



Технология уточнения глубинно-скоростной модели неоднородной земной среды и получение высоко-разрешенного изображения по сейсмическим данным с применением суперкомпьютера «Ломоносов».

Адамович О.Б., Гогоненков Г.Н., Жуков А.П., Плешкевич А.Л.

Аннотация

Одной из основных проблем, с которой встречается геофизик при обработке данных сейсморазведки, является устранение искажающего влияния покрывающей сложно-построенной геологической среды на нижележащие сейсмические горизонты. Важными примерами являются соляно-купольная тектоника в области прикаспийской впадины или надвиговая тектоника в условиях Тимано-Печорского нефтегазоносного бассейна. Общим условием в обоих случаях является значительная латеральная изменчивость скоростей распространения волн в покрывающей среде. Основным способом учета таких искажений является 3-D глубинная сейсмическая миграция до суммирования. Применение данной технологии связано с двумя осложняющими факторами – необходимостью построения адекватной модели интервальных скоростей в глубинной области для выполнения миграции, а также значительным временем расчета мигрированных сейсмограмм общей точки отражения (ОТО). Успешное решение этих проблем связано со значительным, на несколько порядков, повышением вычислительных мощностей для построения модели интервальных скоростей и собственно глубинной миграции до суммирования. Данная статья посвящена одной из возможных технологий построения модели интервальных скоростей и применению глубинной миграции до суммирования данных сейсморазведки 3-D, полученных в условиях соляно-купольной тектоники прикаспийской впадины, с применением крупнейшего отечественного суперкомпьютера «Ломоносов» (НИВЦ МГУ). 3-D глубинная миграция до суммирования выполнялась с помощью отечественной программно-алгоритмической разработки «СейсмоСкан», использующей алгоритм Кирхгофа.

Введение

Основным методом построения сейсмического изображения в условиях сложно-построенных сред и значительных латеральных вариаций скоростей

является глубинная миграция до суммирования. Методически, для корректного выполнения глубинной миграции до суммирования необходимо задать адекватную модель интервальных скоростей в глубинном масштабе. Источником информации для оценки скоростей являются как сами наземные сейсмические данные, так и данные ВСП, а также другая доступная геологическая и скважинная информация. В простых случаях, с точки зрения распределения скоростей, применим метод, основанный на формуле Дикса [3], с помощью которого по скоростям суммирования ОГТ можно послойно рассчитать интервальные скорости. Однако данный метод применим только для субгоризонтально-слоистых сред. При использовании его в случае значительной латеральной вариации скоростей возникают значительные погрешности в определении интервальных скоростей.

Для сложно-построенных сред наиболее распространен подход с послойным определением скоростей или так называемая когерентная инверсия [4]. Данный подход основан на корреляции основных отражающих горизонтов (обычно, 4-5). После чего, на основе горизонтальных спектров скоростей, рассчитанных по сейсмограммам ОСТ, определяются интервальные скорости для верхнего горизонта. С полученной скоростью выполняется миграция горизонта в глубинную область. Учитывая скорость и глубину первого горизонта, можно рассчитать спектр интервальных скоростей для второго горизонта, полученный с учетом преломления на вышележащем горизонте. Таким образом, послойно определяются скорости для всех остальных горизонтов. Значения скоростей между горизонтами задаются либо постоянным значением, либо согласно какому-либо скоростному закону, чаще всего линейной зависимостью от глубины. Для 3-D данных процедура выполняется по сетке вертикальных срезов (например через 10 инлайнов).

Нужно отметить, что данный подход имеет ряд ограничений. При использо-

вании нескольких горизонтов качество полученных спектров значительно ухудшается для более глубоких горизонтов (обычно 3-5-й горизонты). Вследствие этого определение скоростей становится не надежным, и возникают значительные погрешности. Так же, в случае присутствия скоростной неоднородности сравнимой по размерам с длиной приемной расстановки (средне-периодная аномалия), спектры скоростей будут иметь искаженный вид, состоящий из нескольких максимумов и минимумов [4]. Данная особенность является неустраняемым ограничением метода, в результате чего приходится пропускать аномальные участки, вследствие чего падает точность построения модели скоростей. Следующим шагом обычно является уточнение полученной модели. Наиболее распространенный современный подход – сеточная 3-D томография. Данный метод основан на оценках остаточных кривизн годографов отраженных волн сейсмограмм ОТО после глубинной миграции до суммирования. Если модель подобрана корректно, годограф обладает нулевой остаточной кривизной, если модель имеет ошибки, годограф имеет остаточную кривизну и может аппроксимироваться параболой. Получая куб остаточных кривизн, а так же используя исходный куб скоростей, можно на основе томографического подхода так изменить модель, чтобы минимизировалась поле остаточных кривизн. Отметим, что данный метод имеет свои ограничения и не способен учесть ошибки скоростей превышающие 20% [2].

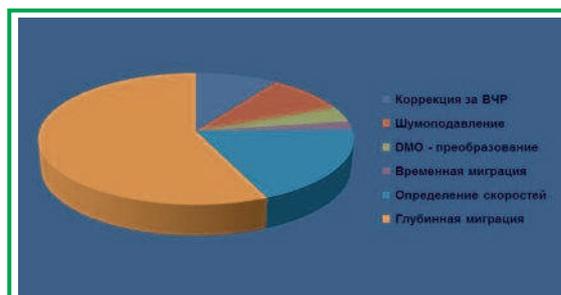
Наиболее надежным источником информации о скоростях распространения упругих волн является их измерение непосредственно в скважине, что делается с помощью данных ВСП и акустического каротажа. Данные ВСП предпочтительнее в силу того, что измерения производятся на тех же частотах что и при наземной сейсморазведке. Как показывает опыт, меньшая детальность ВСП относительно акустического каротажа не важна при построении скоростной модели среды для выполнения миграции. Основным недостатком этого подхода является то, что информация о скоростях доступна только в области околоскважинного пространства.

Другой трудной проблемой, с которой приходится сталкиваться при выполнении 3-D глубинной сейсмиче-

ской миграции до суммирования является значительное время расчета сейсмограмм ОТО при заданной модели скоростей. Время счета зависит от нескольких факторов и может сильно варьироваться. Как правило, получение максимально корректного результата миграции, требует выбора таких параметров миграции, которые значительно повышают время вычислений. К таким параметрам относятся, прежде всего, апертура миграции и шаг квантования по глубине. Кроме того, существенным фактором, влияющим на скорость счета, является количество трасс на входе и выходе процедуры миграции, вне зависимости от типа алгоритма.

Как правило, ошибки в модели скоростей требуют неоднократного выполнения глубинной миграции до суммирования по сетке профилей с целью коррекции модели, что значительно увеличивает общее время обработки данных. Для иллюстрации сказанного на рис.1 приведена обобщенная диаграмма выполнения полного графа обработки сейсмических данных на 32-ядерном SMP-сервере. Как видно, основную долю времени выполнения проекта занимает построение модели скоростей и глубинная миграция до суммирования (до 70% процентов), поэтому геофизику-обработчику необходимо иметь инструмент, который позволит значительно сократить затраченное время. Естественным выходом является значительное увеличение вычислительных мощностей. Одним из возможных средств является привлечение современных суперкомпьютеров. Кроме ускорения выполнения самой процедуры миграции, использование суперкомпьютеров позволяет применить новые, ранее недоступные технологии и ускорить процесс подготовки модели интервальных скоростей.

Технология построения и уточне-



Picture 1 – Относительные временные затраты на проведение различных процедур обработки данных 3Д сейсморазведки с использованием стандартного 32- процессорного кластера.



ния модели скоростей с использованием СК "Ломоносов".

Рассмотрим построение модели и выполнение глубинной миграции до суммирования на примере сейсмических данных 3-D в условиях солянокупольной тектоники на севере прикаспийской синеклизы. Как известно, в данных условиях целевыми горизонтами являются карбонатные комплексы, располагающиеся на глубине порядка 5км; их перекрывает мощные соляные тела сложной формы, между которыми расположены песчано-глинистые осадки (мульда). Схематически построение модели в таких условиях можно разделить на 3 этапа [1]:

- 1) Определение скоростей в песчано-глинистой толще
- 2) Определение геометрии соляного тела
- 3) Определение геометрии и скоростей подсолевых отложений

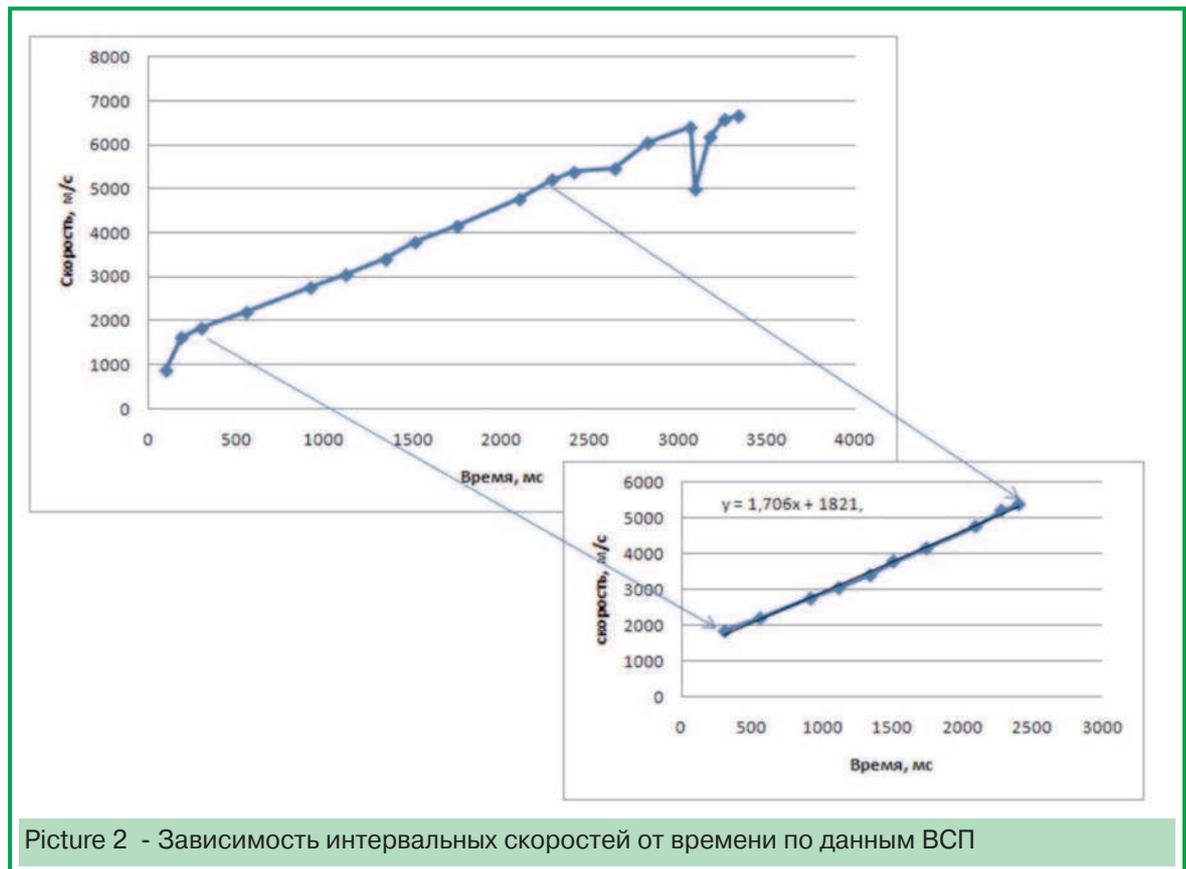
Стоит отметить, что для наилучшей фокусировки подсолевых отражений критически важны первые два пункта.

Традиционный путь заключается в описанном выше подходе на основе погоризонтного анализа, построения начальной модели, глубинной миграции и последующими итерациями томографии и миграции. Данный подход часто требует как значительных вычислительных затрат, так и постоянного участия геофизика в процессе выполнения всех

стадий работы.

В проведенном эксперименте авторы решили отойти от традиционной схемы и использовали следующий технологический подход учета латерального изменения скоростей в мульде. По данным ВСП в скважине, пробуренной в мульде, были оценены средние скорости по первым вступлениям волн. Полученные средние скорости пересчитывались в интервальные. На рис.2 приведен полученный график интервальных скоростей в зависимости от двойного вертикального времени. Как видно данная зависимость в области мульды хорошо аппроксимируется линейной с коэффициентом корреляции 0,99. Повидимому, такая хорошая зависимость является следствием того, что в терригенных породах определяющим фактором, влияющим на скорость распространения упругих волн, является глубина залегания пород и как следствие время распространения волн. Однако, при использовании данного подхода не учитывается возможное латеральное изменение скоростей.

Для учета латерального изменения скоростей был выбран следующий способ, учитывающий отмеченное линейное поведение скоростей. Используя предположение о том, что основным фактором изменения скоростей в мульде является время, естественно предполагать, что линейный закон измене-



Picture 2 - Зависимость интервальных скоростей от времени по данным ВСП

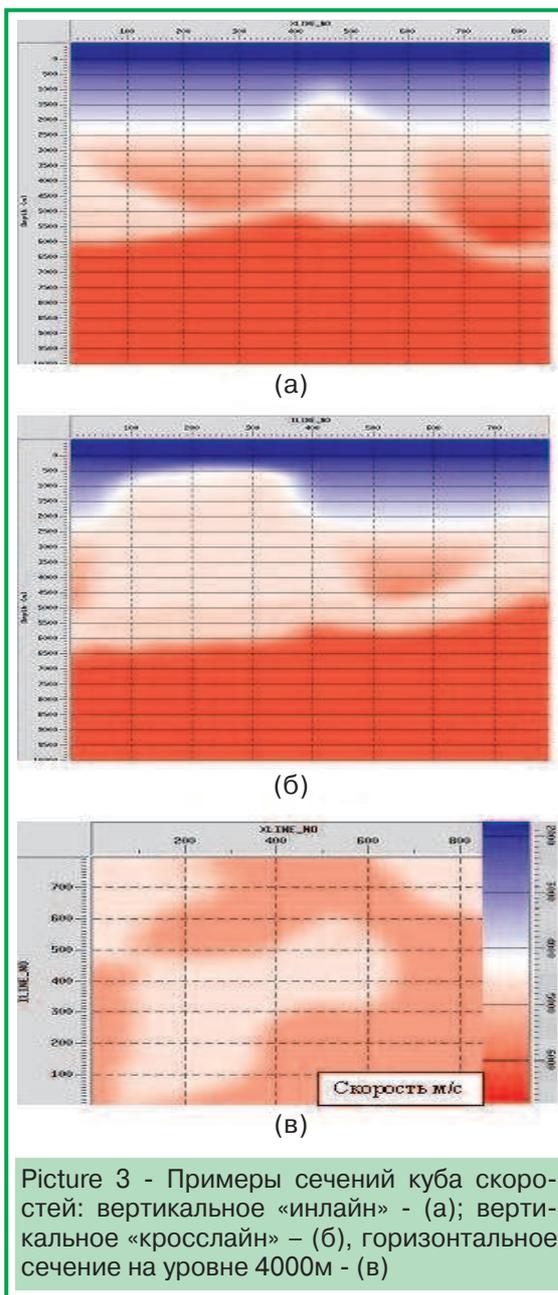
Таблица 1. Полученные законы изменения скоростей в песчано-глинистой мульде.

Градиент\V0	1700 м\с	1821 м\с	1900 м\с
1.6 м\мс ²	$V=1.6*t+1700$ (v1)	$V=1.6*t+1821$ (v2)	$V=1.6*t+1900$ (v3)
1.7 м\мс ²	$V=1.7*t+1700$ (v4)	$V=1.7*t+1821$ (v5)	$V=1.7*t+1900$ (v6)
1.8 м\мс ²	$V=1.8*t+1700$ (v7)	$V=1.8*t+1821$ (v8)	$V=1.8*t+1900$ (v9)

ния скоростей $a*x+b$ будет сохраняться по площади, только, возможно, с другими коэффициентами a и b . На основании данного предположения были созданы 9-ть скоростных зависимостей на основе комбинации $a \pm \Delta a$ и $b \pm \Delta b$. Величина Δ выбиралась исходя из геологически-обоснованных величин скоростей в терригенной толще согласованных с каротажными данными. В таблице приведены полученные скоростные зависимости. Возможной причиной латеральной вариации скоростей является особенность строения толщи и процентное соотношение между песчаной и глинистой составляющими.

Вторым ключевым этапом при построении модели является оконтуривание кровли соляного тела. Для среды в пространстве между уровнем приведения и кровлей соляного тела использовались скорости в мульде; скорость в соляном теле выбиралась постоянной и равной 4500 м/с. Основной сложностью на данном этапе является корреляция кровли соли. Источником для первоначальной корреляции кровли соли был сейсмический куб после выполнения DMO и временной миграции после суммирования. Третьим этапом является корреляция подсолевых карбонатных комплексов. Скорость в них, выбиралась равной 6200 м/с.

На основании выполненных построений было сформировано 9-ть различных глубинно-скоростных моделей, отличающихся скоростным законом в мульде. На рисунке 3 представлена полученная скоростная модель по одному из вариантов. С полученными моделями, была выполнена 3-D глубинная сейсмическая миграция до суммирования по сетке профилей: были рассчитаны каждый 10-й инлайн и каждый 10-й кросслайн. По полученным 9-ти наборам сейсмограмм ОТО проводился анализ остаточных кинематических сдвигов. После проведенного анализа оценивались средние значения величины модуля остаточного кинематического





сдвига через каждые 10 «инлайнов» и «кросслайнов» в области, соответствующей мульде. Было принято, что минимум среднего значения кинематического сдвига в отвечающем ему пространственном местоположении соответствует наиболее корректной скоростной модели окружающего пространства. Таким образом, строилась карта распределения по площади коэффициентов a и b . На основании полученной карты строилась новая скоростная модель, учитывающая латеральное изменение скоростей. В табл.2 приведена гистограмма распределения частоты появления разных вариантов скоростной модели из 9-ти использованных.

С вопросом технологии построения и уточнения скоростной модели тесно связан вопрос времени, требуемого для построения модели. Как уже было сказано, иногда это может быть ключевым фактором. Рассмотрим пример миграции на 32-процессорном сервере. Выполнение миграции на них для 9-ти различных моделей возможно лишь в последовательном режиме в силу

ограничений по вычислительным мощностям и памяти. Ситуация меняется в случае выполнения миграции на суперкомпьютере. По использованной авторами технологии есть возможность запустить миграции для 9-и моделей параллельно, что значительно ускорит процесс построения уточненной модели по предложенному алгоритму. В предложенном подходе основным, наиболее трудоёмким является выполнение миграции. Расчет остаточных кривизн, как в ручном, так и в автоматическом режимах не является времязатратной процедурой.

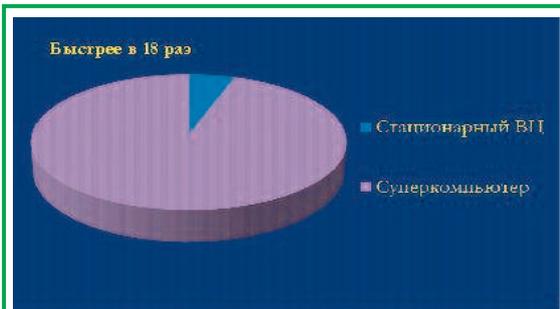
Выполнение 3-D глубинной миграции до суммирования на суперкомпьютере «Ломоносов».

3D глубинная сейсмическая миграция до суммирования (3D PSDM) была выполнена с помощью совместно разработанного специалистами ОАО ЦГЭ и ИПМ им. М.В.Келдыша комплекса программ «СейсмоСкан».

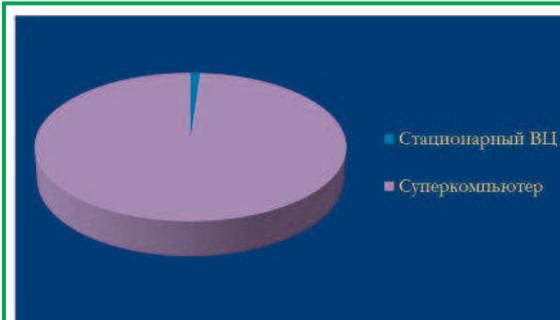
Алгоритм программы основан на методе глубинной волновой экстраполяции и приближенном решении псевдо-дифференциального уравнения с двумя корнями (DSR-equation) с использованием геометро-лучевого (WKB) приближения волновой функции Грина [5]. Такие представления приводят к интегральной формуле реализации сейсмической миграции сейсмограмм ОПВ, напоминающей традиционную миграцию Кирхгофа:

$$f(r) = \iint A(r,g)A(r,s_0) \frac{\cos(e_z, n_g) \cos(e_z, n_s)}{v(r)|_{r=g} v(r)|_{r=s_0}} \cdot u'_i(g, s_0, \tau(r,g) + \tau(r, s_0)) dg$$

где $f(r)$ - искомая функция, передающая изображение изучаемой неоднородной среды, отвечающая с точностью до постоянного множителя локальному коэффициенту отражения на границе раздела сред; $v(r)$ - локальная величина скорости пробега волн в изучаемой среде; $\tau(r,g) + \tau(r,s_0)$ - эйконал, или суммарное время пробега сейсмической волны от произвольного фиксированного источника s_0 до точки изображения r и от точки r до приемника g ; $A(r,g)+A(r,s_0)$ - произведение геометро-лучевых амплитуд сейсмических волн (обратные величины функций геометрического расхождения); $u'_i(g, s_0, t)$ - производная по времени поля однократно-отраженных или рассеянных волн сейсмограммы ОПВ; $\cos(e_z, n_g) \cos(e_z, n_s)$ - произведение косинусов углов падения нисходящей и восходящей волн в точках приема и возбуждения для заданной точки



Picture 4 - Сравнение временных затрат на проведение глубинной миграции до суммирования с использованием стандартного 32-процессорного кластера и СК «Ломоносов» при миграции данных на сетке 10x10 линий с 9-ю различными моделями



Picture 5 - Сравнение временных затрат на проведение глубинной миграции до суммирования с использованием стандартного 32-процессорного кластера и СК «Ломоносов» при миграции полного объема данных с окончательной моделью

изображения r относительно вертикальной оси глубин $0Z$. Приведенная интегральная формула миграции учитывает основные законы и особенности распространения сейсмических волн в неоднородной среде, и использует следующие допущения и ограничения:

- волны распространяются в неоднородной акустической среде с малыми коэффициентами отражения, что позволяет использовать борновское приближение однократного рассеяния;
- используется геометро-лучевое (WKB) приближение функции Грина в неоднородной среде.

Указанные приближения явно или неявно широко используются при обработке и интерпретации сейсмических данных. Обширный практический опыт их применения, а также современная практика 3D глубинной сейсмической миграции до суммирования позволили создать высокотехнологичный комплекс программ, предназначенный для глубинной миграции до суммирования больших объемов сейсмических данных с сохранением относительных амплитуд.

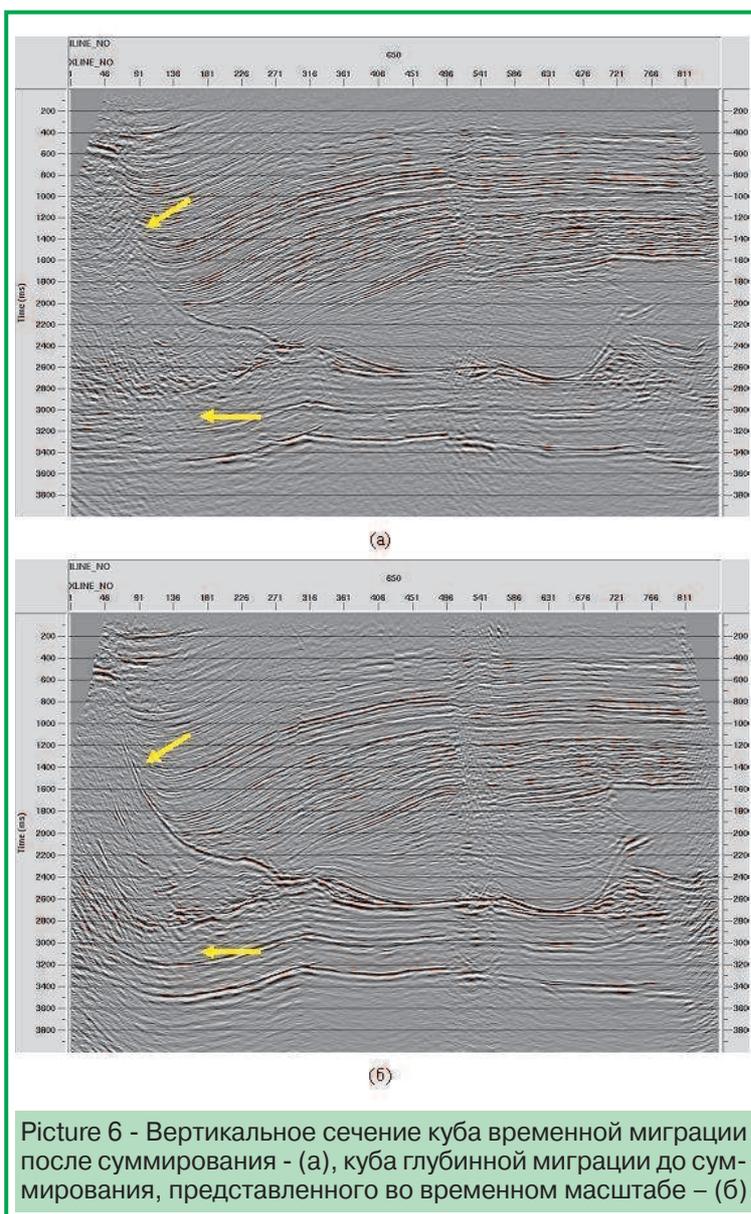
В комплексе программ «СейсмоСкан» реализован расчет времен пробега и амплитуд волн для моделирования волновых функций Грина, основанный на разностном сеточном методе решения 3D уравнений эйконала и уравнений переноса для геометро-лучевых амплитуд волн. Эта особенность выделяет данную программу среди ее известных зарубежных аналогов, позволяя получать результаты более высокого качества.

На вход программы были поданы данные до суммирования, отсортированные по сейсмограммам ОСТ и прошедшие стандартную обработку во временной области, включающую следующие основные процедуры:

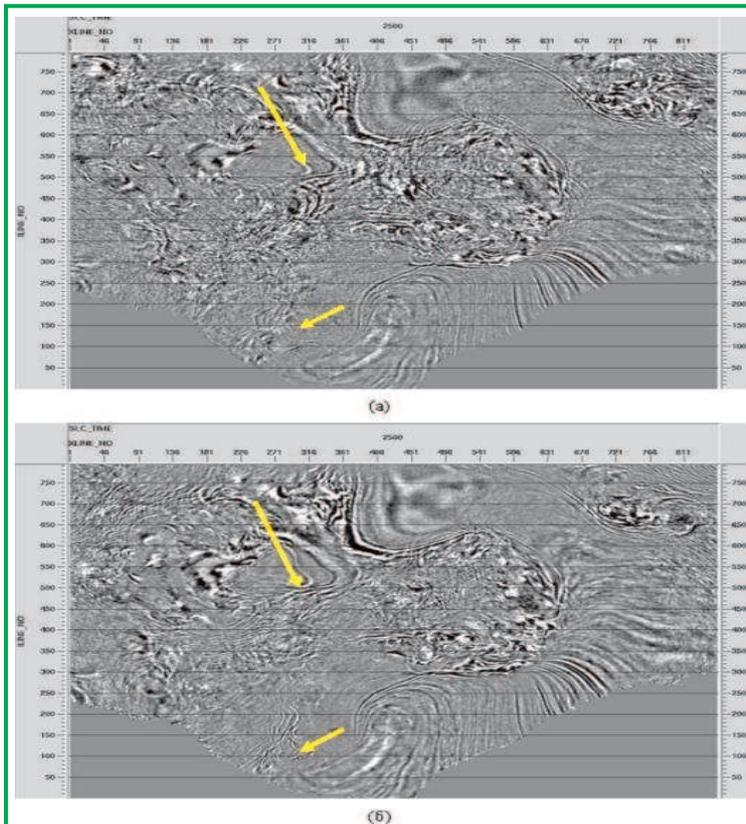
- присвоение геометрии наблюдений данным и их последующее бинирование;
- сигнальную обработку, включающую регулировку амплитуд и полосовую фильтрацию, направлен-

ную на подавление различных помех (в частности – интенсивных поверхностных волн);

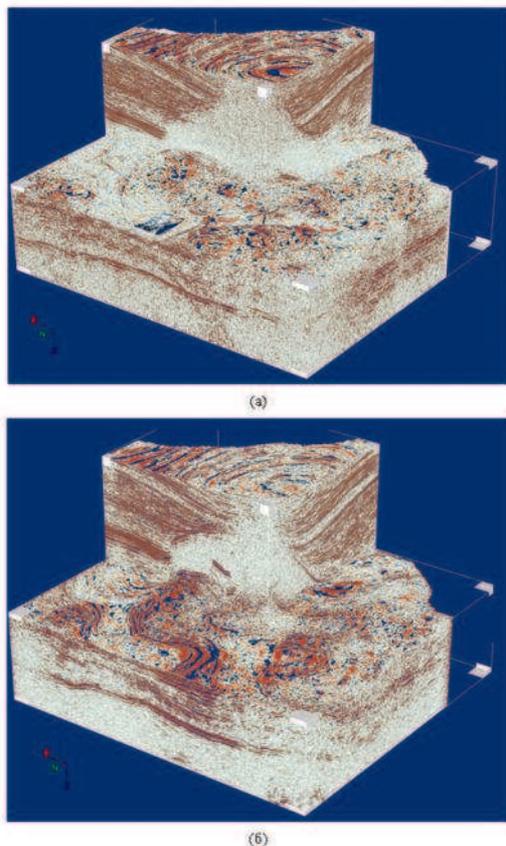
- деконволюцию, направленную на оптимальное сжатие сейсмических сигналов и компенсацию различий их формы из-за искажающего влияния резко неоднородных поверхностных условий возбуждения-приема сейсмических волн;
- расчет и ввод в данные скорректированных статических поправок, компенсирующих влияние резко неоднородной в скоростном отношении верхней части разреза и приводящих все сейсмические данные на единый горизонтальный уровень приведения;
- подбор и ввод в сейсмограммы внешнего мьютинга, отсекающего интенсивные волны первых вступлений с целью избежать интерференции с полезными отраженными волнами, что может привести к искаже-



Picture 6 - Вертикальное сечение куба временной миграции после суммирования - (а), куба глубинной миграции до суммирования, представленного во временном масштабе - (б)



Picture 7 - Горизонтальное сечение куба временной миграции после суммирования (а), куба глубинной миграции до суммирования, представленного во временном масштабе



Picture 8 - Объемное изображение куба временной миграции после суммирования - (а), куба глубинной миграции до суммирования, представленного во временном масштабе - (б)

ниям решения.

Таким образом, на вход программы были поданы сейсмические данные прошедшие все основные процедуры базовой обработки, исключая DMO-преобразование и ввод в данные кинематических поправок.

На рис.4 приведена диаграмма оценки времени первого расчета по пространственным сеткам (9 моделей) со следующими параметрами:

- сетка: 10 Инлайнов x на 10 Кросслайнов
- макс. глубина = 10000м
- шаг по глубине = 10м
- апертура = 10000м

Фактическая продолжительность расчета всех девяти сеток одновременно (включая расчет полей времен и геометро-лучевых амплитуд) составила около 40 часов, при этом одновременно использовалось до 720 ядер; общее количество "чистого" времени на расчет

9 сеток – около 20 000 процессор/час. Время счета не включает трудоемкие процедуры, связанные с транспортом, сортировкой данных и т.п. подготовительными операциями - как с исходными данными, так и с результатами миграции. Основная часть этих операций выполняется автономно (вне кластера).

На рис.5 приведена диаграмма оценки времени полного расчета с окончательной скоростной моделью. Использовались следующие параметры:

- сетка: все Инлайны и Кросслайны
- макс. глубина = 12000м
- шаг по глубине = 5м
- полная апертура = 10000м

Фактическая продолжительность полного счета (включая расчет полей времен и геометро-лучевых амплитуд волн) составила около 16 часов (задачи входили на счет не одновременно), при этом одновременно использовалось до 3450 ядер; общее количество "чистого" времени составило около 20 000 процессор/час.

Обсуждение результатов

Использование суперкомпьютера и примененная технология уточнения модели позволили в разы сократить время на построение окончательной модели интервальных скоростей для выполнения глубинной миграции до

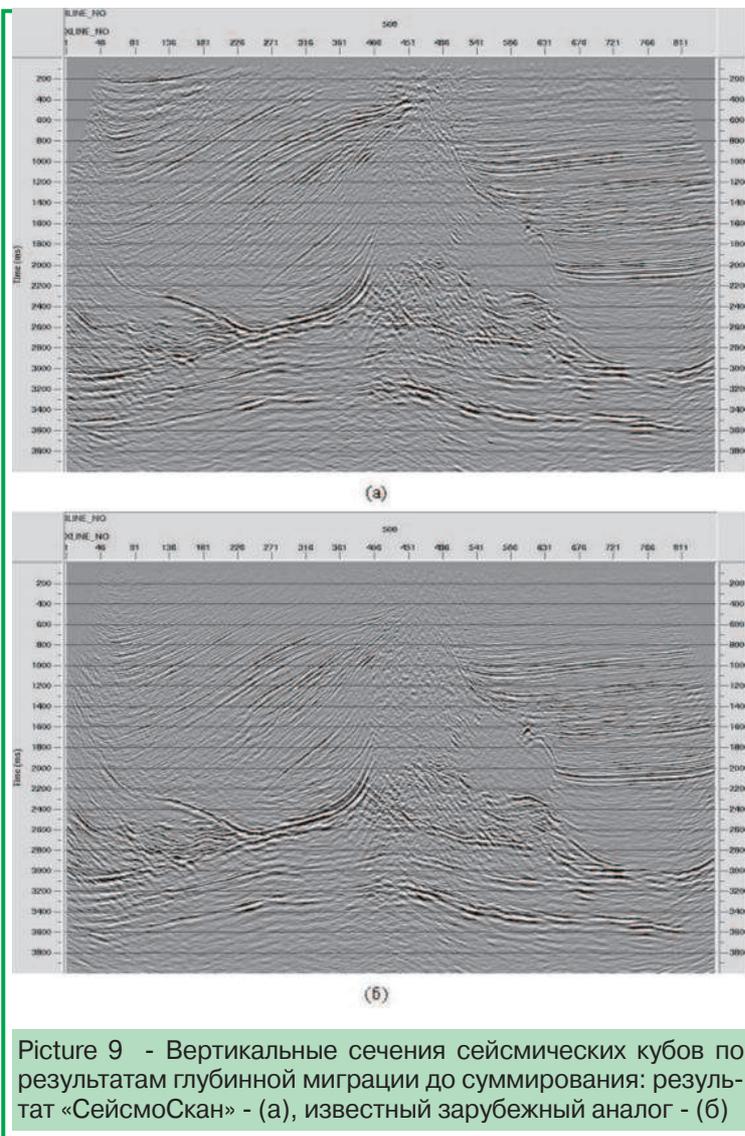
суммирования. Эффективное использование сотен и тысяч доступных процессорных ядер суперкомпьютера «Ломоносов» позволили также за самое короткое время выполнить завершающие расчеты с использованием оптимальных параметров, включая полную апертуру 10 км.

Для анализа качества и корректности полученных результатов проведено сравнение полученных результатов с известными зарубежными аналогами. Как видно из рис. 6-9 в случае сравнения результатов глубинной и временной миграции качество изображения соляных и подсоляных тел значительно выше в случае использования глубинной миграции. Сравнение отечественной и зарубежной глубинных миграций показывает схожие результаты, отличающиеся в деталях. Это свидетельствует о корректности и высоком качестве полученных результатов с использованием отечественной программно-алгоритмической разработки «СейсмоСкан» на суперкомпьютере «Ломоносов».

Применение суперкомпьютеров позволяет значительно сократить время обработки данных для получения сейсмического изображения исследуемой среды. На рис.10 приведена диаграмма временных затрат при проведении обработки современных данных 3Д сейсморазведки с использованием суперкомпьютера «Ломоносов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Complex salt model building using a combination of interactive imaging and layer stripping RTM / Bin Wang, Chuck Mason, Kwangjin Yoon, Jean Ji, Jun Cai, Sang Suh and Zhiming Li, First Break Vol.29, 2011, p47-54
- 2) Seismic traveltome tomography for engineering and exploration applications / Bodo Lehmann, EAGE Publications, 2007
- 3) Velocities, Time-imaging and Depth-imaging in Reflection Seismics. Principles and Methods/ Etienne Robein, EAGE Publications, 2003.



Picture 9 - Вертикальные сечения сейсмических кубов по результатам глубинной миграции до суммирования: результат «СейсмоСкан» - (а), известный зарубежный аналог - (б)



Picture 10 - Распределение относительных временных затрат на проведение полного цикла обработки данных 3Д сейсморазведки с использованием суперкомпьютера «Ломоносов»

- 4) Seismic Data Analysis/Oz Yilmaz, Society of Exploration Geophysics, 2001.
- 5) Теоретические основы и практическое использование отечественной программы 3D-глубинной сейсмической миграции до суммирования/ Г.И.Гогоненков, Б.П.Мороз, А.Л.Плешкевич, В.И.Турчанинов, журнал ЕАГО «Геофизика», № 4, 2007, с. 15-24.