

## Новый подход к общей площадке отражения и глубинному картированию: месторождение Tembungo, Sabah, Малайзия

### New approach to common reflection surface and depth imaging: Tembungo Field, Sabah, Malaysia

Ahmad Riza Ghazali\*

#### Введение

Область месторождения Tembungo расположена порядка 100 км от берега на акватории Sabah, в восточной Малайзии (Рисунок 1). Геологически, она представляет собой смятую антиклинальную структуру с интенсивным разломообразованием. Целью разведки является глубинный турбидитный комплекс в миоценовой системе конуса выноса присклонового бассейна. Поле скоростей покрывающих пород сильно осложнено присутствием приповерхностных рифовых карбонатов, выходами газа и сложными разломами. Эти осложнения приводят к сильному рассеянию энергии, низкому соотношению сигнал-шум (S/N) и высокому уровню кратных, что ведет к значительному ухудшению качества сейсмического изображения на месторождении и на всей области. Обработка, включая использование глубинной миграции до суммирования (PreSDM) с целью извлечения адекватного для этих условий сигнала, было преисполнено трудностей.

Коммерческая значимость месторождения Tembungo было основной целью поиска путей решения проблем улучшения изображения. Новый подход, который мы придумали и приняли оказался успешным. Подход заключается в обработке данных используя технологию Общей Поверхности Отражения (CRS), за которой идет глубинная миграция после суммирования (PostSDM) для которой скоростная модель была получена в процедуре глубинной миграции до суммирования (PreSDM). Термин 'про-скорость' будет использоваться в настоящей работе специально для обозначения параметра, полученного в результате сейсмической обработки в качестве 'скорости' потому что это параметр моделирования, который может существенно отличаться от истинной скорости распространения волн в среде (Al-Chalabi, 1994).

В отличие от традиционного PreSDM, целью которого является улучшение изображения толщ, наша процедура исключительно использовалась в целях получения оптимальной модели про-скорости PostSDM. Возможно, это наиболее значимая 'инновация' настоящей работы. Она движима тем, что CRS в большей степени восприимчива к процедурам после суммирования, чем до суммирования. На Рисунке 2 показан общий поток обработки.

CRS уже доказала свою эффективность в увеличении соотношения S/N. Методика CRS была введена Mtiler (1998) в качестве потокового метода симулирования нулевых удалений. В последствии Hubral (1999) отточил методику и разработал стратегию макро моделирования, на основе принципа независимого изображения. Методика использует более крупные поверхности суммирования, чем это требуется для одного положения OCT как при традиционном суммировании. Этот подход улучшает

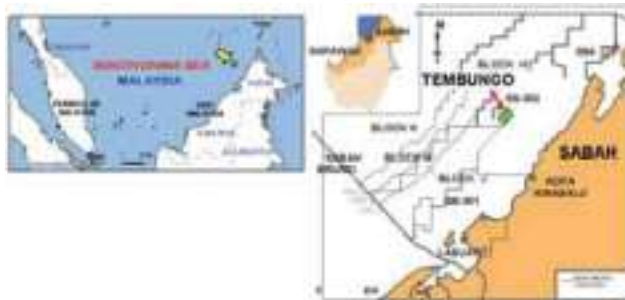


Рисунок 1 Участок месторождения Tembungo, на акватории Sabah, Малайзия.

значения угла выхода и приближение кривизны волнового фронта, и использует информацию о сейсмическом поле волн и времени распространения волн. Расчет параметров основан на оценке времени распространения второго порядка, в котором рассматривается глобальный многомерный максимум функции когерентности.

Мы использовали процедуру, полученную в работе Jager (1999) для оценки времени пробега суммарного разреза CRS и Jager et al. (2001), где ведется оптимизация эффективного оператора CRS (Уравнение 1). Поиск этого оператора не требует модель входной скорости за исключением скорости у поверхности,  $V_0$ , которая преобразует временные падения в пространственные. Приближение времен пробега CRS,  $t_0$ , определяется временем пробега при нормальном падении,  $t_0$ , центральной OCT как по офсету (половине),  $h$ , так и по расстоянию между бинами OCT,  $\Delta x$ , углом выхода луча,  $\alpha$ , кривизной волнового фронта точки нормального падения,  $R_{NP}$ , и излучающими отражателями,  $R_N$ ,

$$t^2 = \left( t_0 + \frac{2 \sin \alpha}{v_0} \Delta x \right)^2 + \frac{2 t_0 \cos^2 \alpha}{v_0} \left( \frac{\Delta x^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{NP}} \right) \quad (1)$$

#### Новый интегральный подход

Данные, используемые в этом проекте, получены во время морской сейсмической съемки 3D с двумя источниками и одной косой. Навигация и углы отклонения косы от курса проверялись с целью минимизации азимутальных вариаций. Предварительная обработка осуществлялась с использованием стандартного графа, такого как бинирование по OCT и Радон. Затем данные юбли выведены в виде сейсмограмм 3D OCT. Затем эти сейсмограммы были поданы на вход двух отдельных процедур: (1) построение модели про-скорости 3D PreSDM (2) обработка CRS. Как уже упоминалось, метод CRS был выбран в комбинации с глубинным картированием, благодаря эффективности CRS при повышении уровня сигнал-шум.

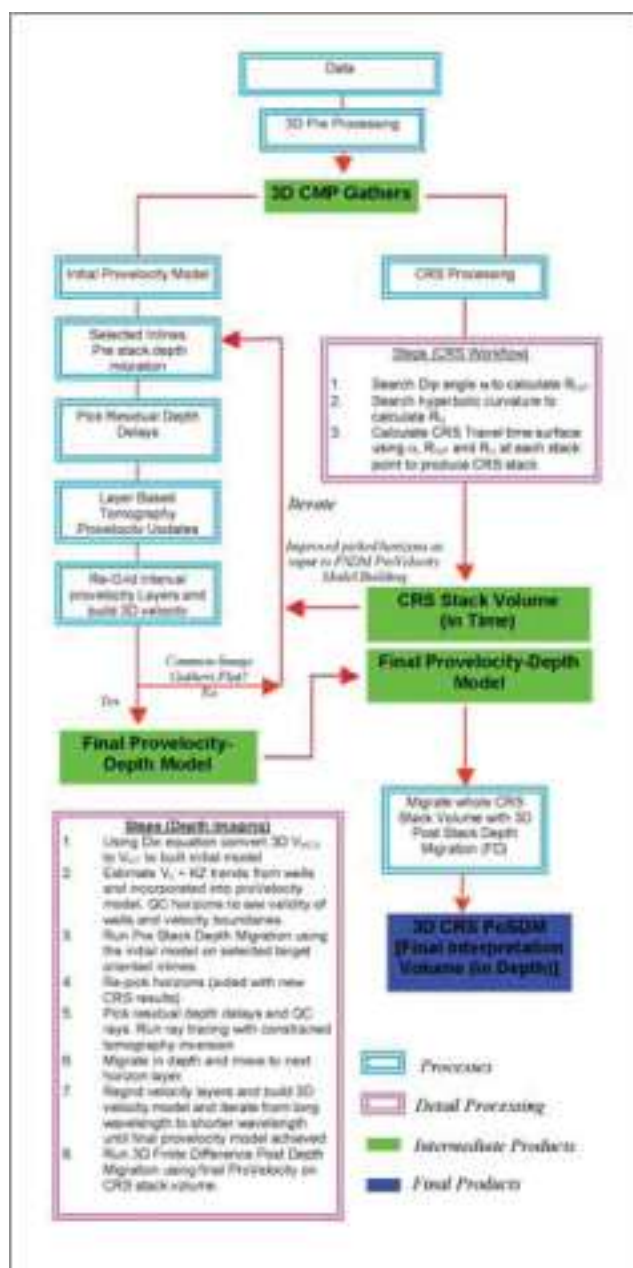


Рисунок 2 Поток обработки CRS PostSDM, используемый в проекте.

Комбинация CRS и глубинного построения изображений помогло улучшить изображение и скорректировать латеральные ошибки определения местоположения.

### Обработка метода общей поверхности отражений

Обработка CRS включала последовательный поиск трех параметров CRS  $\alpha$ ,  $R_{NIP}$  и  $R_N$ . Процесс начался с поиска угла падения,  $\alpha$ , в режиме одной сейсмограммы OCT. При задании  $\Delta x = 0$ , уравнение суммирования CRS (1) преобразовалось к уравнению NMO, где про-скорость суммирования NMO (сейсмограмма максимальной когерентности),  $V_{mes}$ , задается как функция угла  $\alpha$ , и кривизны  $R_{NIP}$ . Таким образом, поиск параметра далее сократился до автоматического поиска про-скорости. Оценочные кривые суммирования верны только для одной OCT, и не распространяются на соседние OCT, (т.к.  $\Delta x = 0$ ). Для ускорения процедуры CRS, поле про-скоростей  $V_{mes}$  использовалось в качестве

управляющей функции.

Поиск второго параметра CRS, ( $R_{NIP}$ ), выполнялся в сейсмограммах OCT. Она строилась с использованием поля про-скоростей  $V_{mes}$  (полученного на предыдущем этапе) в качестве руководящей. Сейсмограмма OCT представляет собой аппроксимацию разреза нулевых удалений и путем приравнивания офсета нулю ( $h = 0$ ), уравнение суммирования CRS (1) приводится к зависимости от смещения  $\Delta x$  в области OCT, с линейными и квадратичными членами. Локальный угол падения оценивался при максимуме когерентности, при измерении меры когерентности для заданного диапазона падений, таким образом, находят  $R_{NIP}$ .

Поиск третьего параметра CRS ( $R_N$ ) также выполняется в режиме сейсмограмм OCT. Снова были выбраны нулевые удаления ( $h=0$ ), что приводит к соответствующему сокращению членов уравнения (1). Однако, в отличие от  $R_{NIP}$  и его поиска, в этом поиске теперь использовалась полная зависимость от смещения  $\Delta x$  в области OCT, т.е. зависимость как от линейных так и квадратичных членов. Это определило криволинейное гиперболическое вступление на данных нулевых удалений, при этом падение известно из предыдущего этапа. Локальную кривизну и связанный с ней параметр  $R_N$  нельзя оценить при максимуме когерентности, при измерении когерентности для диапазона значений  $R_N$ .

В результате трех этапов поиска, мы получили локальную оценку набора параметров ( $\alpha$ ,  $R_{NIP}$ ,  $R_N$ ) для каждой точки ( $X$ ,  $T$ ) по сейсмограмме нулевых удалений, что дало нам возможность построения локально оптимизированного разреза CRS.

### Построение модели про-скоростей посредством методики глубинного картирования

Глубинные построения имеют очевидные преимущества над построениями во временной области в плане возможности достижения более эффективного латерального позиционирования волн, по сравнению с временными построениями, которые страдают от эффектов 'воображаемых лучей'. Однако, успех картирования в глубинной области (глубинная миграция после и до суммирования) зависит от эффективности используемой модели про-скоростей.

На этапе PreSDM, построение модели про-скоростей в большей степени зависило от томографии слоев, которая является частью итеративного цикла (Рисунок 2). Низкое соотношение сигнал/помеха в обрасти работ представляла собой большую проблему как для PreSDM так и для томографии из-за трудности определения границ между слоями в этих условиях. CRS вносит значительный вклад в преодоление этой проблемы: CRS обладает более крупной поверхностью суммирования, что дает возможность осуществлять лучшую временную интерпретацию в процессе построения модели.

Исходная модель про-скорости строилась на основе оценки интервальной скорости, полученной по данным про-скорости  $V_{mes}$  на основе решения уравнения Дикса (1955). Вслед за этим было выполнено вертикальное и латеральное сглаживание в целях стабилизации полученного поля про-скоростей. Вдобавок, ввиду необходимости определения правильного взаимоположения опорных (проинтерпретированных) горизонтов и основных разрывов скоростей и про-скоростей, были использованы скважинные данные (Рисунок 3) для контроля качества этого соответствия и внесения необходимых корректировок.

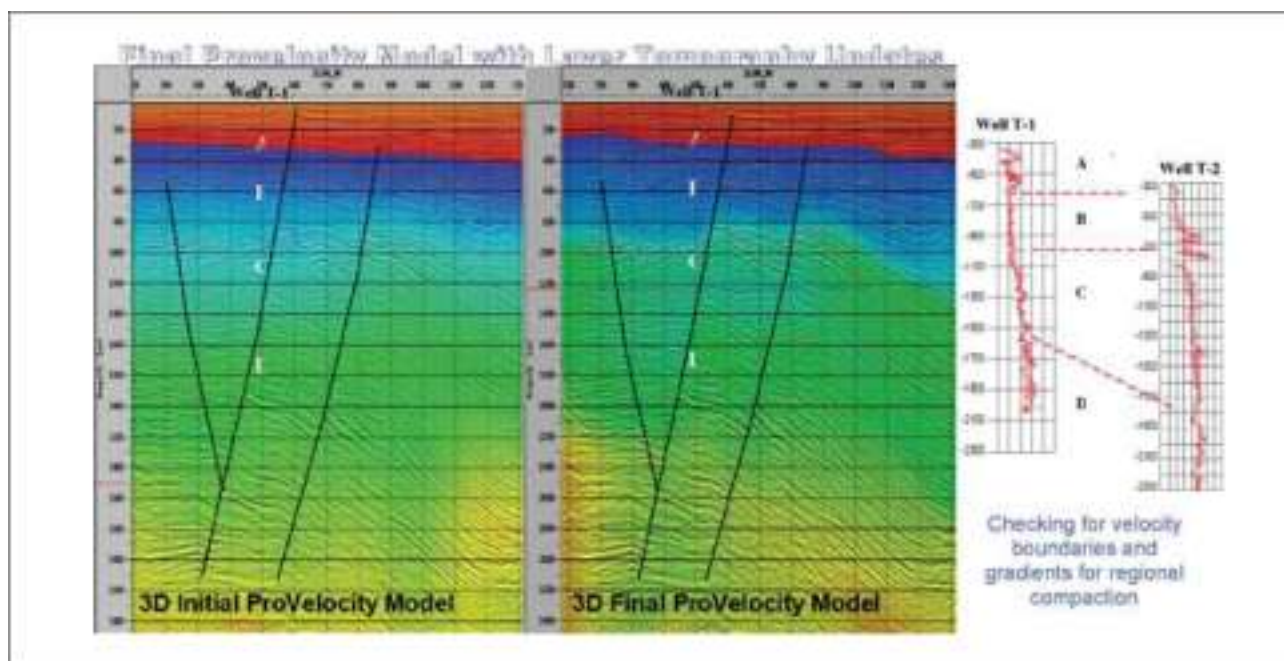


Рисунок 3 Основные скоростные данные для слоев (A, B, C, и D в скважине T-1 и T-2) были сравнены с моделью про-скорости на соответствие и целостность. Окончательная модель про-скорости после третьей корректировки томографии (сейсмический разрез справа) сравнивается с исходной моделью (слева) в мест положения скважины T-1.

Сетка модели изначально выбиралась 300 x 300 x 20 м, а позже перед определением времени пробега, произведена передискретизация на сетку 100 x 100 x 20 м. Все данные были мигрированы с использованием исходной модели про-скорости и выведены на сетке 600 м x 600 м. Выходные сейсмограммы общего мнимого источника (CIP) затем были преобразованы во временную область, перед преобразованием обратно в глубины сейсмограммы были профильтрованы, был произведен мьютинг.

В общем как только была построена модель про-скорости, был запущен блок PreSDM во взаимодействии с коррекцией томографии. Сейсмограммы CIP были проверены на гладкость. На каждом этапе коррекции томографии, были протестированы такие переменные как длина волны, затухание, и весовые коэффициенты для обеспечения получения корректного решения. Было использовано три прогона коррекции томографии CIP, в результате постепенно шкала длин волн решения сокращалась с 2.6 км до 1.3 км и а заключения до 600 м. Для финального варианта шаг дискретизации был уменьшен до 200 м. Для стабилизации результатов инверсии кинематической томографии была использована инверсия с ограничениями. Инверсия легко могла дать пульсации и нереальную скоростную модель. С каждым решением, мы сокращали остаточное приращение времени. Контроль качества выполнялся на каждом этапе для того, чтобы величина корректировки была статистически действенной. Любые остаточные задержки по глубине были пропикированы и поданы в цикл корректировки томографической инверсии. Обновленные значения про-скорости, полученные по томографии затем были опять включены в исходную модель про-скоростей. Разность обновленных скоростей (результат томографической инверсии) и исходной модели про-скорости были тщательно проанализированы. Любые нереалистичные отклонения скорости были устранены и сглажены. При каждой итерации, анализируемые данные были тщательно отбракованы для исключения кратных и шума. Далее при

получении модели про-скорости, включающей окончательные исправления, куб 3D CRS был мигрирован с 3D PostSDM (используя алгоритм конечных разностей). Используя технологии куба когерентности, суммарный куб PostSDM был проверен на качество и соответствие.

## Результаты

Основные усилия в построении изображений были сконцентрированы на зоне низкого разрешения в центре месторождения Tembungo. Результаты построения изображения в области глубин - разрез CRS имеет гораздо более высокое качество в центральной зоне структуры по сравнению с предыдущими изображениями PostSDM (построенными до применения настоящей методики) как показано на временном срезе (рисунок 4). Комбинация CRS с подходом моделирования скорости, принятым в настоящей работе, внес значительный вклад в увеличение соотношения сигнал-шум, улучшение прослеживаемости отражающей границы, и определении разломов.

В более малоглубинной части района, изображения CRS отличаются увеличенным соотношением сигнал-шум вдоль отражающих границ, не добавляя структурной информации к тому, что уже было видно ан предыдущем PostSDM. Это различие в соотношении сигнал/шум было полезно интерпретатору с целью выделения тонких структурных особенностей, таких как выклинивания в сторону перекрывающих отражающих границ (рисунок 5). Одним недостатком и частично нежелательным эффектом применения отображения CRS было то, что оно очень сильно подавило шум вдоль отражающих границ на бортах а также на низкоамплитудных отражениях, делая размытыми высокочастотные стратиграфические особенности с ненадежной информацией по амплитудам.

Всюду в более глубоких частях, методика приводит к значительному увеличению разрешения и прослеживаемости



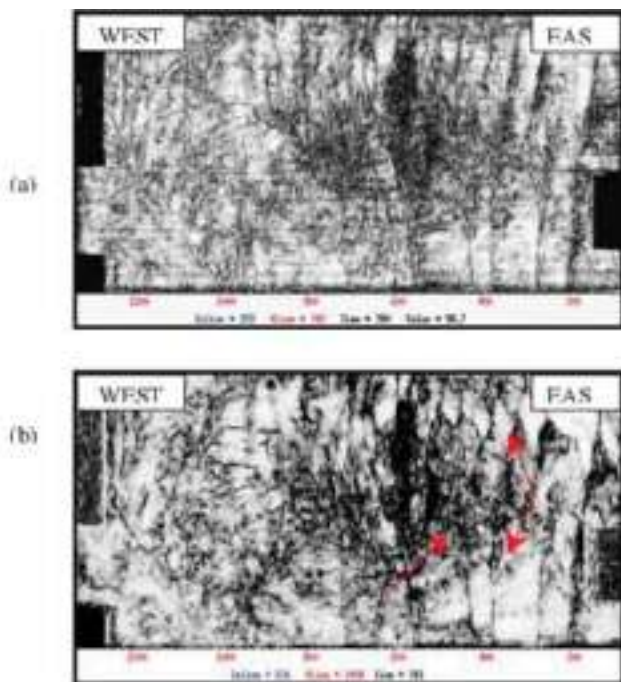


Рисунок 4 Временной срез на 780 мс, отражающий разницу между (a) предыдущим PostSDM и (b) CRS PostSDM.

отражений центральной антиклинали и ее бортов, которые на предыдущих изображениях PostSDM сильно осложнены шумом. В отличие от малоглубинного участка, комбинация CRS и методики глубинного отображения дало значительную дополнительную структурную информацию в областях с низким качеством данных, большей частью расположенных в более глубоком участке (Рисунок 6). Более того, эта комбинация увеличила разрешение отражений типа подошвенного прилегания на

протяженной отражающей границе основания. Общая протяженность отражений становится более четкой, тогда как разрывы и дребезг (шум) сильно подавляется.

Несмотря на выполнение поиска падения и кривизны только по отдельным инлайнам, на разрезе CRS есть улучшения как в направлении инлайна, так и направлении кросслайна. Можно добиться еще большего улучшения путем одновременного поиска 3D в направлениях инлайна и кросслайна. По сравнению с результатами по кросслайну, инлайны характеризуются большим увеличением отношения сигнал-шум, который может быть вызван тем, что поиск параметров выполнялся в направлении инлайна. В настоящей работе, мы также оценивали результаты PreSDM по сравнению с CRS PostSDM чтобы узнать, может ли эта новая методика внести существенный вклад по сравнению с PreSDM. Пример, приведенный здесь, показывает направление кросслайна (Рисунок 7). Обе процедуры миграции (PostSDM и PreSDM) были выполнены с помощью использования одних и тех же методов конечной разности с одной и той же моделью проскорости и обращенной во временной области (сохраняя параметры миграции теми же). Глубинные разрезы, обращенные во временную область из PreSDM и CRS PostSDM демонстрируют существенное увеличение разрешения. На обоих изображениях видна большая прослеживаемость в верхней части центральной зоны. На более глубинном участке, разрез CRS PostSDM характеризуется большей прослеживаемостью, структурным разрешением и разрешением сигнала на протяжении всей зоны, особенно в глубокой части.

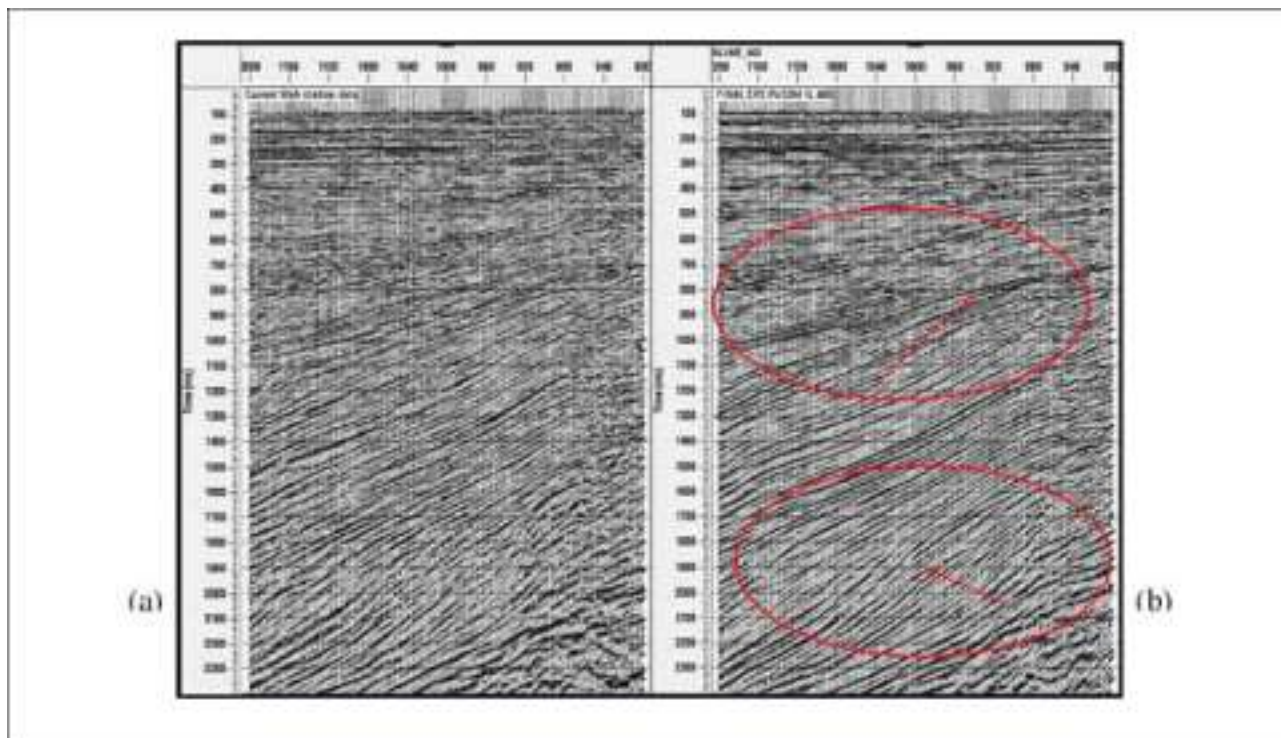


Рисунок 5 (a) Предыдущее PostSDM и (b) CRS PostSDM. На разрезе CRS PostSDM можно видеть значительное улучшение (справа) по сравнению с предыдущим изображением. Особенности подошвенного налегания легко заметны внутри красных кружков

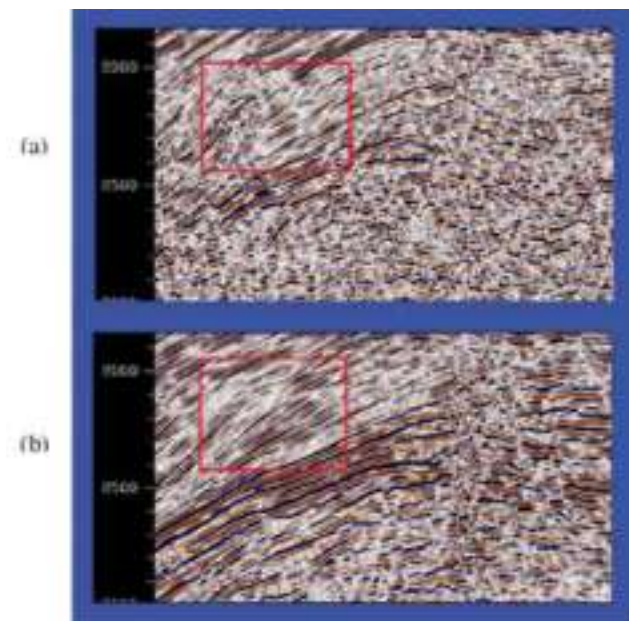


Рисунок 6 (a) Предыдущий PostSDM и (b) CRS PostSDM на котором границы более непрерывные и шум значительно подавлен по сравнению с предыдущим изображением.

#### Заключительные примечания

Метод, представленный в данной работе, демонстрирует потенциал построения изображений CRS

в сочетании с методикой глубинных изображений. Сравнение CRS PostSDM с предыдущей методикой PostSDM и PreSDM раскрывает преимущества использования этого нового подхода. Мы также показали, что эта новая методика имеет большие возможности в структурном картировании по сравнению с PreSDM. Окончательные результаты отображений свидетельствуют об улучшении общего разрешения, прослеживания разломов, улучшении прослеживаемости и подавлении шума. Так, новый подход оказал себя в улучшенном представлении таких стратиграфических особенностей как участки перерыва и едва заметные зоны подошвенного налегания. Продолжения разломов легко выделяются и более четкие, а крупные и мелкие блоки разломов ясно видны и легко пикируются. Улучшается прослеживание высокоамплитудных когерентных отражений, общий уровень сигнал-шум существенно вырос.

Новый подход улучшает структурную интерпретацию, увеличивая уровень надежности благодаря лучшей прослеживаемости отражений. Суммирование сегментированного когерентного отражения вдоль общей поверхности отражений увеличивает сигнал/шум, особенно в очень шумной среде. Это улучшает процедуры автоматического прослеживания и поиска атрибутов когерентности при выполнении сейсмической интерпретации.

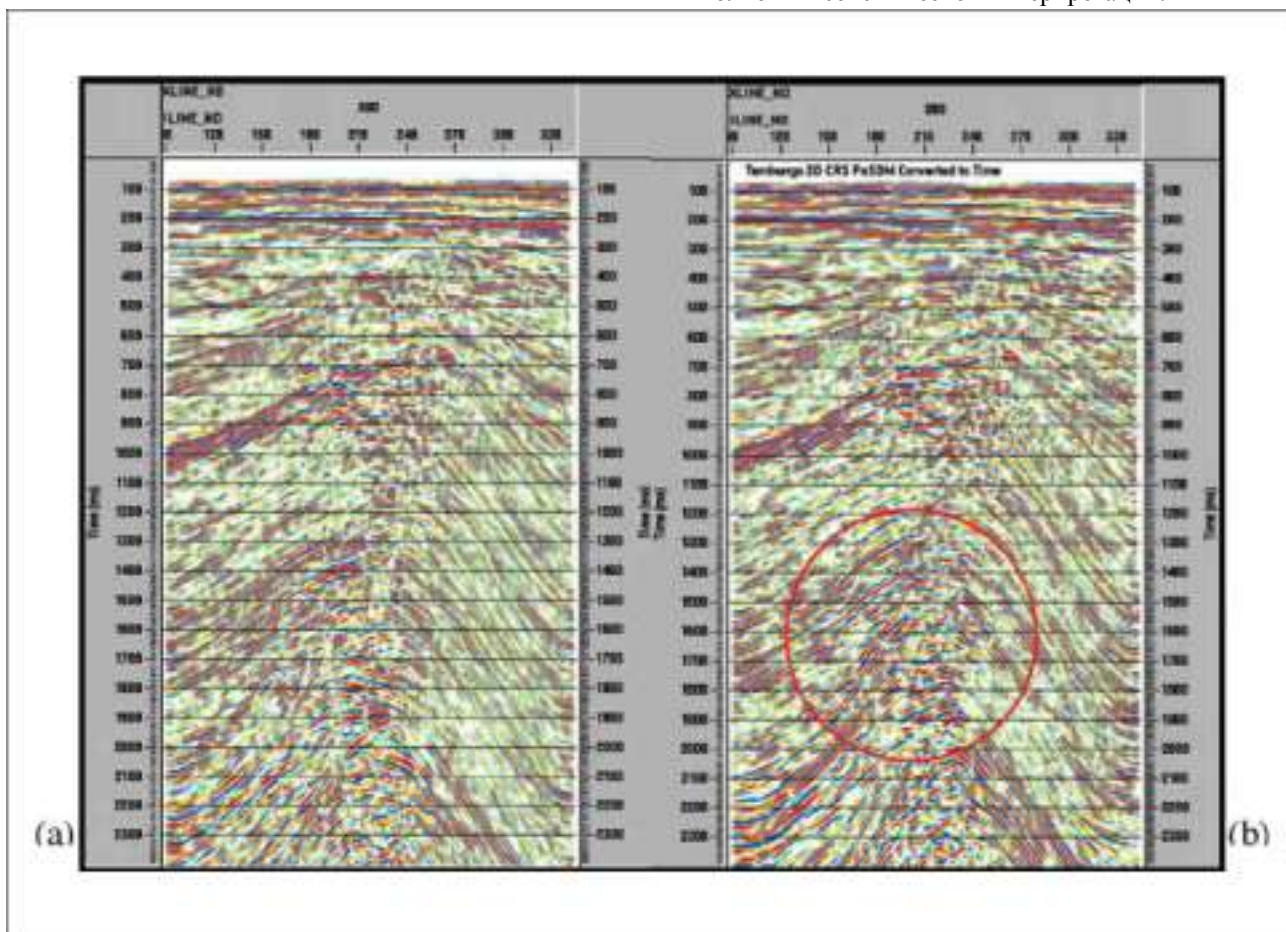


Рисунок 7 (a) Результат PreSDM и (b) CRS PostSDM в направлении кросслайн. На разрезе CRS PostSDM видны некоторые улучшения в малоглубинной части, тогда как глубинные отражения имеют даже более четкое изображение (показано красным кружком).



Однако, на момент проведения работ по проекту, алгоритм не поддерживал сохранение истинных амплитуд. Таким образом, стратиграфический и атрибутный анализ должны проводиться с осторожностью. CRS вызвал дисперсию остаточных точек отражения, что привело к размазыванию окончаний горизонтов и уменьшило латеральное разрешение.

Дальнейшие ограничения в процедуре CRS проявляются в том, что апертуру CRS нельзя контролировать, поскольку она не может варьировать в пространстве и времени. Это означает, что в зоне с хорошим соотношением сигнал/шум нельзя использовать меньшую апертуру CRS. Это приводит к получению монотонного разреза без едва уловимых вариаций. Полный оператор 3D CRS для массового применения еще требуется разработать. Будем надеяться, что в нем будет учтен одновременный поиск параметров 3D в направлении инлайна и кросслайна.

### Благодарности

Автор хотел бы выразить благодарность Petroliam Nasional Berhad, Малайзия (Petronas), национальной нефтяной и газовой компании Малайзии, Peronas Carigali (разведочной службе Petronas), и Petronas Research & Scientific Services, Малайзия за предоставление разрешения на публикацию этой работы. Я также хотел выразить признательность Nor Azhar Ibrahim, M Firdaus A Halim и Dimiyati Mohamed (PETRONAS Research) за их

вклад в проект, Dr J. Pruessmann (TEEC) за его поддержку и Dr M. Al-Chalabi за комментарии к этой работе.

### Литература

- Al-Chalabi, M. [1994] Seismic velocity - a critique. *First Break*, 12, 589-596
- Dix, C. H. [1955] Seismic velocities from surface measurements. *Geophysics*, 20, 68-86.
- Hubral, P., Hoecht, G., and Jaeger, R. [1999] Seismic illumination. *The Leading Edge*, 1268-1299.
- Hubral, P. [1999] Macro model independent seismic reflection imaging (Special issue on Karlsruhe Workshop of macro model independent seismic reflection imaging). *J. Appl. Geoph.* 42 (Nos. 3, 4).
- Jager, R. [1999] *The Common Reflection Surface Stack - Introduction and Application*. MS Thesis, Karlsruhe University, Germany.
- Jager, R., Mann, J., Hoecht, G., and Hubral, P. [2001] Common-reflection-surface stack: Image and attributes. *Geophysics*, 66, 1, 97-109.
- Miiller, T. [1998] Common Reflection Surface Stack vs. NMO/STACK and NMO/DMO/STACK. 60th *EAGE Meeting*, Extended Abstracts, Session 1-2.