

Трехмерная временная миграция по исходным данным площадной сейсморазведки

© В. Н. Пилипенко, А. О. Верпаховская, В. Б. Будкевич, 2016

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 15 декабря 2015 г.

Представлено членом редколлегии А. В. Кензерой

Методи міграції стандартно поділяють на дві групи щодо виконання процедури підсумовування трас методом загальної глибинної точки: до і після суми (в англійському варіанті pre- і post-stack migration). Незважаючи на те, що для обробки сейсмічних даних частіше використовують міграцію після суми, міграція до суми дає змогу детальніше сформулювати глибинне зображення геологічного середовища, що природно підвищує рівень інтерпретації даних сейсморозвідки. Тому якщо необхідно вивчити всі особливості глибинної будови геологічного середовища, то використання міграції до суми зумовить інформативніший результат, особливо за обробки даних площевої сейсморозвідки в районах зі складною тектонікою. Запропоновано варіант тривимірної часової скінченно-різницевої міграції до суми, що ґрунтується на оберненому продовженні хвильового поля у часовому масштабі глибин, яке реалізовано розв'язанням хвильового рівняння за явною різницевою схемою. Цей підхід гарантує коректний і стійкий розв'язок задачі формування тривимірного зображення середовища, що продемонстровано на практичному прикладі під час обробки даних, спостережених на Краснолиманській площі (район Донбасу).

Ключові слова: тимчасова міграція, площадна сейсморозвідка, розпаралелювання обчислень, міграція за вихідними даними.

Введение. Большая часть сейсморазведочных работ как профильных, так и площадных, как правило, выполняется методом отраженных волн (МОВ) многократными перекрытиями с дальнейшим получением суммарного разреза методом общей глубинной точки (ОГТ) при обработке наблюдаемых данных. Процедура суммирования ОГТ дает возможность в краткие сроки получить необходимую общую информацию о строении района исследований и объектах сейсморазведки. Более детальное изображение глубинного строения геологической среды предоставляет миграция. Методы миграции подразделяются на две группы: выполняемые до суммы ОГТ и после нее (в английском варианте pre- и post-stack migration) [Bancroft, 2007].

Миграция после суммы во временном масштабе глубин в трехмерном варианте, разработанная в Институте геофизики НАН Украины, хорошо зарекомендовала себя при формировании изображения среды с достаточно однородной скоростной характеристикой тонкослоистого разреза с приближенным к горизонталь-

ному напластованию слоев, что характерно для шахтных полей [Пилипенко и др., 2015]. В то же время более качественный результат глубинного изображения, как показывает практика, дает возможность сформировать миграция до суммы.

Миграция до суммы может выполняться как во временном масштабе глубины (time migration), так и в глубинном варианте (depth migration). Глубинная миграция имеет очевидное преимущество по сравнению с временной благодаря высокой точности решения волнового уравнения, которое используется в процессе формирования сейсмического изображения. Однако, несмотря на относительно низкую точность по сравнению с глубинной, временная миграция продолжает сохранять свои позиции в стандартных графах обработки сейсмических материалов. Это обусловлено прежде всего тем, что при глубинной миграции, в отличие от временной, необходимо использовать скоростную модель для миграционного преобразования, которая должна обеспечить высокую точность ре-

зультативного, непосредственно глубинного, изображения. Такие высокие требования к исходной скоростной модели не всегда удается удовлетворить, особенно на ранней стадии разведки. Вместе с тем временная миграция в основном осуществляется при использовании усредненной скоростной модели среды, данные для которой могут быть получены, в частности, в результате обработки сейсмических данных по методике ОГТ, а именно модель среднеквадратичной скорости [Sheriff, 2002]. Сформированное на основе усредненной миграционной модели изображение может в дальнейшем быть откорректировано по глубине при использовании информации, полученной по наблюдениям в скважинах, расположенных, возможно даже в небольшом количестве, на площади разведочных работ. Таким образом, реализация эффективного алгоритма трехмерной миграции во временном масштабе глубины выглядит с практической точки зрения актуальной задачей сейсморазведки.

Среди множества методов миграции предпочтение отдается конечно-разностной миграции благодаря высокой устойчивости и корректности теоретических основ, что гарантирует восстановление на мигрированном разрезе изображений нарушений даже с очень крутыми углами наклона. Преимущества конечно-разностной миграцией до суммы при изучении геологической среды со сложным строением подтверждают многие исследователи [Rajasekaran, McMechan, 1995; Zhu, Lines, 1998; Dai et al., 2002]. Особенно это актуально для обработки данных площадной сейсморазведки, которая в последнее время получила широкое распространение. При этом для быстрой и качественной обработки данных трехмерной сейсморазведки, которые имеют значительный объем, необходимы специальные программы миграции, позволяющие распараллеливать процесс вычисления на кластере.

В общем, если говорить о 3D миграции до суммы, то в основном в научной литературе широко представлены варианты глубинной миграции Кирхгоффа и в спектральной области [Biondi, Palacharla, 1996; Dai et al., 2002; Zhang, Wong, 2010]. Так, в статье [Zhang, Wong, 2010] методы глубинной миграции до суммы разделены на две группы: Кирхгоффа и не Кирхгоффа. Ко второй группе Жанг и Вонг относят разные реализации миграции с решением волнового уравнения с переходом в спектральную область.

В то же время существует отдельная группа разных вариантов миграции в обратном вре-

мени (RTM — reverse time migration), которая в теоретической реализации относится к конечно-разностным подходам и также представлена в глубинном масштабе и трехмерном варианте [Liu et al., 2013]. Необходимо отметить, что все исследователи единодушны в вопросе необходимости при обработке объемных данных площадной сейсморазведки привлекать многопроцессорные вычисления, что у многих и реализовано на практике, однако, как правило, при таких разработках используются графические процессоры для распараллеливания вычислений.

В Институте геофизики НАН Украины выполняются разработки вариантов конечно-разностной миграции, среди которых двумерная миграция до суммы как в глубинном, так и во временном масштабе глубины [Пилипенко и др., 2012]. Поскольку авторы также столкнулись с ограничениями обработки большого объема наблюдаемых данных с применением миграции до суммы на отдельно взятом компьютере даже профильных наблюдений, не говоря уже о площадных данных, были проведены исследования и созданы программы с учетом распараллеливания вычислений на нескольких процессорах, объединенных в кластер [Верпаховская и др., 2013].

Для демонстрации преимуществ применения конечно-разностной временной миграции до суммы при детальном изучении глубинного строения со сложной тектоникой на рис. 1 показаны результаты обработки фрагмента морского сейсмического профиля с применением стандартной миграции суммы ОГТ системы ProMAX и миграции до суммы, разработанной в Институте геофизики НАН Украины. Применение миграции до суммы при обработке данного морского профиля, по мнению интерпретаторов, позволило более качественно изобразить структурное строение целевых отражающих горизонтов [Верпаховская и др., 2013]. Результаты применения конечно-разностной временной миграции до суммы при обработке данных профильной сейсморазведки послужили основой для исследований возможности реализации аналогичных вариантов в трехмерном варианте.

В результате выполненных исследований была разработана конечно-разностная трехмерная временная миграция до суммы, теоретические основы, алгоритм и программная реализация с распараллеливанием процесса вычислений которой представлены в статье. Эффективность ее применения демонстрируется на модельном и практических данных трехмерной сейсмораз-

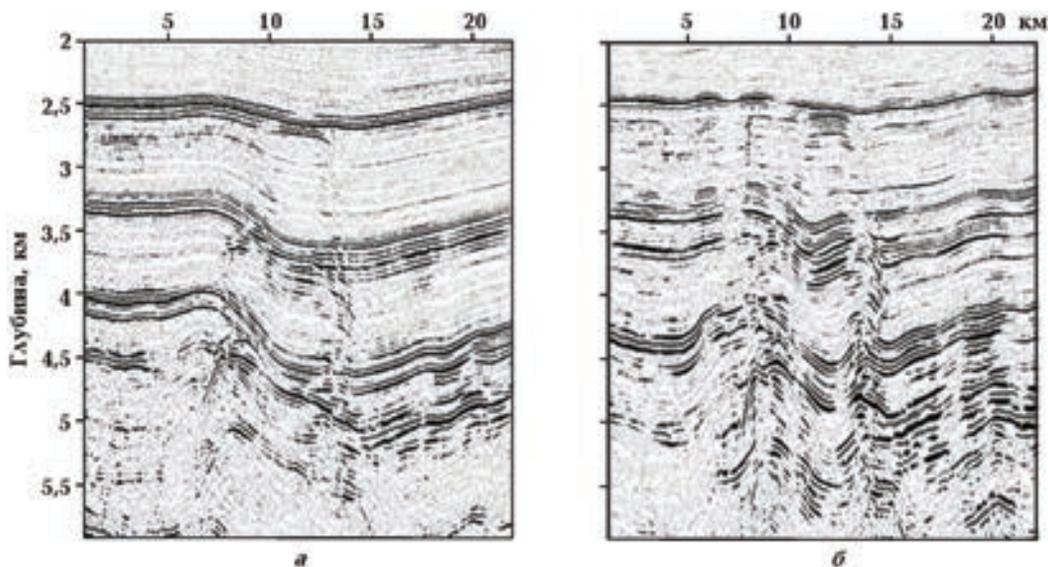


Рис. 1. Результаты обработки фрагмента морского сейсмического профиля, наблюдаемого в районе Черного моря, с применением: миграции суммы ОГТ, реализованной в системе ProMAX (ГПП "Укргеофизика") (а) и конечно-разностной миграции до суммы во временном масштабе глубин (Институт геофизики НАН Украины) (б).

ведки, наблюдаемых на Краснолиманской площади в районе Донбасса.

Теоретические основы трехмерной конечно-разностной временной миграции до суммы. Теоретической основой конечно-разностной миграции являются продолжения волнового и временного полей конечно-разностной аппроксимацией дифференциальных уравнений, волнового и эйконала соответственно на специального вида разностных сетках. При этом выбор сеток должен обеспечивать корректность, а значит, — устойчивость и высокую степень приближения решения разностного уравнения к дифференциальному [Самарский, Гулин, 1973]. Необходимо отметить, что в случае временной миграции до суммы временное продолжение имеет более простые теоретические основы, которые будут представлены ниже.

Рассмотрим более детально продолжения волнового и временного полей в трехмерном варианте, которые выполняются при конечно-разностной миграции во временном масштабе глубин.

Обратное продолжение волнового поля. Скалярное волновое уравнение в трехмерном пространстве в декартовой системе координат имеет следующий вид:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где V — средняя скорость в среде, U — амплитуда волнового поля в любой точке пространства, t — время. При этом скоростная модель среды соответствует распределению средней скорости V для всей площади работ. Локально для каждого пункта возбуждения скорость рассматривается как постоянная величина в горизонтальном направлении и переменная относительно глубины. Такую модель скорости принято использовать при временной миграции [Sheriff, 2002].

Глубина во временном масштабе соответствует замене координаты z на τ :

$$z = \tau V(\tau), \quad (2)$$

где $V(\tau)$ является графиком изменения скорости с глубиной для выбранного пункта возбуждения, для которого формируется изображение.

С учетом уравнения (2), волновое уравнение (1) для отдельного пункта возбуждения в новой системе координат может быть записано в виде

$$V^2(\tau) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2}. \quad (3)$$

Сформулируем конечно-разностную задачу обратного продолжения волнового поля в произвольно выбранном параллелепипеде $P(x, y, \tau)$.

Пусть на земной поверхности в некоторой прямоугольной области $Q(x, y)$, ограниченной

значениями по координатным осям $0 \leq x \leq x_{\max}$, $0 \leq y \leq y_{\max}$, задана функция $U_0(x, y, t)$ при $0 \leq t \leq t_{\max}$, соответствующая наблюдаемому на земной поверхности волновому полю и определяющая граничное условие:

$$U(x, y, 0, t) = U_0(x, y, t). \quad (4)$$

При этом $U(x, y, \tau, t)$ — волновое поле, которое необходимо рассчитать в параллелепипеде $P(x, y, \tau)$, верхней гранью которого является область $Q(x, y)$ и размеры которого составляют $x_{\max} \times y_{\max} \times \tau_{\max}$, где τ_{\max} — максимальная глубина во временном масштабе.

Кроме основного граничного условия (4) в конечно-разностной задаче обратного продолжения волнового поля рассматриваются также дополнительные:

$$\begin{aligned} U(0, y, \tau, t) &= U(x_{\max}, y, \tau, t) = 0, 0, \\ U(x, 0, \tau, t) &= U(x, y_{\max}, \tau, t) = 0, 0, \\ U(x, y, \tau_{\max}, t) &= 0, 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Для отдельного пункта возбуждения, расположенного на координатах x, y , при миграционном преобразовании волнового поля необходимо иметь определенную скоростную функцию $V(\tau) = V(x, y, \tau)$.

Конечно-разностное обратное продолжение волнового поля в трехмерной среде реализовано аппроксимацией волнового уравнения (3) на четырехмерной пространственно-временной сетке. Для формирования сетки в выбранной нами области расчета волнового поля зададим сеточные шаги $\Delta x, \Delta y, \Delta \tau, \Delta t$ соответственно по пространственным x, y и глубинной в масштабе времени τ осям, а также оси времени t . Таким образом, количество узлов разностной сетки по отдельным осям координат будет составлять:

$$\begin{aligned} n &= x_{\max} / \Delta x + 1; & m &= y_{\max} / \Delta y + 1, \\ p &= \tau_{\max} / \Delta \tau + 1; & s &= t_{\max} / \Delta t + 1. \end{aligned}$$

Определим систему сеточных координат i, j, k, l , которые соответствуют осям выбранной системы координат x, y, τ, t , а также размерам заданной области вычислений $0 \leq i \leq n; 0 \leq j \leq m; 0 \leq l \leq p; 0 \leq k \leq s$.

На рис. 2 показан девятиточечный шаблон определенной нами разностной сетки для обратного продолжения волнового поля в трехмерной среде.

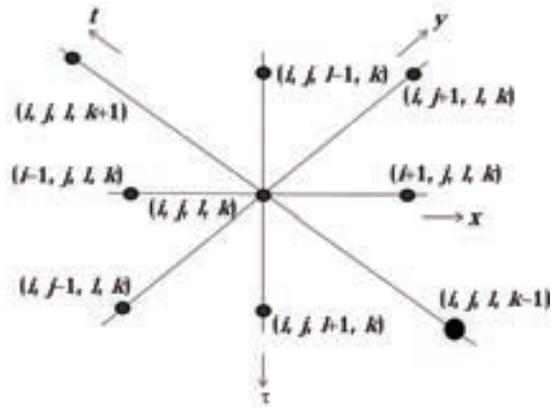


Рис. 2. Сеточный разностный шаблон для трехмерного обратного продолжения волнового поля. Черной точкой показан узел, в котором определяется значение волнового поля.

Поскольку продолжение волнового поля выполняется в обратном направлении, начальным условием будут значения поля в узлах сетки на последних временных уровнях $s-1$ и s :

$$U_{i,j,l}^{s-1} = U_{i,j,l}^s = 0, 0, \quad (6)$$

где $U_{i,j,l}^s$ — значение волнового поля в сеточном узле (i, j, l, k) .

При выборе конечно-разностной схемы необходимо, чтобы она обеспечивала, в первую очередь, корректное решение исходного дифференциального уравнения, в нашем случае волнового уравнения (3). Корректность решения определяется устойчивостью сеточных расчетов и высокой степенью аппроксимации конечно-разностного решения к дифференциальному [Самарский, 1971].

Конечно-разностная аппроксимация волнового уравнения (3) может быть выполнена с использованием как явной, так и неявной разностной схемы. Явная позволяет определять значения волнового поля в любом узле сетки и обеспечивает достаточно большую скорость расчетов. В то же время она требует определенного соотношения шагов сетки, которое выражается в виде условия устойчивости разностного решения. Неявная схема конечно-разностного решения гораздо медленнее, но обеспечивает абсолютную устойчивость вычислений при произвольном выборе сеточных шагов. В этом случае выбор шагов сетки должен удовлетворять только условию качественной аппроксимации дифференциального волнового уравнения, разностным на заданной сетке. Как показывает многолетний опыт применения конечно-разност-

ного продолжения волнового поля в процедурах миграции и моделирования при обработке сейсмических наблюдений, удовлетворительная аппроксимация волнового уравнения на сетке достигается при 5—10 сеточных шагах на период сейсмической волны.

Поскольку скорость вычислений имеет важное значение при обработке данных трехмерной сейсморазведки, в данной статье рассматривается явная разностная схема трехмерного обратного продолжения волнового поля, которая для уравнения (3) может быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 U_{i,j,l}^{k-1} = & 2U_{i,j,l}^k - U_{i,j,l}^{k+1} + \\
 & + \frac{V_l^2 \Delta t^2}{\Delta x^2} \left(U_{i+1,j,l}^k - 2U_{i,j,l}^k + U_{i-1,j,l}^k \right) + \\
 & + \frac{V_l^2 \Delta t^2}{\Delta y^2} \left(U_{i,j+1,l}^k - 2U_{i,j,l}^k + U_{i,j-1,l}^k \right) + \\
 & + \frac{\Delta t^2}{\Delta \tau^2} \left(U_{i,j,l+1}^k - 2U_{i,j,l}^k + U_{i,j,l-1}^k \right). \quad (7)
 \end{aligned}$$

Обратное конечно-разностное продолжение заключается в определении значений волнового поля последовательно на временном уровне $k-1$ по уже определенным значениям поля на временных уровнях k и $k+1$ согласно уравнению (7) и разностному шаблону сетки, показанному на рис. 2. Волновое поле рассчитывается с учетом начального условия (6) и граничных условий (4), (5).

Присутствующая в уравнении (7) скоростная функция V_l определяется путем вычисления интервальной скорости с использованием данных о распределении среднеквадратичной скорости V_{rms} в районе проведения работ, которые обычно получают на предварительном этапе трехмерных сейсмических исследований [Шериф, Гелдарт, 1987].

Интервальная или пластовая скорость рассчитывается по формуле Дикса [Sheriff, 2002]:

$$V_l = \left[\frac{V_n^2 t_n - V_{n-1}^2 t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \right]^{1/2}, \quad (8)$$

где V_l — пластовая скорость сейсмических волн

в интервале времени $t_n - t_{n-1}$; V_{n-1}, t_{n-1} — скорость V_{rms} и время в верхней части пласта; V_n, t_n — скорость V_{rms} и время в нижней части пласта.

Устойчивость разностных вычислений имеет место при условии выполнения неравенства [Самарский, Гулин, 1973, с. 303]

$$\begin{aligned}
 \Delta t < & \\
 & < \frac{\Delta x \Delta y \Delta \tau}{\sqrt{\Delta x^2 \Delta y^2 + \Delta \tau^2 (V_l^2)_{\max} (\Delta x^2 + \Delta y^2)}}. \quad (9)
 \end{aligned}$$

Таким образом, задача обратного конечно-разностного продолжения волнового поля во временном масштабе глубин с земной поверхности в глубину формулируется следующим образом. Уравнение (7) с учетом начального нулевого условия на максимальном времени регистрации волнового поля (6), граничного условия в виде наблюдаемого поля на земной поверхности (4), а также нулевых граничных условий на других гранях пространственной сетки (5) обеспечивает последовательное восстановление волнового поля на трехмерной пространственной сетке на каждом временном уровне, начиная с максимального времени. Данная конечно-разностная схема является устойчивой при выполнении соотношения шагов сетки согласно неравенству (9).

Поскольку формирование изображения происходит путем выбора значений продолженного волнового поля во времени, которое соответствует прямому продолженному временному полю от источника, рассмотрим его теоретические основы.

Прямое продолжение временного поля точечного источника в трехмерной среде. Для формирования изображения среды с применением миграции до суммы во временном масштабе глубины необходимо рассчитать время прохождения сейсмических волн от источника колебаний до каждого узла пространственной сетки, где происходит обратное продолжение волнового поля $U_{i,j,l}^k$ (7).

Относительно каждого узла трехмерной сетки формирования изображения определяется расстояние до пункта возбуждения колебаний. Время прохождения прямой волны в каждый конкретный узел вычисляется в соответствии со скоростной моделью среды в виде трехмерной матрицы среднеквадратичной скорости V_{RMS} . Таким образом, получаем значения временно-

го поля в каждом узле разностной пространственной трехмерной сетки.

Результативный куб изображения изучаемой среды формируется путем суммирования индивидуальных изображений по каждому пункту возбуждения, количество которых зависит от системы наблюдений.

Программная реализация формирования миграционного изображения до суммы во временном масштабе глубин с распараллеливанием процесса вычислений. При разработке программного обеспечения, которое предполагает обработку сейсмических данных большого объема, в частности наблюдений трехмерной сейсморазведки, необходимо учитывать требования к компьютерным ресурсам, которые должны обеспечить как значительные объемы памяти, так и скорость вычислений, обмена данными и хранения результатов. Если учитывать, что профильные данные, которые нацелены на детальность изучения глубинного строения района исследований имеют большие объемы исходной информации, то зарегистрированные волновые поля трехмерной сейсморазведки даже небольшой площади превышают их в сотни раз.

При этом для качественной миграции до суммы необходимо использовать малые сеточные шаги, что также увеличивает объем результативного куба. Принимая во внимание вышеизложенное, становится понятно, что на отдельно взятом компьютере выполнить полноценную обработку современных сейсмических данных просто невозможно. Поэтому при разработке программного обеспечения трехмерной миграции до суммы во временном масштабе глубин при составлении алгоритма было предусмотрено распараллеливание вычислений на нескольких процессорах, объединенных в кластер.

На рис. 3 показана блок-схема программы формирования трехмерного изображения среды до суммы во временном масштабе глубин с распараллеливанием процесса вычислений на произвольное количество процессоров. Рассмотрим более детально отдельные составляющие блок-схемы, которые непосредственно влияют как на качество обработки, так и на корректность результативного куба изображений.

Подготовка входной сейсмической информации. Для миграции каждого отдельного пункта возбуждения входной информацией является выборка сейсмических трасс, относящихся к этому пункту взрыва согласно системе наблюдений в стандартном формате SEG-Y [Noris, Falchney, 2002; Cohen, Stockwell, 2011] и с внесенны-

ми координатами в паспорта трасс. Лучше, когда наблюдаемые поля прошли предварительную обработку, которая заключается в вычислении и коррекции статических поправок, а также удалении волн-помех.

Поскольку расположение пунктов наблюдения на площади работ может быть неравномерным, на этом этапе для каждого пункта возбуждения предусмотрено определение трехмерного массива входных сейсмических данных с фиксированными шагами по времени и в пространстве. С этой целью реализуется необходимая интерполяция, которая выполняется с использованием весовых коэффициентов, определяющих долю вклада значения каждой соседней трассы в значение формирующейся трассы. Эта доля обратно пропорциональна расстоянию между этими трассами. Сформированные таким образом равномерно расположенные трассы создают трехмерный массив входного волнового поля для каждого пункта возбуждения без паспортов трасс, что позволяет приспособить данный куб к любому формату.

Подбор миграционных параметров. Для миграционных преобразований с учетом распределения процесса вычислений на кластере готовится отдельный файл входных параметров для площади работ, который содержит следующую информацию:

- общее количество процессоров, которые будут участвовать в вычислениях; ограничивается только возможностями имеющегося компьютерного оборудования;
- название директории с файлами, в которых дана информация о параметрах входных кубов данных для каждого пункта возбуждения, а именно: координаты пункта возбуждения $xsh, ysh, \tau sh$; координаты x, y, t , первого узла куба; количество шагов по координатам nx, ny, nt ; значение шагов dx, dy, dt ;
- название директории с входными кубами волнового поля;
- название файла с кубом скорости для площади работ;
- название директории с контрольными файлами выполнения вычислений на каждом процессоре;
- название файла с таблицей соответствия номера пункта возбуждения и его порядкового номера в очереди на выполнение вычислений;
- информация о координатах первого узла скоростного куба xv, yv, tv , пространственные шаги по осям координат dxv, dyv, dtv , количество шагов по осям nxv, nyv, ntv ;

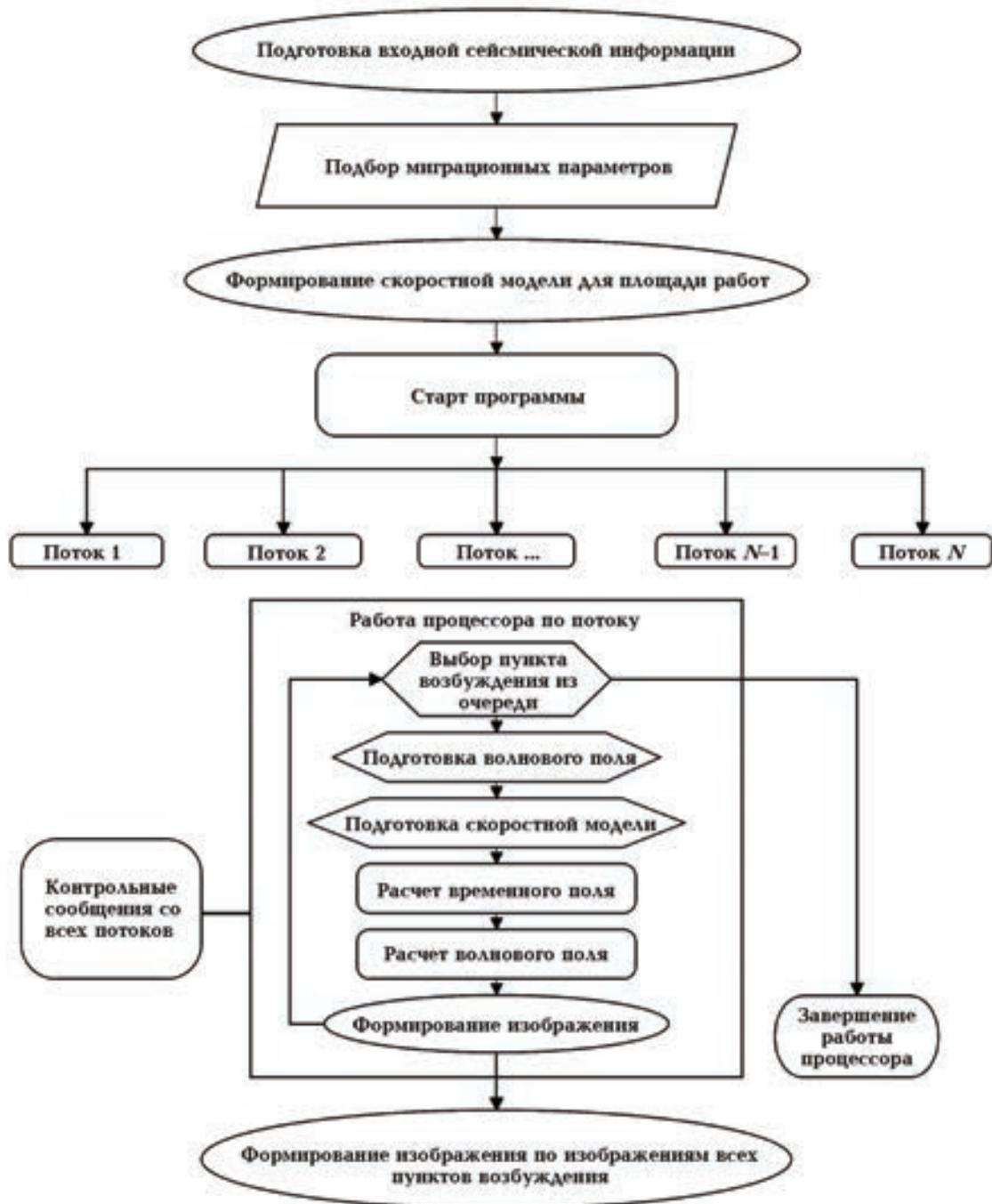


Рис. 3. Блок-схема программы трехмерной конечно-разностной миграции до суммы с режимом многопроцессорных вычислений.

- количество дополнительных сеточных шагов по краям разностной сетки, которые необходимы для исключения нежелательного отражения волн от краев сетки при обратном продолжении волнового поля; определяется в зависимости от максимального времени регистрации волнового поля;
- значение шагов разностной сетки, которая используется для обратного продолжения волнового поля dxg , $d yg$, $d \tau g$; шаг по оси времени $d \tau g$ определяется в процессе вычислений. *Подготовка скоростной модели среды.* Для выполнения миграции волнового поля необходима скоростная модель среды, которая в дан-

ном случае предоставляется в виде отдельного куба данных. Параметры куба устанавливаются в процессе подбора миграционных параметров. При этом необходимым условием задания куба скорости является полное покрытие им всей области расчетов изображения включительно с дополнительными узлами разностной сетки. В качестве базовой модели для вычислений может быть использована среднеквадратическая скорость V_{rms} , которую получают в процессе обработки материалов ОГТ.

Организация вычислительного процесса. Все предварительные этапы подготовки входных данных выполняются непосредственно перед запуском процесса вычислений с помощью отдельных вспомогательных программ, которые не входят в основной вычислительный программный комплекс, состоящий из пяти программ, написанных на языке С.

Главная задача организации вычислительного процесса состоит в распределении выполнения миграции волнового поля каждого пункта возбуждения согласно очередности и количеству указанных во входной информации активных процессоров.

Вычисления начинаются при запуске всех процессоров. При этом все процессоры работают параллельно и независимо друг от друга. Каждый процессор берет из очереди пункт возбуждения, который еще не был в обработке, и выполняет все расчеты для формирования куба изображения среды с учетом всей относящейся к выбранному пункту возбуждения входной информации. После завершения всех вычислений по выбранному пункту возбуждения процессор обращается к очереди за следующим необработанным пунктом. Если же необработанных пунктов возбуждения в очереди уже нет, данный процессор прекращает свою работу. Вычислительный процесс заканчивается в момент прекращения работы всех задействованных процессоров.

Организация вычислений на отдельном процессоре. Работа процессора начинается с трансформации куба входных сейсмических данных в набор временных срезов волнового поля, которые сохраняются в дисковой памяти и последовательно вызываются в оперативную память для вычислений. Из входного куба скорости, который соответствует всей площади работ, выделяется только та часть информации, которая соответствует выбранному для расчетов пункту возбуждения. На основании этой информации формируется сеточная функция интервальной скорости для выполнения обратного продолжения волнового поля.

Перед процессом обратного продолжения волнового поля на разностной сетке определяется временное поле, а именно рассчитывается время прихода волны из точки источника во все узлы сетки, где планируется вычисление волнового поля. При этом для расчета временного поля используются скоростные данные V_{rms} , которые предварительно определены в узлах этой разностной сетки.

Наиболее объемным этапом вычислений является обратное продолжение волнового поля, которое выполняется шаг за шагом с использованием временных срезов волнового поля, полученных на предыдущих циклах расчетов, согласно конечно-разностной схеме (7). Условие формирования изображения среды состоит в том, что значение волнового поля в конкретном узле сетки принадлежит изображению, если в этом узле совпадают значения временного поля и время рассчитанного волнового среза. Согласно этому условию происходит формирование результирующего куба изображения для выбранного пункта возбуждения.

Формирование куба изображения среды площади работ. После завершения работы всех процессоров происходит формирование результирующего куба изображения среды для исследуемой площади работ. Данный куб готовится путем суммирования полученных отдельных миграционных изображений по всем пунктам возбуждения согласно параметрам системы наблюдений. Группа программ, которая выполняет суммирование, работает автономно и не связана с работой комплекса распараллеливания процесса вычислений.

Разработанный программный комплекс был опробован на реальных данных трехмерной сейсморазведки, наблюдаемых на Краснолиманской площади в районе Донбасса.

Практический пример. Для экспериментов были использованы материалы пространственной сейсморазведки, полученные в Добропольском и Красноармейском районах Донецкой области на территории промышленной деятельности угольной компании "Краснолиманская". Полевые работы проводились подразделением Приднепровской геофизической разведывательной экспедиции (ПГРЭ) ДГП "Укргеофизика" в 2008 г. по технологии площадной сейсмической съемки (3D) методом отраженных волн многократными перекрытиями. Трехмерные работы на площади выполнялись по технологии ортогональной системы наблюдений типа "крест" по общепринятой методике ОГТ. Описание полной системы работ по площади было приведе-

но в статье, где рассматривалась трехмерная миграция суммы ОГТ с данным примером [Пилипенко и др., 2015]. Работа выполнялась совместно с сотрудниками УкрНИМИ НАНУ (Донецк), которые рассчитали априорные статические поправки и сделали бинирование первичного материала по сетке ОГТ 10×10 м. Их результативный куб составлял 152 инлайна и 361 кросслайн. Для примера эффективности применения трехмерной конечно-разностной миграции до суммы была использована часть куба с 5 по 148 инлайнов и с 145 по 348 кросслайнов. Количество пунктов возбуждения при этом сократилось от 2304 600-канальных до 1024 разной (в среднем 369) канальности, а общее количество трасс стало 378 000. Кроме этого, длина записи была уменьшена от 3072 до 1700 мс.

Подготовка материала для выполнения миграционных преобразований состояла из двух

этапов: обработки и переформатирования первичных волновых полей. На первом этапе была выполнена коррекция остаточных статических поправок и проведено подавление волн-помех, что подразумевало удаление "звуковой" волны и подавления определенных (50 Гц) частот в спектре волнового поля. Кроме того, выполнялась нуль-фазовая полосная частотная фильтрация. Анализ полученных результатов позволил сделать важный вывод, что выполнение коррекции остаточных статических поправок [Дядюра, Будкевич, 2005] существенно повышает коррелируемость записей. На рис. 4 показана эффективность применения процедур подготовки наблюдаемых данных к дальнейшему применению миграции до суммы.

Второй этап подготовки наблюдаемого волнового поля заключался в трансформации зарегистрированных данных к виду, необходи-

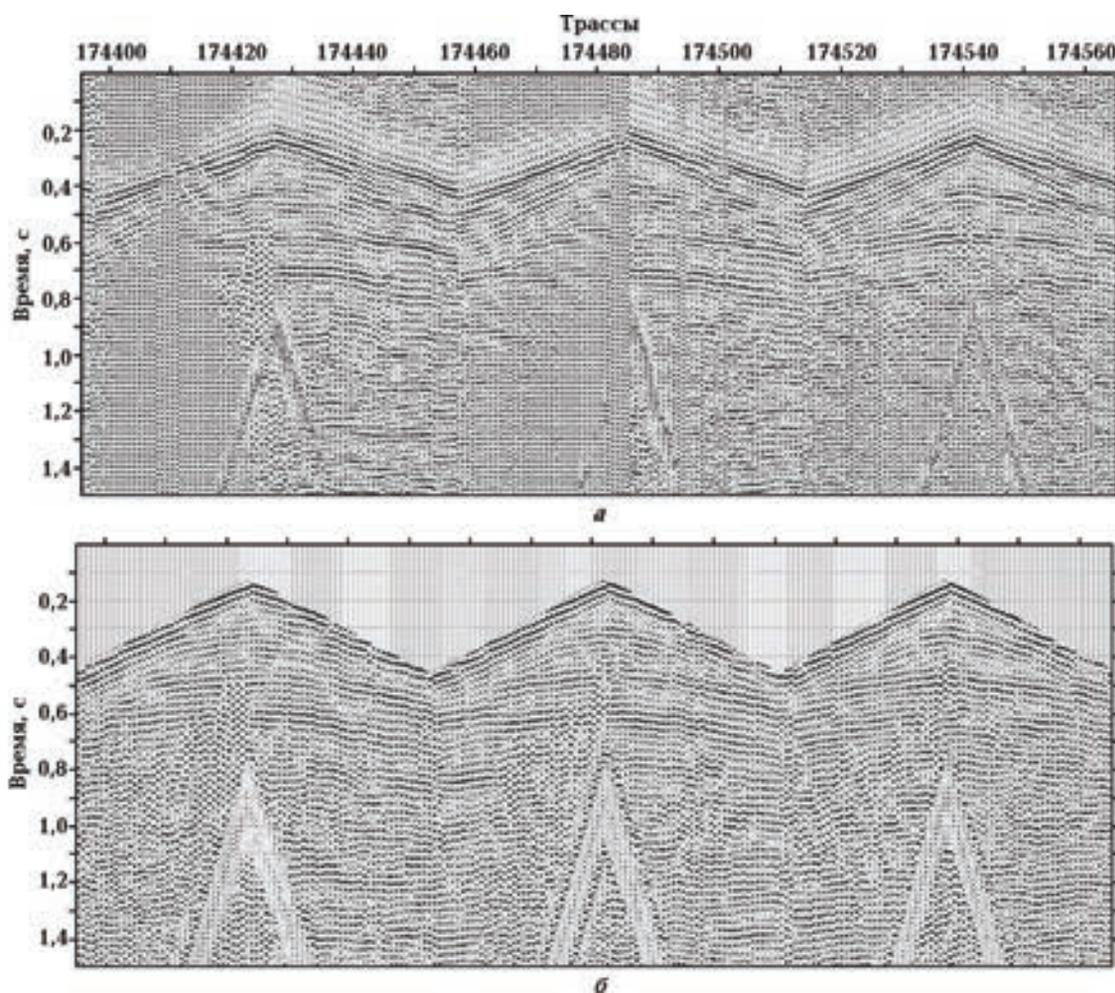


Рис. 4. Фрагмент куба волнового поля пункта возбуждения 966 (три среза): *а* — исходное волновое поле, *б* — после предварительной подготовки данных к выполнению миграции.

тому для выполнения миграционных преобразований, что включало: запись данных по каждому пункту возбуждения в отдельный файл с определением его предельных координат; поворот системы координат таким образом, чтобы направление линий приема колебаний (инлайн) совпадало с направлением оси X системы прямоугольных координат, с фиксированием новых координат в соответствующих ячейках паспорта трассы.

Еще одной проблемой второго этапа подготовки наблюдаемых данных стало определение угла поворота системы координат, для решения которой за основу был взят алгоритм, используемый для решения аналогичной задачи в программе RUST3D [Дядюра, Будкевич, 2005]. Данный алгоритм был усовершенствован путем пересмотра критерия выбора трасс, которые подходят для расчета, и исследования влияния на точность процесса вычислений значений некоторых констант, которые при этом задействованы. Таким образом, критерием точности определен тот факт, что при повторном расчете углов поворота системы координат с использованием откорректированных координат получаются нулевые значения.

После выполнения подготовки исходного куба волнового поля к нему была применена трехмерная конечно-разностная миграция до суммы согласно разработанной блок-схеме (см. рис. 3). При этом в качестве скоростной модели для вычислений были использованы скоростные данные, которые применяли сотрудники УкрНИМИ при обработке и интерпретации наблюдений на этой площади. Для каждого пункта возбуждения автоматически определялась трехмерная область вычислений, которая дополнялась 50 узлами сетки во всех направлениях с целью устранения помех, связанных с краевыми эффектами при расчетах.

Наблюдаемое волновое поле каждого пункта возбуждения проектировалось на равномерную сетку путем интерполяции и экстраполяции с шагом по пространственным координатам в 10 м, а по глубине — 0,002 с. Шаг по времени определялся автоматически в процессе вычислений и индивидуально для каждого пункта возбуждения согласно формуле (9).

По выбранному для примера фрагменту площади с общим количеством обрабатываемых пунктов возбуждения 1024 были получены соответственно для каждого 1024 миграционных куба изображения. При этом для выполнения вычислений было задействовано четыре процессора, благодаря чему общее время расчетов составило около 48 часов.

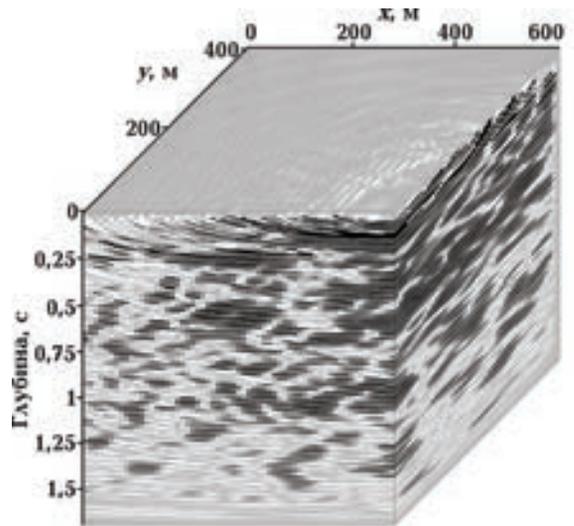


Рис. 5. Куб изображения пункта возбуждения 966, полученный с применением трехмерной конечно-разностной миграции до суммы во временном масштабе глубин.

На рис. 5 показан фрагмент индивидуального куба изображения, полученного при миграции волнового поля пункта возбуждения 966, расположенного в верхнем правом углу куба. По отдельным миграционным изображениям, полученным для всех 1024 пунктов возбуждения, был сформирован суммарный куб во временном масштабе глубины, который показан на рис. 6.

На рис. 7 для демонстрации внутренней неоднородности строения изучаемой среды показаны диагональные срезы суммарного куба изображений.

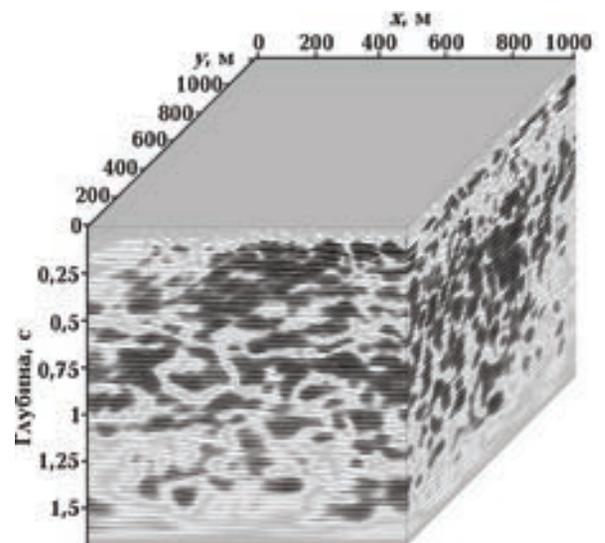


Рис. 6. Фрагмент суммарного куба изображения, сформированного по отдельным миграционным кубам изображений 1024 пунктов возбуждения.

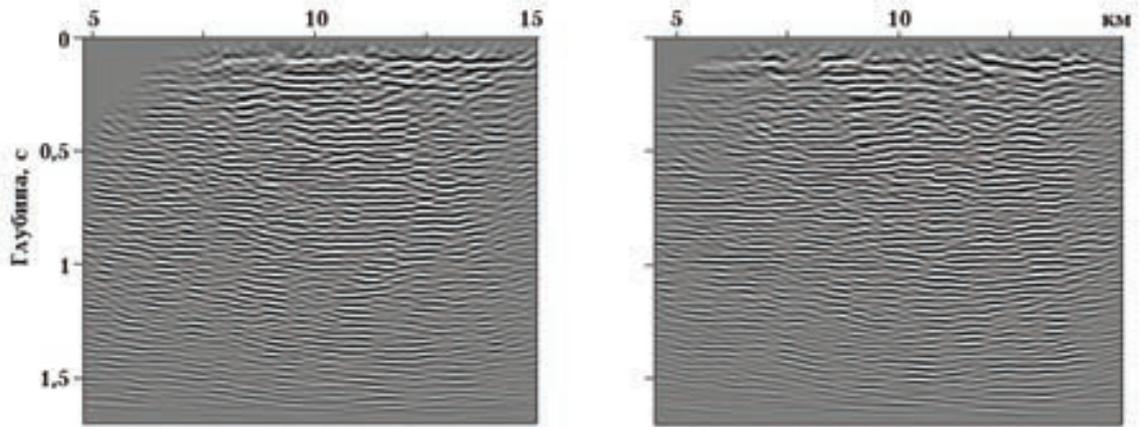


Рис. 7. Диагональные срезы суммарного куба изображения, показанного на рис. 6.

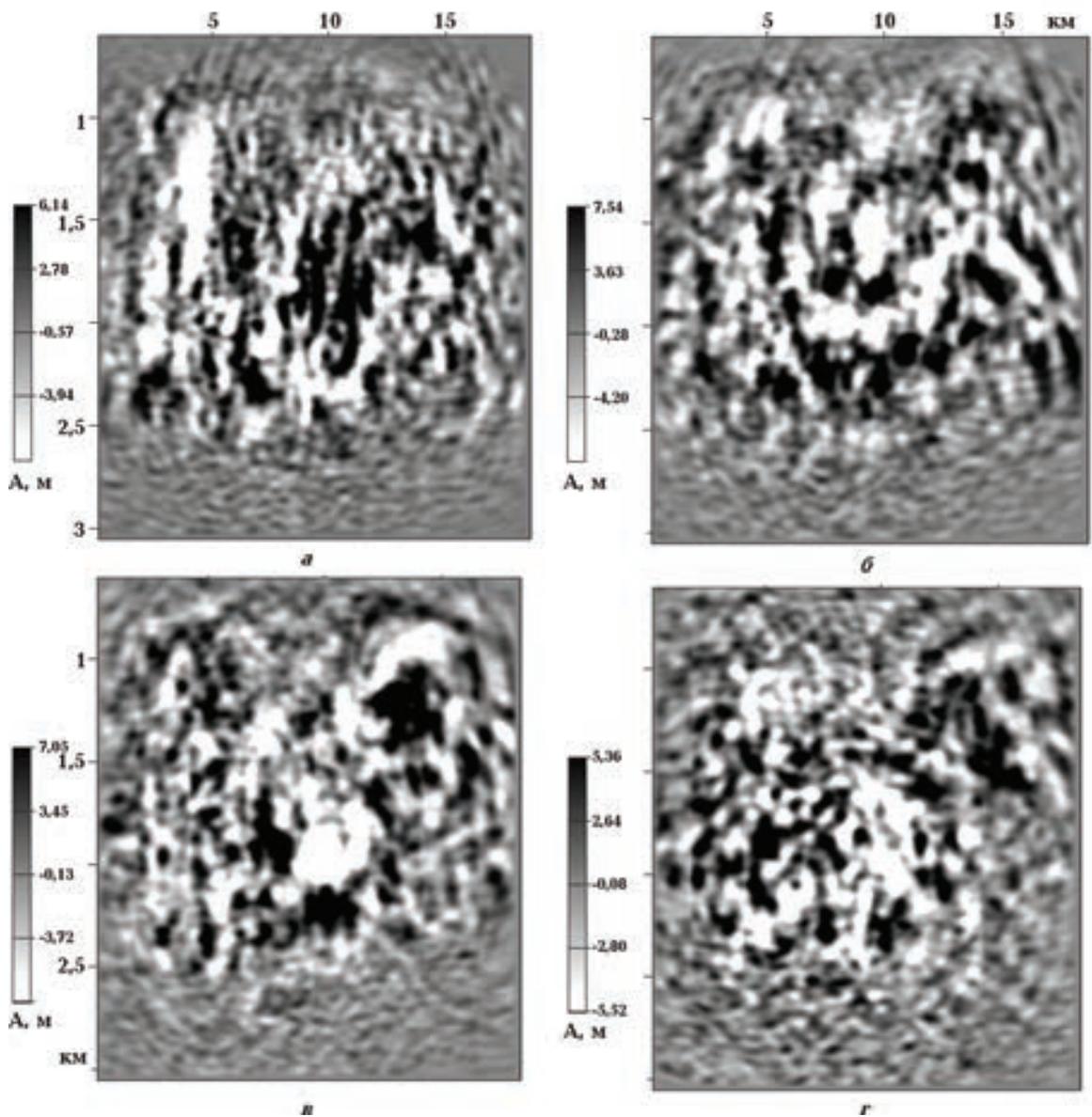


Рис. 8. Отдельные срезы суммарного куба (см. рис. 6) по глубине в масштабе времени: *а* — 0,47 с, *б* — 0,58 с, *в* — 0,72 с, *г* — 0,88 с.

ражений (см. рис. 6), а на рис. 8 приведены четыре разных сечения по глубине.

Выводы. 3D конечно-разностная миграция до суммы во временном масштабе глубин, рассмотренная в статье, как показано на практическом примере, является эффективным инструментом обработки данных площадной сейсморазведки для их качественной интерпретации. Применение трехмерной миграции до суммы осложнено высокими требованиями к компьютерным ресурсам, а именно невозможностью выполнить все расчеты на отдельном компьютере в сжатые сроки. Данная проблема решается путем программной реализации мигра-

ционных процедур с привлечением распараллеливания процесса вычислений на кластере, блок-схема которой разработана для трехмерной конечно-разностной миграции до суммы во временном масштабе глубин.

Эффективность программ, созданных на основе разработанной блок-схемы с распараллеливанием вычислений при выполнении конечно-разностной миграции до суммы во временном масштабе глубин на произвольном количестве процессоров, подтверждена результатами их применения при обработке реальных данных трехмерной сейсморазведки, наблюдаемых на Краснолиманской площади в районе Донбасса.

Список литературы

- Верпаховская А.О., Пилипенко В.М., Пилипенко Е.В., Сигоренко Г.Д. Миграция исходных сейсмограмм и моделирование волнового поля с распараллеливанием процесса вычислений на кластере. *Геоинформатика*. 2013. № 3. С. 1—12.
- Дядюра В.А., Будкевич В.Б. Определение корректирующих статических поправок по ансамблям равноудаленных трасс сейсморазведки 3D. В кн.: *Сборник научных трудов УкрГПРИ*. Киев, 2005. № 3. С. 71—83.
- Пилипенко В.Н., Верпаховская А.О., Будкевич В.Б., Пилипенко Е.В. Формирование трехмерного изображения среды по сумме ОГТ для изучения геологического строения шахтных полей. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 4. С. 104—113.
- Пилипенко В.Н., Верпаховская А.О., Гневуш В.В. Конечно-разностная волновая миграция исходных сейсмограмм общего пункта взрыва во временной области. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 3. С. 40—48.
- Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. Москва: Наука, 1971. 552 с.
- Самарский А.А., Гулин А.В. Устойчивость разностных схем. Москва: Наука, 1973. 415 с.
- Шериф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка. Т. 2. Москва: Мир, 1987. 400 с.
- Bancroft J. C., 2007. A Practical Understanding of Pre- and Poststack migration. Vol. 1 (Poststack). Is. 13 of Course notes series. SEG Books, Science. 486 p.
- Biondi B., Palacharla G., 1996. 3D prestack migration of common-azimuth data. *Geophysics* 61, 1822—1832.
- Cohen J. K., Stockwell Jr. J. W., 2011. CWP/SU: Seismic Unix Release № 43R2, an open source software package for seismic research and processing. Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines. 889 p.
- Dai N., Willacy C. N., Pascual R. V., Gochioco L. M., Sun Y., Mechem B. B., 2002. 3D wave equation PSDM optimizes and improves imaging of subsalt prospects. *The Leading Edge* (12), 1224—1226.
- Liu G., Liu Y., Ren L., Meng X., 2013. 3D seismic reverse time migration on GPGPU. *Computers & Geosciences* 59, 17—23.
- Noris M. W., Falchney A. K., 2002. SEG Y rev1 Data Exchange, format 1. Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists. 49 p.
- Rajasekaran S., McMechan G. A., 1995. Prestack processing of land data with complex topography. *Geophysics* 60, 1875—1886.
- Sheriff R. E., 2002. Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics. Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists. 402 p.
- Zhang W., Wong Y., 2010. Efficient parallel hybrid computations for three-dimensional wave equation prestack depth imaging. *International Journal of Numerical Analysis and Modeling* 7, 373—391.
- Zhu J., Lines L. R., 1998. Comparison of Kirchhoff and reverse-time migration methods with applications to prestack depth imaging of complex structures. *Geophysics* 63 (4), 1166—1176.

Three-dimensional temporal migration according to initial data of areal seismic exploration

© V.N. Pilipenko, A.O. Verpakhovskaya, V.B. Budkevich, 2016

Migration methods are traditionally subdivided into two groups depending on carrying out the procedure of summing up the route by the method of common deep point (CDP): before and after summing up (pre- and post-stack migration in English variant). Despite the fact that while processing seismic data we use post-stack migration more often, pre-stack migration allows producing deep image of geological medium in more details that naturally increases the quality of interpretation of seismic exploration data. Therefore in the case when we need to study all the features of deep structure of geological environment, pre-stack migration will give us more informative result, especially while processing the data of areal seismic exploration in the areas with complicated tectonics. A variant of three-dimensional temporal finite-difference pre-stack migration has been proposed based on reverse extension of the wave field in temporal scale of depth, realized by solving of wave equation by obvious residual scheme. This approach guarantees a correct and steady solving of the problem of producing three-dimensional image of the environment demonstrated by practical example of processing the data, observed in Krasnolymansk area (Donbass region).

Key words: temporary migration, areal seismic exploration, parallelization of computations, migration of the original data.

References

- Verpakhovskaya A. O., Pilipenko V. M., Pilipenko E. V., Sidorenko G. D., 2013. A finite-difference method of pre-stack migration procedures and modeling of the wave field with parallelizing of calculation on cluster. *Geoinformatika* (3), 1—12 (in Russian).
- Dyadyura V. A., Budkevich V. B., 2005. Defining corrective statics of ensembles equidistant tracks seismic 3D. In: *UkrGGRI collection of scientific works*. Kyiv, № 3. 71—83 (in Russian).
- Pilipenko V. N., Verpakhovskaya A. O., Budkevich V. B., Pilipenko E. V., 2015. Formation of three-dimensional image of the medium by the sum of CDP for the studies of geological structure of mine fields. *Geofizicheskiy zhurnal* 37 (4), 104—113 (in Russian).
- Pilipenko V. N., Verpakhovskaya A. O., Gnevush V. V., 2012. The finite-difference wave migration of initial seismograms of central explosion point in time domain. *Geofizicheskiy zhurnal* 34 (3), 40—48 (in Russian).
- Samarskiy A. A., 1971. Introduction to the theory of difference schemes. Moscow: Nauka, 552 p. (in Russian).
- Samarskiy A. A., Gulin A. V., 1973. Stability of difference schemes. Moscow: Nauka, 415 p. (in Russian).
- Sheriff R., Geldart L., 1987. Seismic. Vol.2. Moscow: Mir, 400 p. (in Russian).
- Bancroft J. C., 2007. A Practical Understanding of Pre- and Poststack migration. Vol. 1 (Poststack). Is. 13 of Course notes series. SEG Books, Science. 486 p.
- Biondi B., Palacharla G., 1996. 3D prestack migration of common-azimuth data. *Geophysics* 61, 1822—1832.
- Cohen J. K., Stockwell Jr. J. W., 2011. CWP/SU: Seismic Unix Release № 43R2, an open source software package for seismic research and processing. Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines. 889 p.
- Dai N., Willacy C. N., Pascual R. V., Gochioco L. M., Sun Y., Mecham B. B., 2002. 3D wave equation PSDM optimizes and improves imaging of subsalt prospects. *The Leading Edge* (12), 1224—1226.
- Liu G., Liu Y., Ren L., Meng X., 2013. 3D seismic reverse time migration on GPGPU. *Computers & Geosciences* 59, 17—23.
- Noris M. W., Falchney A. K., 2002. SEG Y rev1 Data Ex-

- change, format 1. Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists. 49 p.
- Rajasekaran S., McMechan G.A.*, 1995. Prestack processing of land data with complex topography. *Geophysics* 60, 1875—1886.
- Sheriff R.E.*, 2002. Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics. Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists. 402 p.
- Zhang W., Wong Y.*, 2010. Efficient parallel hybrid computations for three-dimensional wave equation prestack depth imaging. *International Journal of Numerical Analysis and Modeling* 7, 373—391.
- Zhu J., Lines L.R.*, 1998. Comparison of Kirchhoff and reverse-time migration methods with applications to prestack depth imaging of complex structures. *Geophysics* 63 (4), 1166—1176.