

Complex Imaging Challenges: Offshore Southeast India

Проблемы построения изображения в сложных условиях: прибрежные воды юго-востока Индии

Pranaya Sangvai; Ajoy Biswal, Mohit Mathur, Reliance Industries Ltd.;
Juergen Fruehn, Phil Smith, Ian F. Jones*, Dave King, Mike Goodwin,
Victoria Valler, ION GX Technology

Праная Сангвай; Аджой Бисвал, Мохит Матур, Reliance Industries Ltd.;
Юрген Фрейн, Фил Смит, Ян Ф. Джонс*, Дейв Кинг, Майк Гудвин,
Виктория Валлер, ION GX Technology

Imaging in deep water environments poses a specific set of challenges, both in the data pre-conditioning and the imaging. These challenges include scattered complex 3D multiples, aliased noise; and low velocity shallow anomalies associated with channel fills and gas hydrates.

In this paper, we describe our approach to tackling these problems, concentrating our attention on multiple suppression, scattered noise attenuation, iterative velocity model building and depth imaging.

Deep Water Issues

Off the east coast of India, the transition from the shallower coastal waters to the deep shelf often encounters significant topographical variation in the sea bed, which gives rise to numerous effects which must be dealt with by the processing geophysicist. In addition to deep channels and steep slopes, we also encounter buried channels with low velocity fills and gas hydrates. Diffracted and “out-of-plane” multiples are the norm in these environments (Stewart, 2004), and must be dealt with in order to subsequently derive a reliable velocity model in order to deliver an acceptable structural image (Stewart et al, 2006).

To address multiples, differential velocity based methods such as Parabolic Radon have often been used in deep water. To some extent, the problem of aliasing of the multiples on far offsets can be addressed either by interpolation and/or use of a de-aliased (“beam”) Radon transform. However, Radon-based techniques fail for complex multiples, as the apex of the events in the CMP domain does not fall on zero offset for ray paths not in the plane of the shot-receiver axis. In these cases, an alternative method must be employed.

In recent years, the SRME technique has become popular in deep water. Near offset multiples in particular are better attenuated than with Parabolic Radon technique. Cascading 2D SRME and Radon has become an industry standard approach. However, the complexity of the mul-

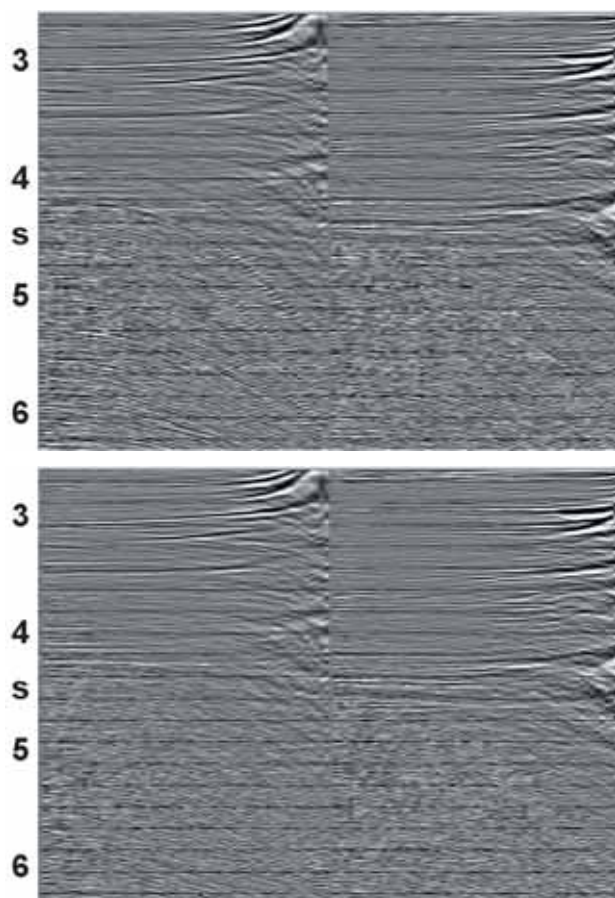
Построение изображений в глубоководной среде связано с целым рядом специфических проблем как в области предварительной обработки данных, так и в области собственно построения. К этим проблемам можно отнести рассеянность сложных кратных волн 3D, смешанные шумы и низкоскоростные малоглубинные аномалии, связанные с заполнениями каналов и газовыми гидратами.

В настоящей работе представлен наш подход к решению упомянутых проблем, и особое внимание уделяется таким аспектам, как подавление кратных волн, ослабление рассеянных шумов, создание итеративных скоростных моделей и построение глубинного изображения.

Глубоководные условия

В прибрежных водах восточного побережья Индии, при переходе от прибрежного мелководья к глубокому шельфу, часто встречаются значительные топографические изменения морского дна. Эти изменения вызывают множество последствий, с которыми приходится сталкиваться геофизикам-обработчикам. Помимо глубоких каналов и крутых склонов, там также встречаются скрытые каналы с низкими скоростями в заполнениях и газовых гидратах. Отраженные и боковые кратные волны представляются нормальными явлениями в этих условиях (Stewart, 2004 год). Упомянутые явления обязательно должны анализироваться с тем, чтобы впоследствии создать надежную скоростную модель и на ее основе построить приемлемое структурное изображение (Stewart и др., 2006 год).

Для решения проблем, связанных с кратными волнами, на больших глубинах часто используются методы, основанные на дифференциальных скоростях, например, метод Parabolic Radon. В определенной степени, проблема эляйсинга кратных волн на максимальных удалениях может решаться при помощи интерполяции и/или при помощи применения (“Beam”) преобразования Радона. Методы Радона, однако, не срабатывают в отношении сложных кратных волн, так как верхняя точка событий в



● Fig. 1. Example deep water CMP gathers with the 2nd order NMO. Top: After application of 2D SRME. Bottom: After application of 3D SRME. Maximum offset is 6,000 meters.

● Рис. 1. Пример глубоководных сейсмограмм OCT с введенным NMO 2-го порядка. На снимке сверху: после применения метода 2D SRME. Внизу: после применения метода 3D SRME. Максимальное удаление – 6 000 м.

области OCT не попадает ни на центр траектории луча, ни в план оси «источник-прием». В этих случаях необходимо воспользоваться альтернативным методом.

Применительно к глубоководным условиям, в последние годы получил распространение метод SRME. В частности, этот метод позволяет добиться лучшего подавления кратных волн на небольших удалениях по сравнению с методом Parabolic Radon. Каскадирование методов 2D SRME и Radon в настоящее время уже стало отраслевым стандартом. Однако сложные эффекты, связанные с кратным источником, и «боковые» эффекты могут сильно ограничить границы применения даже такой комбинации.

Внедрение 3D SRME означало появление теоретически более правильного подхода, эффективность которого, по сравнению с его «стандартным» предшественником, мы намерены продемонстрировать.

На рис. 1 представлены данные, отсортированные по OCT после использования метода SRME (применяющегося к сейсмограммам ОТВ). Здесь мы сравниваем результаты 2D SRME с результатами 3D SRME. Сложные траектории луча по первой волне от морского дна и соответствующих слоев осадочных пород привели к смещению высшей точки режима приращения времени, как это прослеживается в области OCT. Вслед за методом 2D SRME или 3D SRME, могут использоваться дополнительные методы понижения применительно к смешанному шуму или шумам иного класса.

На рис. 2 сравнение представлено в виде контрольного суммарного разреза (перед 3D pre-SDM). Рис. 2 (вверху) показывает результат применения метода 2D SRME; здесь мы видим полосу шумов над участком исследования (крупное несогласие). Эта остаточная энергия кратных волн рассеется во время миграции, и на данном этапе могут возникнуть затруднения с ее удалением. И наоборот, при использовании метода 3D SRME (внизу), контрольный разрез в основном свободен от упомянутого кратного засорения.

Построение скоростной модели и глубинная миграция до суммирования

В среде с точечными прерывистыми скоростными аномалиями, например, связанными с узкими каналными заполнениями или аккумуляциями газового гидрата, сплошная скоростная модель может оказаться недостаточной (Jones, 2003 год). Далее, применение только сеточного подхода также может оказаться неэффективным (Jones и др., 2007 год).

В этом проекте (Sangvai и др., 2008 год) мы использовали гибридно-сетевой метод, в котором скомбинировали обычную сеточную томографию, автоматически выделенные слои и слои подробной ручной интерпретации. Начальная скорость интервалов глубин была взята по скорости суммирования времени (сглаженная и преобразованная в интервальную скорость), а морское дно было выделено по скорости миграции в глубинной области и введено в исходную модель в качестве явного слоя.

multiple generator and “out-of-plane” effects can severely limit even this combination.

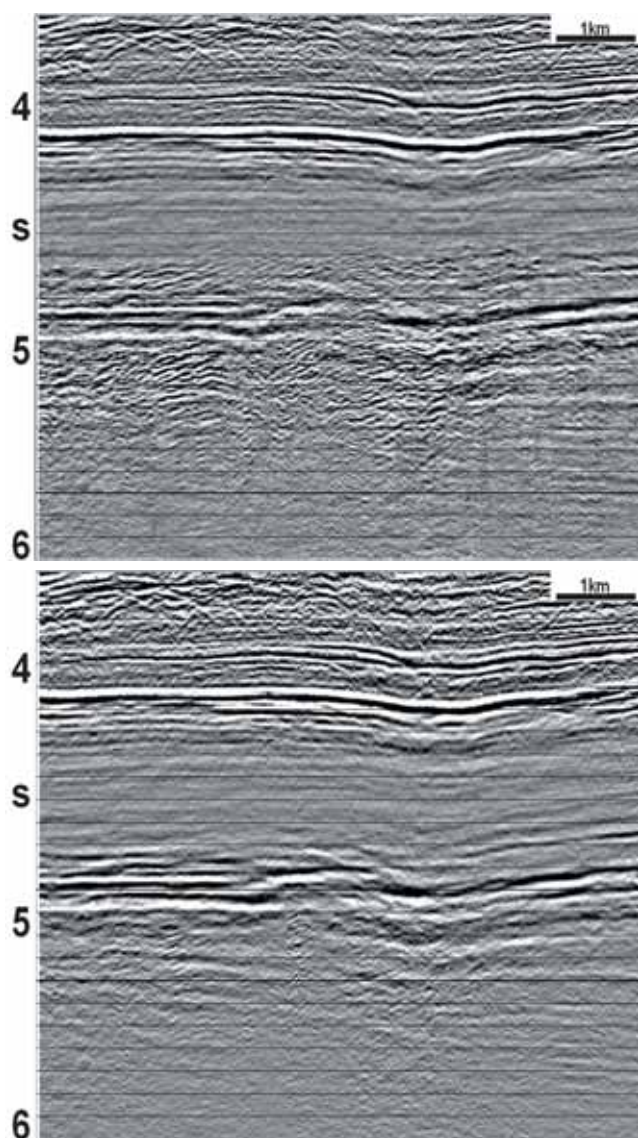
With the advent of 3D SRME, a theoretically more correct approach has become available, and here we demonstrate its effectiveness as compared to the “conventional” approach.

In Fig. 1, we show data sorted to CMP gathers after application of the SRME technique (which is applied to shot gathers). We compare results from 2D SRME with those from 3D SRME. Complex ray-paths for the first sea-bed multiple and associated sedimentary layers, give rise to a shifted-apex aspect to the moveout behaviour as seen in the CMP domain. Following either 2D or 3D SRME, additional de-noise techniques can be applied to deal with the aliased noise and other classes of noise.

In Fig. 2, we show the comparison as a QC stack (prior to 3D preSDM). Fig. 2 (top) shows the 2D SRME, where we see a swath of noise sitting over an area of interest (a major unconformity). This remnant multiple energy will be spread around during migration and will be difficult to remove at that stage. Conversely, following 3D SRME (bottom), the QC stack is mainly free of this multiple contamination.

Velocity Model Building & Pre-Stack Depth Migration

In an environment with punctual discontinuous velocity anomalies, such as those associated with narrow channel fills or gas hydrate accumulations, a purely layer based velocity model will be inadequate (Jones,



● Fig. 2. Top: Stack following application of 2D SRME. Bottom: Stack following application of 3D SRME.

● Рис. 2. Вверху: суммарный разрез при применении 2D SRME. Внизу: суммарный разрез при применении 3D SRME.

Далее было проведено несколько итераций обновления сеточной томографической модели. Как правило, это связано с применением процедуры авто-пикинга (в настоящем примере на основе подавления плоских волн – Claerbout, 1992 год; Hardy, 2003 год) на сейсмограммах ОТП плотной дискретизации, и с вводом погрешностей в определении скоростей при помощи авто-пикинга и информации о наклоне в сеточный томографический алгоритм 3D.

Что касается аккумуляций газового гидрата, то мы прежде всего полагались на сеточную томографию высокого разрешения и имели возможность различить скорости в мелкомасштабных объектах при $V_i \sim 1\,250$ м/с, по сравнению со скоростями в фоновых осадочных отложениях – $\sim 1\,600$ м/с. Относительно детальных узких каналов, мы полагались на ручную интерпретацию верхних и базовых канальных объектов и результаты сканирования потенциальных скоростей в канальных заполнениях.

На рис. 3 показан первый километр данных рядом с морским дном, где мы подробно рассматривали врезанные каньоны, а также некоторые небольшие локализованные каналы непосредственно под морским дном. Эти каналы способствуют сильному искажению понижения изображения подстилающих осадочных отложений из-за их низкоскоростного заполнения. Если бы мы использовали модель с плавной скоростью, у нас была бы возможность различить эти мелкие объекты (как правило, шириной 200 м), следовательно, требуется подробное ручное прослеживание. Изображение 3D preSDM, показанное на рис. 3 создавалось с использованием поля плавных фоновых скоростей (поэтому видно понижение). Затем была наложена подробная модель скорости в канальных заполнениях. После этого осуществлялся просмотр скорости миграции с целью определения лучшей скорости канальных заполнений; в данном случае была выбрана скорость, равная 1 200 м/с.

На рис. 4 проводится сравнение результата 3D preSDM после миграции с полем плавной фоновой скорости (вверху) без включения точечных каналов с результатом, включающим каналы низкой скорости заполнения (внизу). Улучшение в более глубоком участке довольно значительно. Нам не удалось полностью распознать проблемы мало-глубинных каналов, но их включение позволяет повысить разрешение на данном глубоком участке. Поэтому игнорировать упомянутые проблемы не рекомендуется.

Получение изображения

С точки зрения рассматриваемых здесь данных, мы не встречались с какими-либо классическими проблемами, возникающими из-за множественности траекторий (исследование трассирования лучей подтвердило, что контраст скоростей между низкой скоростью в канальных заполнениях и в окружающих осадочных отложениях был не таким значительным, чтобы вызвать множественность траекторий). Отсюда следует, что амплитуда по Кирхгофу или Биму наилучшим образом подходит к решению данной проблемы. В нашем случае мы использовали метод Кирхгофа и добавили полученные сейсмограммы ОПТ в исследование оценки параметров.

2003). Furthermore, a purely gridded approach may also encounter problems (Jones, et al, 2007).

In this project (Sangvai et al, 2008), we used a hybrid-gridded approach, where we combined conventional gridded tomography, high resolution gridded tomography, auto-picked layers, and detailed manually interpreted layers. The initial depth interval velocity was derived from the time-stacking velocity (smoothed and converted to depth interval velocity), and the water bottom was picked from a water-velocity depth migration and inserted in the initial model as an explicit layer.

Following this, several iterations of gridded tomographic model update were performed. This involves running an autopicker (in this instance based on plane-wave destructors - Claerbout, 1992; Hardy, 2003) on densely sampled CRP depth gathers, and inputting the autopicked velocity errors and dip information to the gridded tomographic 3D solver.

For gas hydrate accumulations, we relied primarily on high resolution gridded tomography, and were able to resolve small-scale velocity features with $V_i \sim 1,250$ м/с, compared with the background sediment velocities of $\sim 1,600$ м/с. For detailed narrow channels, we relied on

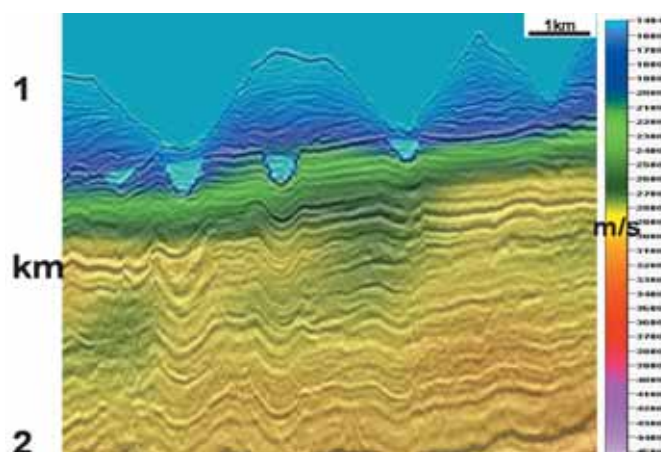
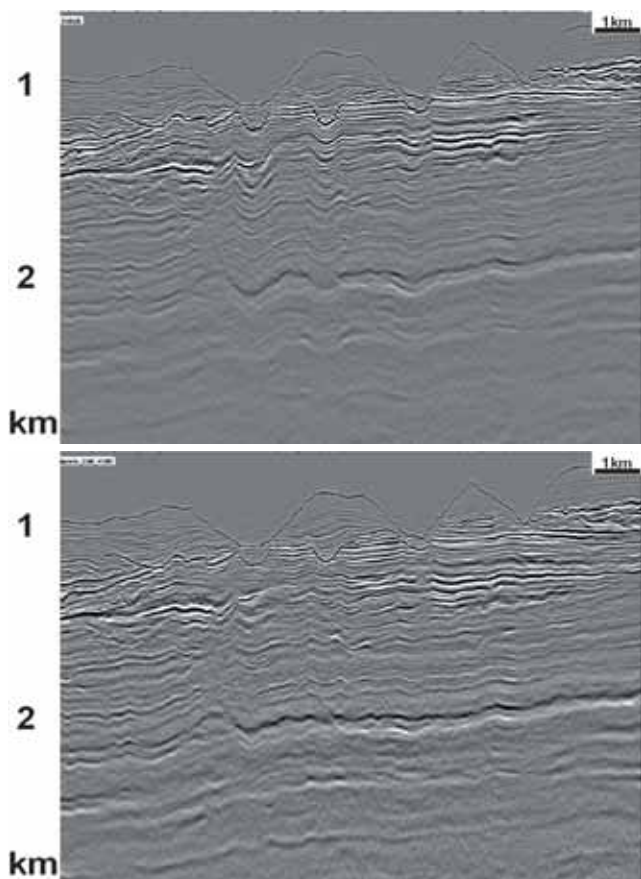
manual interpretation of the top and base of the channel features, and a scan over potential channel-fill velocities.

Fig. 3 shows the first kilometre of data near the sea bed, where we see deeply incised sea-bed canyons, but also some small localised channels just below the sea bed. These channels result in a severe pull-down distortion of the underlying sediments due to their low-velocity fill. If we were to use a smooth velocity model, we would be unable to resolve these small-scale features (typically 200 m in width) hence detailed manual picking is required. The 3D preSDM image shown in Fig. 3 was created using a smooth background velocity field (hence the pull-down is visible). The detailed channel-fill velocity model is superimposed. A migration velocity scan was used to determine the best channel-fill velocity: in this case we used 1,200 m/s.

Fig. 4 compares the 3D preSDM result after migrating with a smooth background velocity field (top) with no punctual channels included, versus the result incorporating the low-velocity fill channels (bottom). The improvement in the deeper section is significant. We have not perfectly resolved the shallow channel problems, but incorporating them in this way enables better resolution in the deeper section. Ignoring them is not a viable option.

Imaging

For the data under consideration here, we do not face any classical multi-pathing problems (a ray-trace study confirmed that the velocity contrast between the low velocity channel fill and surrounding sediments was not great enough to induce multi-pathing), hence for the final migration, an amplitude preserving Kirchhoff or Beam implementation is best suited for the problem. Here we



● Fig. 3. 3D PreSDM using smooth model (not shown), with channel fill velocity model superimposed.

● Рис. 3. Использование плавной модели в 3D PreSDM (не показано), с наложением скорости заполнения каналов.

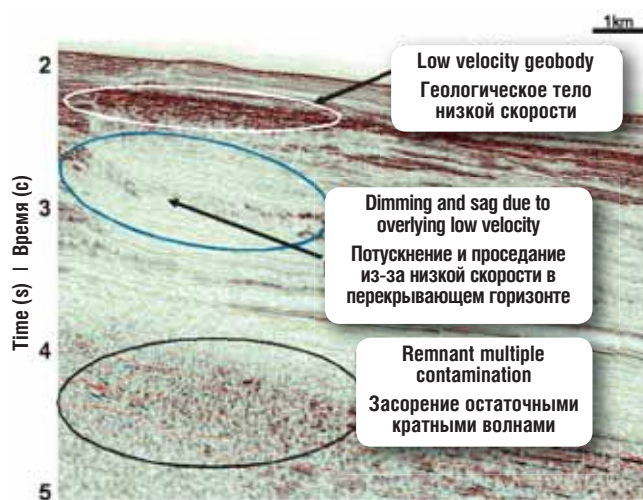
В проекте миграции 2004 года использовалось плотное поле авто-выделенных скоростей в качестве части крупномасштабного проекта разработки, предпринятого в этом регионе компанией Reliance Industries. Рис. 5 показывает продольную линию из типичной системы 3D preSTM. Очевидны многие аномалии приповерхностных скоростей, некоторые из которых ассоциируются с возможными аккумуляциями газового гидрата. Более мелкий (белый) эллипс высвечивает низкоскоростное геологическое тело, которое, по нашему мнению, несет возможный компонент аккумуляции свободного газа, связанного с газогидратным покрывающим слоем, а также с глиной, насыщенной водой, заполняющей каналы. Под этим геологическим телом виднеется участок потускнения, также можно заметить связанное со скоростью понижение, ассоциируемое с этим объектом. Более глубокий эллипс характеризует зону, нарушенную остаточными кратными волнами.

Из-за содержания искаженного первичного сигнала в результате аномалии скорости в покрывающей толще энергия кратных волн оказывается главным поставщиком данных по более глубокой части участка. Если мы не сможем успешно подавить кратную волну, нам не удастся распознать подстилающую геологическую структуру. Эляйсинг режима приращения времени пробега кратной волны в глубоководье ведет к появлению в суммарном разрезе нарушений отражающего пласта. Для успешного построения модели, такой шум должен быть сначала удален до процедуры суммирования и, как показано в отношении упомянутого здесь проекта preSDM, для достижения этого была успешно применена система 3D SRME.

На рис. 6 мы видим такую же продольную линию, как и на рис. 5, после окончательного построения изображения по 3D preSDM с предварительной обработкой (включая 3D SRME). Понижение было разрешено, а также было улучше-

● Fig. 4. 3D preSDM with smooth background model (top); 3D preSDM with detailed low-velocity channel-fill model (bottom).

● Рис. 4. 3D preSDM с плавной фоновой моделью (вверху); 3D preSDM с подробной низкоскоростной моделью заполнения каналов (внизу).



have used Kirchhoff, and have input the resulting CRP gathers to an attribute estimation study.

The 2004 time migration project used a dense autopicked velocity field as part of the large-scale exploration project undertaken in the region by Reliance Industries. Fig. 5 shows an inline from the vintage 3D preSTM. Many near-surface velocity anomalies are evident; some associated with possible gas hydrate accumulations. The shallower (white) ellipse highlights a low velocity geobody, which we infer has a possible component of free gas accumulation associated with the gas hydrate sealing layer as well as possible channel-fill water saturated clay. Beneath this geobody we have a region of dimming and can also note velocity-related pull-down associated with this feature. The deeper ellipse highlights a zone degraded by remnant multiples.

Due to the degraded primary signal content resulting from the overburden velocity anomaly, the multiple energy dominates the contribution to the data in the deeper part of the section. Unless we successfully attenuate the multiple, we would be unable to reveal the underlying geological structure. Aliasing of the multiple moveout behaviour in deep water results in a stack response showing a broken reflector character. For successful model building, such noise must first be removed in the pre-stack domain, and as shown for the preSDM project described here, 3D SRME was successfully employed to achieve this.

In Fig. 6, we see the same inline as in Fig. 5, after final 3D preSDM imaging with all pre-processing (including 3D SRME). The pull-down has been resolved, and deeper imaging improved (indicated in the ellipse at about 4 kilometers depth). As described earlier, in order to achieve this imaging improvement, the velocity model building required several phases employing different techniques.

Conclusion

For imaging in complex environments, it is necessary to employ a wide range of tools for suppression of the various classes of noise and multiples. This must be accomplished in the pre-stack domain so that automated dense picking can be performed on migrated gathers to permit reliable model update.

In deep water areas, we are fortunate that the water bottom multiple problem does not affect much of the data, so we can proceed with model building for the data above

● Fig. 5. Vintage 2004 3D preSTM inline (with 2D demultiple only). Dimming below a shallow geobody is evident (circled), and below, remnant multiple contamination degrades the image (circled).

● Рис. 5. Типовая продольная линия 2004 года 3D preSTM (только при 2D подавлении кратных волн). Четко прослеживается потускнение под мелководным геологическим телом (в кружке), внизу – засорение остаточными кратными волнами ухудшает изображение (обведено).

но построение глубоководного изображения (показано в эллипсе, глубина примерно 4 км). Как было сказано выше, для получения улучшенного изображения создание скоростной модели потребовало нескольких этапов с использованием различных методов.

Заключение

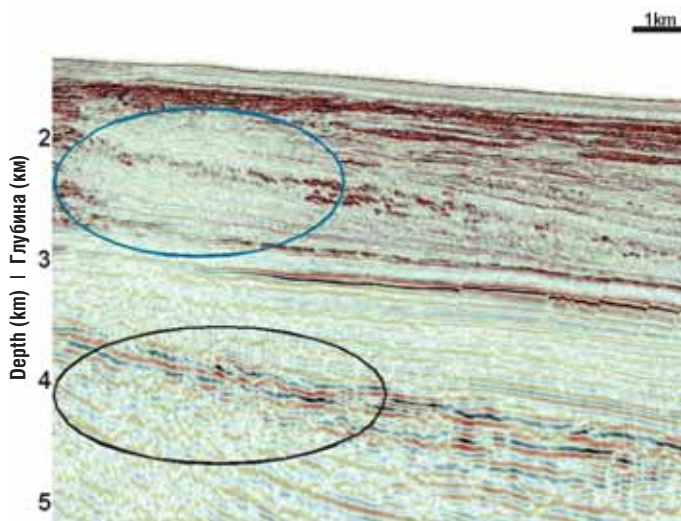
Для построения изображения в сложных условиях необходимо применять самые разнообразные процедуры для подавления шумов и кратных волн различных классов. Это необходимо делать в области до суммирования, чтобы можно было осуществить автоматическое плотное выделение на мигрированных сейсмограммах для получения возможности надлежащего обновления модели.

Относительно глубоководных участков, нам повезло в том отношении, что множественные проблемы, связанные с морским дном не слишком влияют на данные, и это позволяет нам продолжить построение модели по данным после времени первой кратной волны от морского дна. Параллельно этому осуществляется процесс преобразования.

В то же время, нам все еще необходимо разобраться с проблемами, связанными с внутренними кратными волнами и прочими шумами. Кроме того, необходимо применять гибкий подход к обновлению модели, что позволит ввести

● Fig. 6. New 3D preSDM from same inline as Fig. 5, following 3D SRME. The slight sag is mostly resolved, and remnant multiple contamination mostly removed by the 3D demultiple, allowing a reasonable image to be obtained.

● Рис. 6. Результат 3D preSDM из той же продольной линии, что и на рис. 5, после 3D SRME. Легкое проседание в основном разрешено, а загрязнение остаточными кратными волнами по большей части удалено посредством преобразования 3D, что позволяет получить приемлемое изображение.




the time of the first water bottom multiple, whilst demultiple processing is proceeding in parallel.

However, we still need to address internal multiple and other noise problems. In addition, a flexible approach to model update is required, permitting us to incorporate small-scale punctual velocity features such as those associated with low-velocity channel fills, as well as resolving the gradational lateral and vertical changes associated with broader structural trends. At some short scale lengths, a tomographic solution is unlikely to be able to resolve important velocity detail, and in these instances it is important to be able to incorporate velocity information from other sources. In this case study, we have embedded into the model, a network of narrow channels, defined by detailed picking of their tops and bases from a dense grid of inlines and crosslines.

Utilization of such an approach for data offshore eastern India has resulted in an improvement in image quality compared to a recent pre-stack time migration, avoiding the structural distortion introduced by localized velocity variation in the near surface sediments.

Acknowledgements

Our thanks to our colleagues at Reliance Industries and ION GX Technology for help and advice during this project, and to our respective employers for permission to present this work. 

небольшие точечные скоростные параметры, например, ассоциируемые с низкоскоростными канальными заполнителями, а также решить вопросы, связанные с градационными поперечными и вертикальными изменениями, ассоциируемыми с более широкими структурными трендами. На некоторых небольших длинах шкалы, томографический подход вряд ли даст возможность разрешить важные детали скорости. В таких случаях важна возможность инкорпорирования информации о скорости из других источников. В данном конкретном случае, мы включили в модель сеть узких каналов, определенных детальным выделением их вершин и оснований из плотной сети продольных и пересекающихся линий.

Применение такого подхода к данным по прибрежным водам Восточной Индии способствовало улучшению качества изображения по сравнению с недавней миграцией во временной области до суммирования. Это также помогло избежать структурного искажения, вносимого различием локализованной скорости в приповерхностных отложениях.

Выражение признательности

Выражаем благодарность нашим коллегам из компаний Reliance Industries и ION GX Technology за оказанную ими помощь, в том числе консультации во время работы над этим проектом. Мы благодарны также нашим работодателям за разрешение представить настоящую работу. 