на скважинных данных вертикального времени вдоль сейсмических профилей (Сох, 1999). По возможности, скважины, пробуренные для работ по изучению вертикального времени, должны достигать преломляющего горизонта, на котором образуются головные волны в первых вступлениях, используемые для расчета статических поправок на основе МПВ. В концессии NC151, в западной Ливии, преломляющий горизонт находится ниже забоя скважин, а сейсмическая линия приведения находится выше самого глубокого интервала, разбуренного в каждой из скважин. Статические поправки в каждой скважине были рассчитаны для гипотетической ситуации, при которой интервальная скорость для самого глубокого горизонта, измеренная в скважине (скорость смещения), достигает уровня приведения.

Оба метода – традиционный метод расчета полевой статики, применяемый к данным вибросейс в Мурзукском бассейне и метод расчета статики на основе МПВ, который изложен в работе, основываются на скважинных данных для обеспечения точных статических поправок в точках скважин. Отличия заключаются в том, как статические поправки интерполируются между скважинами. Время задержки на каждом пикете приема предполагается достаточно близкой аппроксимацией вертикального времени пробега в одном направлении от преломляющей границы до поверхности земли в методе расчета на основе МПВ. Разность между временем задержки в МПВ в точке скважины и статическими поправками, рассчитанными напрямую по данным вертикального времени, интерполируется линейно в ПП между скважинами. Затем время задержки МПВ поправляется с учетом линейно интерполированных разностей для получения оценочных полевых поправок за ПП на каждом пикете. Полевые статические поправки в ПВ находят путем интерполяции из поправок за ПП

Применяемый здесь метод расчета статики на основе МПВ не требует задания явной скоростной модели между скважинами, или между уровнем приведения и преломляющей границей. Метод основан на предположении, что разность между временем задержки и правильной полевой статической поправкой в каждом ПП меняется линейно между скважинами.

Для случая постоянной скорости смещения в соседних скважинах, которая простирается до преломляющей границы, это предположение будет эквивалентно предположению о том, что преломляющая граница между скважинами плоская.

Результаты обработки сейсмических профилей, пересекающих песчаные дюны, говорят о том, что метод расчета полевой статики на основе МПВ дает гораздо лучшие результаты, чем традиционный метод расчета статики. Для сейсмических профилей между песчаными дюнами, результаты имеют незначительные отличия, поэтому может быть предпочтительнее использование традиционного метода ввиду меньшей трудоемкости. В тестовом наборе данных не было разломов на профилях, пересекающих песчаные дюны, был разлом на профиле между дюнами. Он был причиной проблем в использовании метода статических поправок на основе МПВ, проблемы были решены при использовании статических поправок между скважинами с каждой стороны от разлома. Похожие предосторожности необходимо предпринимать вблизи разломов при обработке сейсмических профилей, секущих песчаные дюны при использовании метода расчета полевой статики на основе МПВ.

Благодарности

Мы благодарим руководство компании Petroleum Research Center, Триполи за финансовую поддержку, которая дала возможность первому автору статьи участвовать в этом проекте в Университете Дурхема. Мы также очень признательны председателю компании Sirte Oil Company за разрешение на использование данных в этом исследовании.

Литература

Cox, M. [1999] *Static Corrections for Seismic Reflection Surveys*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.
Davidson, L., Beswetherick, S., Craig, J., Eales, M., Fisher, A., Himmali, A., Jho, J., Mejrab, B. and Smart, J. [2000]. The structure, stratigraphy and petroleum geology of the Murzuq

Basin, Southwest Libya. *Geological Exploration in Murzuq Basin* (eds M.A. Sola and D. Worsley), 295-320, Elsevier.
Echikh, K. and Sola, M.A. [2000] Geology and hydrocarbon occurrences in the Murzuq Basin, SW Libya. *Geological Exploration in Murzuq Basin* (eds M.A. Sola and D. Worsley), 175-222, Elsevier.
Hagedoorn, J.G. [1959] The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections. *Geophysical Prospecting* **7**, 158-182.
Marsden, D. [1993a] Static corrections-a review, Part I. *The Leading Edge* **12**, 43-49.
Marsden, D. [1993b] Static corrections-a review, Part II. *The Leading Edge* **12**, 115-120.
Marsden, D. [1993c] Static corrections-a review, Part III. *The Leading Edge* **12**, 210-216.
Robinson, D.K. and Al-Husseini, M.I. [1982] Technique for reflection prospecting in the Rub'Al-Khali. *Geophysics* **47**, 1135-1152.
Ronen, J. and Claerbout, J.F. [1985] Surface-consistent residual statics estimation by stack-power maximization. *Geophysics* **50**, 2759-2767.
Taner, M.T., Koehler, F. and Alhilali, K.A. [1974]. Estimation and correction of near-surface time anomalies. *Geophysics* **39**, 441-463.
Ushah, A.M.A. [2004] *Static Problems due to Sand Dunes in NC151, Western Libya*. PhD thesis, University of Durham.