

Обработка данных

Сравнение уравнений нормальных кинематических поправок (NMO) с целью их приложения к трансверсально-изотропной среде с вертикальной осью симметрии (VTI) (A comparison of NMO curves for application in VTI media)

Joel Starr (joel.starr@pgs.com), PGS Marine Geophysical, оценивает возрастающее количество вариантов поправок NMO, доступных для современного обработчика сейсмических данных.

NMO, или нормальные кинематические поправки представляют собой временной сдвиг сейсмических трасс для коррекции влияния удаления приемника от источника (выноса) и скорости в среде на сейсмограмме общей срединной точки (ОСТ). Уравнения NMO аппроксимируют временной сдвиг, который был бы вычислен путем прослеживания сейсмического луча в горизонтально слоистой Земле. Несколько лет назад уравнение NMO второго порядка, или гиперболическое уравнение NMO, считалось адекватным в большинстве случаев. Сегодня в промышленности существует множество вариантов расчета кинематических поправок, применяющих более высокий порядок уравнений NMO, который снижает погрешность в приближении к решению кинематической задачи для луча на дальних выносах. Существуют две характеристики, которые являются важными при рассмотрении области применения данной кривой NMO: 1) точность; или как хорошо кривая NMO приближает решение кинематической задачи прослеживания сейсмического луча, и 2) устойчивость; или как хорошо кривая может допустить малые погрешности в оцененной скоростной модели (не хотелось бы, чтобы малые погрешности в оцененной скоростной модели вызвали большие погрешности в вычисленном временном сдвиге).

Если обработанные данные изотропны в природе, то уравнение NMO будет зависеть от скорости, v и выноса x . Если данные демонстрируют среду VTI (трансверсально-изотропная среда с вертикальной осью симметрии), в которой скорость сейсмических

волн, распространяющихся горизонтально, отличается от скорости сейсмических волн, распространяющихся вертикально, то в дополнение к v и x в уравнении NMO используется параметр η_{eff} . Эффективное значение η_{eff} в уравнении NMO, выраженном Alkhalifah и Tsvankin (1995), требуется для учета влияния как дальнего выноса (негиперболической части годографа), так и среды VTI на сейсмические данные. Так как эти два эффекта учитываются единственным параметром, то на практике трудно определить, демонстрирует ли набор данных исключительно среду VTI, для использования эффективного параметра η_{eff} для расчета поправок NMO для сейсмограмм ОСТ. Это приводит к неоднозначности в интерпретации параметра η_{eff} , в процессе выполнения скоростного анализа и построения временного разреза. Оптимизированное уравнение NMO 6-ого порядка разделяет члены для дальнего выноса от членов для VTI. Параметр η_{eff} в этом уравнении необходим только для того чтобы, чтобы учесть влияние среды VTI, и как таковой он является истинным параметром η_{eff} . Использование этих двух уравнений сравнивалось в двух практических случаях. В первом случае, требовалось найти параметр η_{eff} , а параметр η_{int} оказался ненужным. Как таковые, данные демонстрировали изотропные свойства среды на дальних выносах. Во втором случае, потребовалось найти и η_{eff} , и η_{int} в соответствующих им уравнениях NMO; поэтому, данные во втором случае характеризуют среду VTI.

История изучения

Обработка данных

Использование параметра η_{eff} , в уравнении NMO, предложенном авторами Alkhalifah и Tsvankin (1995), для учета влияния дальних выносов и среды VTI на сейсмические данные хорошо применяется в промышленности. В данной статье я буду ссылаться на это уравнение как на 'Alkhalifah'. В случаях, где имеет место среда VTI, величина η_{eff} , требуемая, для учета влияния дальних выносов по сравнению с величиной, требуемой для учета влияния среды VTI, не может быть определена. В случаях, где данные характеризуют изотропную среду (среды VTI нет), параметр η , все равно требуется для учета влияния дальних выносов (Alkhalifah 1997). В большинстве случаев, трудно определить, демонстрирует ли набор данных исключительно среду VTI с целью использования параметра η_{eff} , для внесения поправки в сейсмограммы OCT с помощью этого уравнения. Оптимизированное уравнение NMO 6-ого порядка было первоначально предложено Sun и др. (2002) и может быть использовано для расчета кинематических поправок с целью учета дальних выносов в случае изотропной среды или для учета влияния среды VTI, путем добавления члена VTI в уравнение (Sun и Martinez, 2002). Поскольку в данном случае влияние дальнего выноса и влияние среды VTI учитываются отдельными членами, то параметр η_{eff} , необходимый для этого учета относится только к среде VTI и представляет собой параметр η_{int} .

Теория

Время двойного пробега сейсмического луча через горизонтально-слоистую землю может быть аппроксимировано рядом Тейлора (Taner и Koehler, 1969) как показано в уравнении (1).

$$T_x^2 = c_0 + c_2 x^2 + c_4 x^4 + c_6 x^6 + \dots$$

$$c_0 = a_0^2$$

$$c_2 = \frac{a_2}{a_0}$$

$$c_4 = \frac{a_4 - a_2 a_2}{4a_0^3}$$

$$c_6 = \frac{2a_6 a_0^2 - a_4 a_2 a_2 - a_2^3}{8a_0^5}$$

$$a_2 = 2 \sum_{i=1}^N \frac{d_i}{v_i}$$

$$a_4 = 2 \sum_{i=1}^N v_i d_i$$

$$a_6 = 2 \sum_{i=1}^N v_i^3 d_i$$

$$a_8 = 2 \sum_{i=1}^N v_i^5 d_i$$
(1)

где x – вынос, а c_k – коэффициенты разложения в ряд Тейлора.

Если мы ограничим разложение членом 2-ого порядка, то мы можем получить знакомое гиперболическое уравнение для поправок NMO, уравнение (2), где x – вынос, t_x – время двойного пробега волны для выноса x , t_0 – время пробега волны для нулевого выноса, и v_{nmo} – скорость NMO.

$$t_x = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{v_{\text{nmo}}^2}}$$
(2)

Ограничивая уравнение (1) членом в 4-ого порядка и решая его относительно коэффициентов можно получить уравнение NMO четвертого порядка для изотропной среды, также известное как уравнение NMO для дальних выносов или LNMO.

$$t_x = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{v_{\text{nmo}}^2} + c_4 x^4}$$
(3)

Обработка данных

Можно сказать, что уравнения NMO более высокого порядка, например уравнение (3), учитывают эффекты дальнего выноса или 'изгиб луча'. Другими словами эти уравнения являются более точной аппроксимацией замкнутой формы уравнения (1).

Этот факт приводит к тенденции добавления новых членов ряда Тейлора, для увеличения точности расчетов. В то время как дополнительные члены действительно увеличивают точность уравнения, они также приводят к потере устойчивости уравнения. Малые погрешности при оценке v и x могут вызвать большие погрешности в расчете t_x . Это происходит потому, что возведение выноса x в большие степени дает очень большие числа.

Для учета как погрешностей дальнего выноса, связанные с усечением ряда Тейлора (негиперболическое уравнение NMO) и погрешностей, вызванных влиянием среды VTI, авторы Alkhalifah и Tsvankin (1995) используют вариант уравнения NMO с членами ряда Тейлора до 4-ого порядка, описанного выше, показанный здесь как уравнение (4).

$$t = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{v^2} \left(1 + \frac{CC}{2} \frac{v^2}{v^2 + 2v_{\text{eff}}^2} \right)} \quad (4)$$

Наличие x в знаменателе члена 4-ого

порядка добавляет устойчивость к уравнению. В уравнении (4), η_{eff} , учитывает погрешности усечения ряда Тейлора (эффекты дальнего выноса) и погрешности связанные со средой VTI. Если бы величины η_{eff} , были бы равны нулю, то уравнение (4) стало бы уравнением (2) как описано в Alkhalifah и Tsvankin (1995). Следовательно, для учета эффектов дальнего выноса независимо от наличия среды VTI необходимо выбирать ненулевые η_{eff} . Для устранения этой неоднозначности и повышения точности аналитического уравнения NMO, авторы Sun и Martinez (2002) предложили оптимизированное уравнение 6-ого порядка с членом, учитывающим VTI, показанное как уравнение (5).

$$t = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{v^2} \left(1 + \frac{CC}{2} \frac{v^2}{v^2 + 2v_{\text{eff}}^2} \right)} \quad (5)$$

где

$$v_{\text{eff}} = \frac{C_{100} v^2}{2v^2 + v_{\text{eff}}^2} \quad \text{и} \quad C_{100} = \frac{2v_{\text{eff}}^2}{v^2 [v_{\text{eff}}^2 + (1 + 2v_{\text{eff}}^2)v^2]}$$

Уравнение (5) представляет собой первоначальный ряд Тейлора, ограниченный членами до 6-ого порядка, где c_k — коэффициенты ряда, а CC — константа, предназначенная для оценки замкнутости формы ряда. Как и уравнение NMO Alkhalifah, полученное оптимизированное уравнение NMO шестого порядка содержит вынос x , в

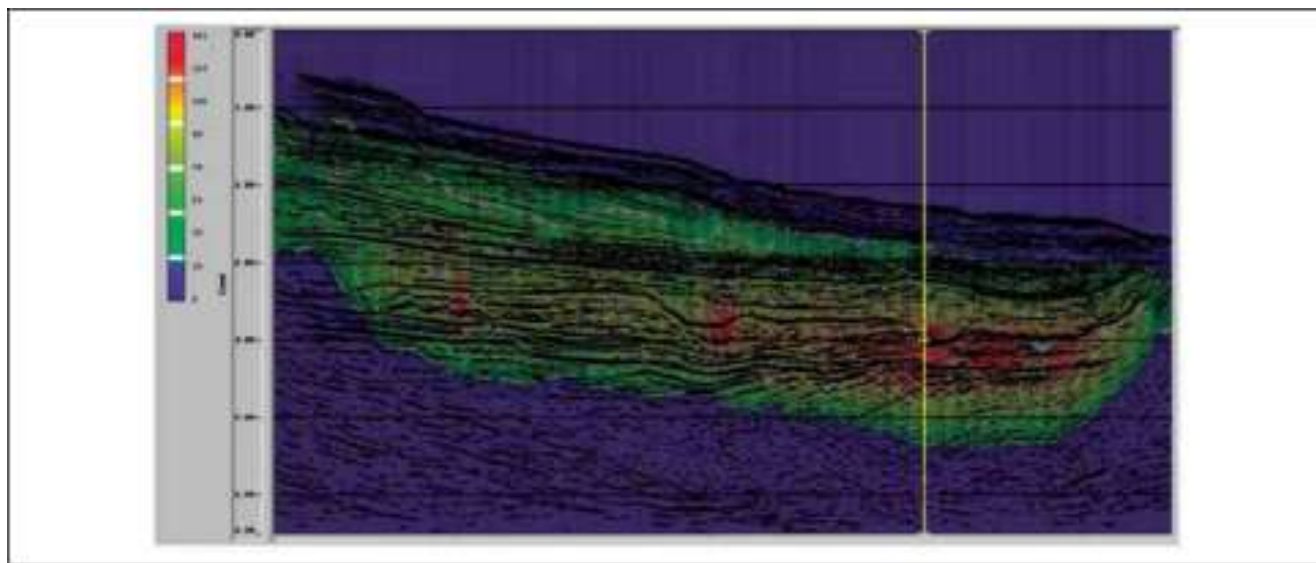


Рис. 1. Поле η_{eff} , наложенное на суммированный разрез временной миграции до суммирования с сохранением истинных амплитуд (TAPSTM) по данным с шельфа Бразилии. Значения η_{eff} лежат в диапазоне 0-0.141. Поле значений η_{eff} было получено с помощью анализа остаточных скоростей миграции, с использованием уравнения NMO Alkhalifah.

Обработка данных

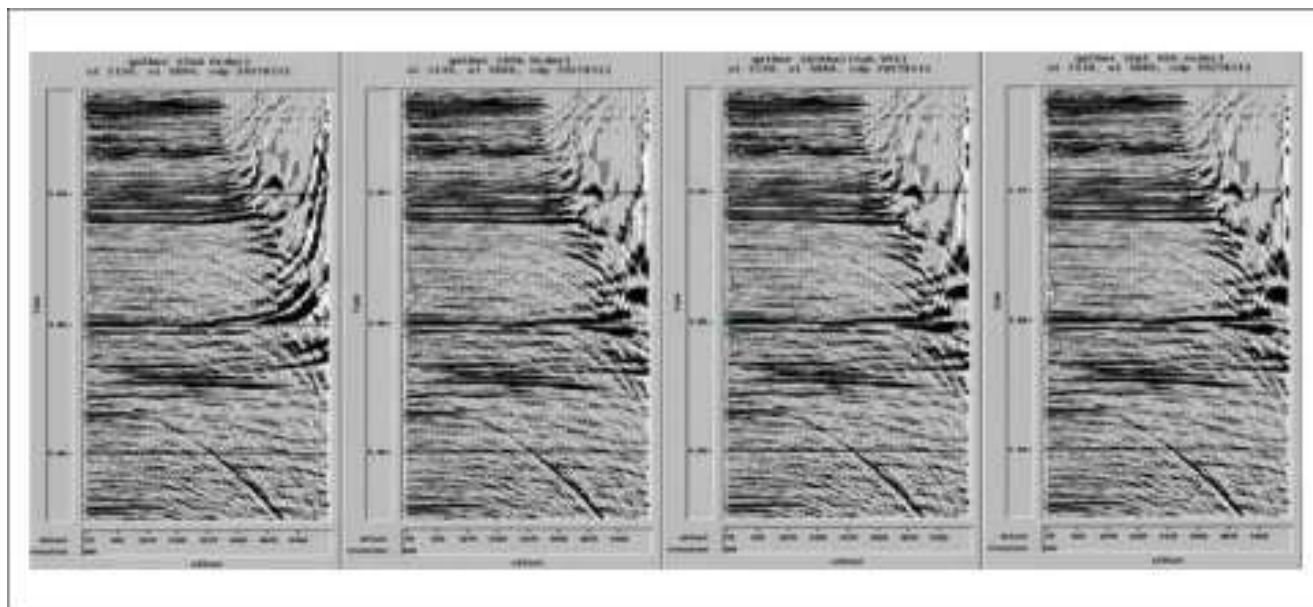


Рис. 2. Сейсмограммы временной миграции до суммирования с сохранением истинных амплитуд (TAPSTM) без мьютинга по данным с шельфа Бразилии. В данные были внесены кинематические поправки по следующим уравнениям NMO: уравнение 2-ого порядка, уравнение 4-ого порядка, уравнение Alkhalifah с параметром $7j$, и оптимизированное уравнение NMO 6-ого порядка для изотропной среды, соответственно.

знаменателе членов высшего порядка для обеспечения его устойчивости. Член VTI заключен в объект $\Delta tVTI$. Если мы задаем η_{eff} в уравнении (5) равное нулю, то $\Delta tVTI$ становится равным нулю, и данное уравнение превращается в оптимизированное уравнение NMO 6-ого порядка для изотропной среды, полученное Sun и др. (2002). Следовательно, величина η_{eff} в уравнении (5) представляет

собой истинную величину η_{eff} , а не эффективное значение η_{eff} как в уравнении (4).

Примеры

Первый практический пример получен по данным шельфа Бразилии, полученным в бассейне Santos. В этом случае была сделана временная миграция до суммирования с сохранением истинных амплитуд (TAPSTM),

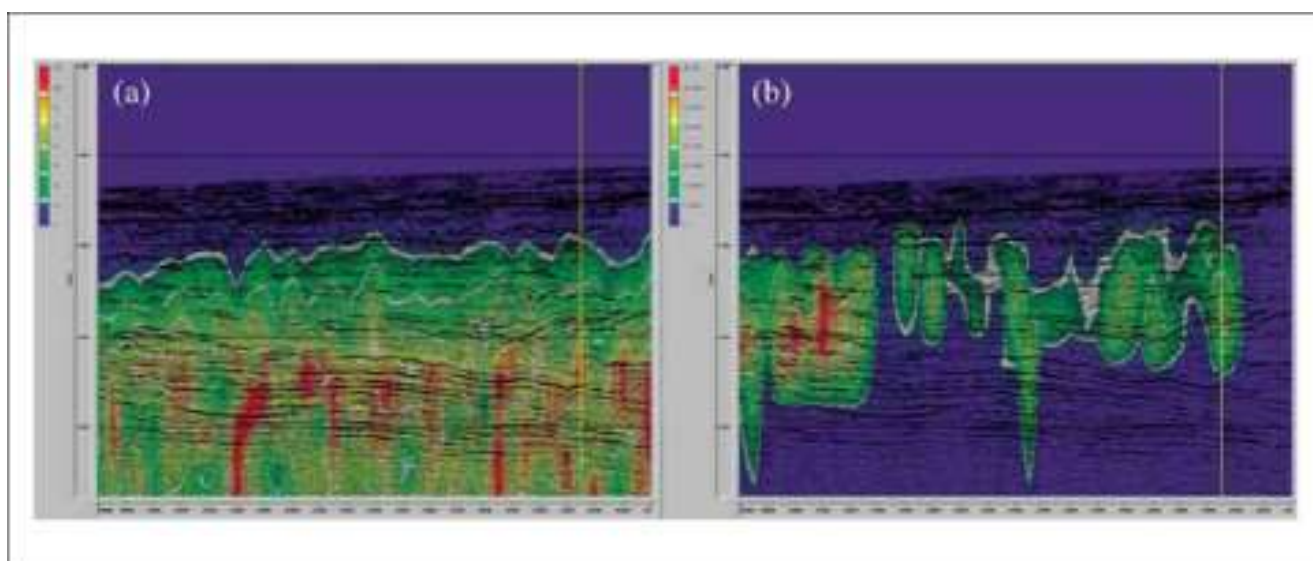


Рис. 3. (а) Поле значений η_{eff} , наложенное на участок суммированного разреза TAPSTM по данным с шельфа Западной Африки. Диапазон значений η 0 - 0.125. Поле η_{eff} было получено в результате анализа остаточных скоростей миграции по уравнению NMO Alkhalifah. (б) Поле значений η_{int} , наложенное на участок суммированного разреза TAPSTM по данным с шельфа Западной Африки. Диапазон значений η_{int} 0 - 0.035. Поле η получено в результате анализа остаточных скоростей миграции по оптимизированному уравнению NMO 6-ого порядка.

Обработка данных

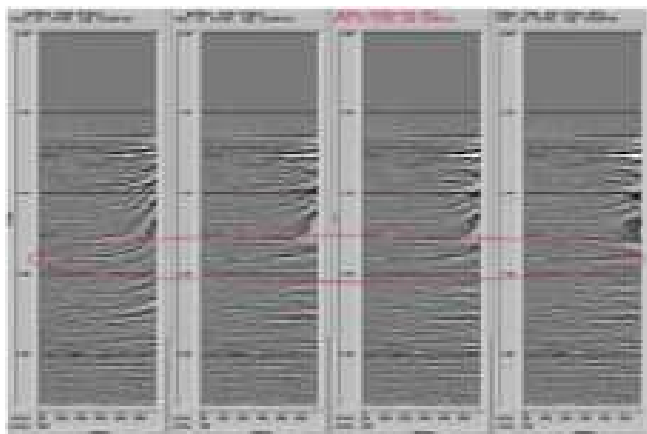


Рис. 4. Результат внесения кинематических поправок в одну сейсмограмму TAPSTM по следующим уравнениям NMO: уравнение 2-ого порядка, уравнение 4-ого порядка, уравнение Alkhalifah с параметром η_{eff} и оптимизированное уравнение NMO 6-ого порядка для изотропной среды с параметром η_{int} , соответственно. В области, выделенной красным овалом видно преимущество использования оптимизированной поправки NMO 6-ого порядка для изотропной среды с параметром η_{int} .

используя оптимизированное уравнение времени пробега 6-ого порядка для изотропной среды, описанное авторами Sun и Martinez (2002). Поправки NMO 6-ого порядка были внесены в данные, и был выполнен анализ остаточных скоростей, с помощью используя уравнения (4), и отдельный анализ остаточных скоростей был выполнен для тех же самых данных, используя уравнение (5). На рис. 1 показан результат суммирования сейсмограмм TAPSTM, полученных с помощью анализа скоростей с использованием уравнения Alkhalifah (уравнение 4). На изображение разреза наложено поле значений η_{eff} , полученное в процессе анализа. Величина 77 лежит в диапазоне 0-0.145 со средним значением 0.065. Анализ остаточных скоростей с использованием оптимизированного уравнения NMO 6-ого порядка привел к нулевому полю η_{int} . Это говорит о том, что данные получены в изотропной среде. Сравнение различных уравнений для кинематических поправок NMO для одной сейсмограммы TAPSTM представлено на рис. 2. В этом случае в сейсмограмму сначала внесли кинематические поправки по уравнению NMO 6-ого порядка (уравнение NMO Alkhalifah с нулевым параметром η_{eff}); при этом классические

«хоккейные клюшки», замеченные на дальних выносах могли бы интерпретироваться как эффекты среды VTI. Следующая сейсмограмма на рис. 2 является результатом внесения кинематических поправок в исходную сейсмограмму по уравнению NMO 4-ого порядка для изотропной среды. При этом, данные были исправлены и «хоккейные клюшки» больше не видны. 3-ая и 4-ая сейсмограммы есть результат внесения кинематических поправок в исходную сейсмограмму по уравнению Alkhalifah с использованием выбранного поля η_{eff} и по оптимизированному уравнению NMO 6-ого порядка с нулевым параметром η_{int} соответственно. Уравнение NMO 4-ого порядка, уравнение Alkhalifah и оптимизированное уравнение NMO 6-ого порядка дали похожие результаты, что является ещё одним доказательством, что данные были получены в изотропной среде.

Второй практический случай получен по данным с шельфа Западной Африки. Как в предыдущем примере, данные мигрировались с помощью процедуры TAPSTM, и затем первоначальная скоростная функция была удалена с помощью обратной процедуры NMO. Анализ скоростей был выполнен на единственном профиле общих глубинных точек (ОГТ) с помощью уравнения Alkhalifah и оптимизированного уравнения NMO шестого порядка с членом VTI. Результаты этого анализа показаны на рис. 3. На рис. 3 (а) показан суммированный сейсмический разрез по профилю с наложенным на него выбранным полем η_{eff} , которое было получено по уравнению NMO Alkhalifah. Среднее значение η_{eff} по результатам данного анализа равно 0.057. На рис. 3 (b) показан тот же сейсмический разрез с наложенным на него выбранным полем η_{eff} , которое было получено по оптимизированному уравнению NMO 6-ого порядка. Среднее значение η_{eff} по результатам этого анализа равно 0.012. Значения η_{eff} в примере Западной Африки характеризуются большей величиной и более широким диапазоном, чем значение η_{int} для тех же самых данных.

На рис. 4 показан результат сравнения уравнения NMO 2-ого порядка, уравнения

Обработка данных

NMO 4-ого порядка, уравнения NMO Alkhalifah и оптимизированного уравнения NMO 6-ого порядка для одной сейсмограммы TAPSTM из примера Западной Африки. Уравнения NMO 2-ого и 4-ого порядка не корректно исправляет сейсмограммы. Уравнение Alkhalifah исправляет сейсмограммы в большей степени и оптимизированное уравнение 6-ого NMO порядка улучшает сейсмограммы ещё немного больше. Пример этого улучшения выделен красным овалом на рис. 4. Преимущество оптимизированного уравнения NMO 6-ого порядка над уравнением Alkhalifah связано с большей точностью расчета членов для дальних выносов в случае оптимизированного уравнения NMO 6-ого порядка.

Выводы

Эффективное значение η в уравнении NMO Alkhalifah используется для учета как дальних выносов, вследствие усечения ряда Тейлора, так и влияния среды VTI. Это приводит к неоднозначности в интерпретации η , в процессе анализа скоростей и построения временного сейсмического разреза. Оптимизированное уравнение NMO шестого порядка разделяет члены дальних выносов от членов VTI. Это позволяет выполнять анализ истинных значений η в областях со средой VTI и обычный анализ скоростей для изотропной среды в тех областях, где видны только эффекты дальних выносов. Поля значений η_{int} , полученные в результате применения оптимизированного анализа скоростей NMO 6-ого порядка демонстрируют меньшие значения с более плотными распределениями, чем значения η_{eff} , полученные в результате применения анализа скоростей NMO Alkhalifah. Это происходит вследствие разделения эффектов NMO для дальних выносов и эффектов среды VTI в оптимизированном уравнении 6-ого порядка.

Ссылки на литературу

Alkhalifah, T. and Tsvankin, I. [1995] Velocity analysis for transversely isotropic media. *Geophysics*, b, 1550-1566.

Alkhalifah, T. [1997] Velocity analysis using nonhyperbolic moveout in transversely isotropic media. *Geophysics*, 62, 1839-1854.

Sun, C. and Martinez, R. [2002] Amplitude preserving 3D pre-stack Kirchhoff time migration for V(z) and VTI media. *Society of Exploration Geophysicists, Extended Abstract*, 1224-1227.

Sun, C., Wang, H., and Martinez, R. [2002] Optimized 6th order NMO correction for long-offset seismic data. *Society of Exploration Geophysicists, Extended Abstract*, 2312-2316.

Taner M. T. and Koehler F. [1969] Velocity spectra-digital computer derivation and application of velocity functions. *Geophysics*, 34, 859-881.

Благодарности

Автор хотел бы поблагодарить компании Total и Petrobras за возможность проведения описанного анализа, и Gary Patton, Alan Ryder, и Chris Thomas за их вклад в исследования.