

А.О. Верпаховская¹, Г.Д. Сидоренко², В.Н. Пилипенко¹, Е.В. Пилипенко¹

МИГРАЦИЯ ИСХОДНЫХ СЕЙСМОГРАММ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНЫМ МЕТОДОМ С РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕМ ПРОЦЕССА ВЫЧИСЛЕНИЙ НА КЛАСТЕРЕ

В связи с возрастающими требованиями сейсморазведки к более детальному изучению глубинного строения Земли, а также переходом к трехмерным наблюдениям необходимы значительные вычислительные ресурсы для обработки данных, особенно с применением таких объемных процедур, как миграция исходных сейсмограмм (до суммы) и моделирование волнового поля. Для увеличения вычислительной мощности компьютера применяются многопроцессорные кластеры. При этом надо разрабатывать специальное программное обеспечение, которое предусматривает распараллеливание процесса вычислений на нескольких процессорах. Предложены алгоритмы конечно-разностной миграции исходных сейсмограмм и моделирование волнового поля с распараллеливанием вычислений на заданном количестве процессоров. Эффективность разработок демонстрируется на модельных и практических примерах.

Ключевые слова: конечно-разностный метод, миграция до суммы, моделирование, вычисления на кластере.

Введение. Сейсморазведка — наиболее информативный метод изучения глубинного строения среды, поскольку дает возможность по наблюдаемому волновому полю путем применения процедуры миграции сформировать изображение целевых границ раздела и объектов разведки с их правильным пространственным положением внутри Земли. В то же время возрастающие требования сейсморазведки к повышению детальности исследований, а также переход к трехмерным наблюдениям влечет необходимость обрабатывать значительные объемы зарегистрированных волновых полей. Как правило, на отдельно взятом компьютере оперативно обработать такие данные с применением процедур миграции исходных сейсмограмм и моделирования волнового поля невозможно, поэтому следует обращаться к использованию современных компьютерных технологий, например, кластеров.

Кластер — это объединение однотипных элементов (в данном случае процессоров) в единый блок. Понятие многопроцессорного кластера относительно недавно вошло в научный мир. Объединение обыкновенных компьютеров в кластер началось в 1989 г., когда Ал Гейст разработал специальное программное обеспечение в рамках проекта Parallel Virtual Machine в Оксфордской национальной лаборатории [12]. Затем в 1995 г. широко стали использовать кластеры типа Beowulf, основанные на обычных компьютерах и свободно распространяемых операционных системах с исходными кодами (GNU/Linux, FreeBSD). Кластер Beowulf впервые был собран Томасом Стерлингом и Дональдом Беккером для военных целей в НАСА [8, 14] и получил широкое распространение за счет доступности в аппаратной и программной организации. Естественно, что объеди-

нение нескольких процессоров ведет к значительному увеличению вычислительных ресурсов машины, следовательно, применение кластера будет полезно при решении таких объемных задач, как массовая обработка потоков данных большого объема, многопараметрический анализ данных, моделирование разного рода процессов, реалистичная визуализация (в режиме реального времени) больших наборов данных и т. п.

В наших исследованиях кластерные вычисления нужны для реализации программ, требующих мощные компьютерные ресурсы для расчетов, а именно: при обработке профильных с очень плотной системой наблюдений и трехмерных сейсмических данных с применением миграции, а также при трехмерном моделировании волнового поля со сложной моделью среды. Требования к надежности и точности математического аппарата их реализации значительно возрастают при необходимости исследования целевых геологических объектов, поэтому очень важны выбор оптимальных методов обработки данных и их соответствие поставленным задачам сейсморазведки. По нашему мнению, применение конечно-разностного метода решения дифференциальных уравнений в процедурах обработки сейсмических наблюдений гарантирует корректный результат, поскольку позволяет получить однозначное решение в каждой точке пространства.

В Институте геофизики НАН Украины накоплен многолетний опыт создания и производственного внедрения программ как двумерной, так и трехмерной конечно-разностной миграции волнового поля [4, 5], наблюдаемого в процессе поиска и разведки полезных ископаемых. Кроме того, ведутся разработки программного обеспечения конечно-разностного моделирования волно-

вого поля общей глубинной точки (ОГТ) и сейсмограмм точечного источника как в двумерном, так и в трехмерном варианте для решения разных прикладных задач сейсморазведки [1–3].

Одной из задач моделирования является расчет волнового поля с учетом скоростной модели геологической среды, которая наиболее полно отвечает реальным условиям ее глубинного строения, без проведения полевых наблюдений. Процедура моделирования полезна также при планировании систем наблюдений, выборе наиболее подходящих методов обработки зарегистрированного в определенных условиях волнового поля, для проверки эффективности и точности разработанного программного обеспечения и при выборе варианта миграции, который обеспечит наиболее точное и корректное решение поставленных задач.

Несмотря на то что первенство в миграции до суммы принадлежит интегральному методу Кирхгофа [7,13], сравнение модельных и практических исследований позволяет говорить о преимуществе конечно-разностного метода [15]. К тому же современная реализация миграции Кирхгофа часто представляет собой своего рода комбинацию интегрального и конечно-разностного подходов, что, в свою очередь, также указывает на преимущества именно конечно-разностного варианта [10].

Необходимость изучения сложнопостроенных объектов сейсмической разведки требует максимального отказа от упрощенных подходов в выполнении процедур моделирования и миграции с достижением при этом высокой степени устойчивости и точности вычислительного процесса, а также достоверности результата. Этой задаче, по нашему мнению, полностью отвечает конечно-разностная реализация процедур моделирования и миграции с распараллеливанием процесса вычислений.

В статье рассматриваются теоретические основы трехмерного моделирования волнового поля точечного источника и миграции исходных сейсмограмм для профильных наблюдений, а также алгоритмы их реализации с распараллеливанием процесса вычислений на многопроцессорном кластере. Процесс распараллеливания происходит по пунктам возбуждения. Для каждого пункта возбуждения при моделировании волнового поля выполняется прямое продолжение волнового поля от источника, при миграции — прямое продолжение временного и обратное продолжение волнового полей, а затем формируется изображение среды при совпадении значений времени продолженных полей путем выборки амплитуд наблюдаемого волнового поля. Эффективность применения алгоритмов и программ по реализации кластерных вычислений для конечно-разностной

миграции исходных сейсмограмм и трехмерного моделирования волнового поля демонстрируется на модельных и практических материалах.

Теоретические основы конечно-разностного трехмерного моделирования волнового поля точечного источника и алгоритм с распараллеливанием процесса вычислений на нескольких процессорах. Моделирование волнового поля — важный этап обработки и интерпретации сейсмической информации. Основывается оно на прямом продолжении волнового поля, которое выполняется путем решения волнового уравнения конечно-разностным методом на специальной пространственно-временной сетке с заданной скоростной моделью среды. Для задачи продолжения волнового поля точечного источника принимаются нулевые краевые условия, а именно значения амплитуды поля на границах сеточной области равны нулю [2].

Прямое продолжение волнового поля выполняется путем решения волнового уравнения, которое в трехмерном варианте имеет вид

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2},$$

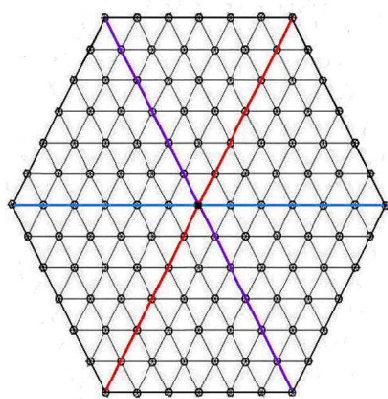
где $u = u(x, y, z)$ — амплитуда волнового поля; x, y, z — пространственные декартовы координаты; $V = V(x, y, z)$ — скорость, которая изменяется по всем пространственным координатам; t — время.

Для трехмерного продолжения волнового поля используется четырехмерная пространственно-временная сетка с 11-точечным шаблоном (рис. 1). На горизонтальной проекции сетки жирными линиями выделены три основных среза, которые используются для контроля вычислений (рис. 1, а). Трехмерная пространственная составляющая шаблона представляет собой шестиугольную сеточную призму, каждая ячейка которой также является призмой с высотой, соответствующей выбранному шагу по глубине Δz , и основанием в виде равностороннего треугольника со стороной a (рис. 1, б).

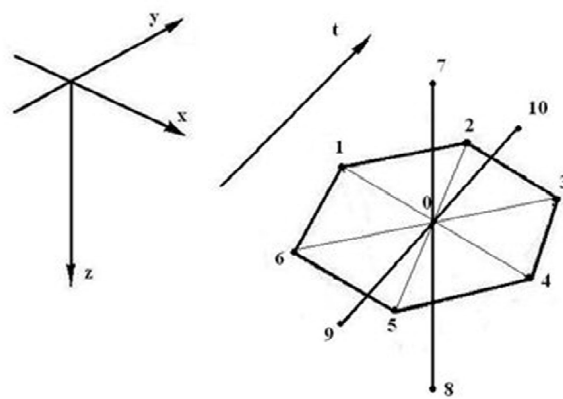
Кроме значений Δz и a входными данными являются количество шагов по глубине, максимальное время продолжения волнового поля и радиус области, где будут проходить вычисления.

Продолжение волнового поля предполагает расчет среза временного поля на отдельном уровне по значениям поля в узлах сетки на двух предыдущих уровнях начиная с временного уровня $t = 0$ и заканчивая максимальным уровнем $t = t_{\max}$.

На каждом временном уровне к амплитуде сигнала рассчитанного волнового поля в начальной точке пространства (x_0, y_0, z_0) , которая принадлежит области продолжения поля, прибавляется сейсмический сигнал, заданный согласно формуле импульса Берлаге [1]:



a



б

Рис. 1. Горизонтальная проекция (*a*) и 11-точечный шаблон (*б*) четырехмерной пространственно-временной сетки для конечно-разностного трехмерного продолжения волнового поля

$$u(x_0, z_0, t) = A \sin \left(2\pi \frac{t}{p} \right) t \cdot \exp \left(-\frac{t}{r} \right),$$

где p – преобладающий период сигнала; r – коэффициент затухания; t – время; A – амплитуда.

Продолжение волнового поля выполняется по явной схеме, которая отвечает 11-точечному разностному шаблону четырехмерной пространственно-временной сетки (рис. 1, б):

$$u_{10} = 2u_0 - u_9 + V^2 \Delta t^2 \times \\ \times \left[\frac{2}{3a^2} (u_1 + u_2 + u_3 + u_4 + u_5 + u_6 - 6u_0) + \right. \\ \left. + \frac{1}{\Delta z^2} (u_7 - 2u_0 + u_8) \right].$$

При определении пространственной области продолжения волнового поля необходимо учитывать задание буферной зоны, которая увеличивает область расчета поля и требуется для исключения паразитных отражений от боковых стенок сетки. Ширина зоны увеличивается как при увеличении глубины области продолжения волнового поля, так и при наличии крутых границ отражения.

Для организации сеточного продолжения поля необходимо перейти на сетку треугольных призм, поскольку ячейкой шаблона является треугольная призма. При этом размеры сеточной области будут $nmx \times nny \times nnz$, где

$$nnz = nz + nd;$$

$$nmx = (((nx-1)dx)/a) + nd \cdot 2 + 3;$$

$$nny = (((ny-1)dy)/a\sqrt{3}/2) + nd \cdot 2 + 3.$$

Соответственно для координат x , y , z сеточными координатами будут a , $a\sqrt{3}/2$, dz .

Для моделирования волнового поля необходимо иметь информацию о значениях скоростных параметров в каждом узле пространственно-временной сетки во всей области, где планируется продолжение волнового поля. При этом надо знать максимальное значение скорости для всей модели с целью определения временного шага Δt и количества шагов nt для достижения заданного во входных параметрах максимального времени $t_{\max}$. Значение Δt рассчитывается из неравенства

$$V_{\max}^2 \Delta t^2 \leq \frac{a^2 \Delta z^2}{\sqrt{a^2 + 2\Delta z^2}}. \quad (1)$$

Выполнение неравенства (1) гарантирует устойчивость процесса конечно-разностных вычислений.

При продолжении временного поля в памяти машины постоянно находятся значения двух уровней временного поля. В начале каждого цикла по времени пересчет поля на уровень $k+1$ с двух уровней $k-1$ и k происходит последовательно по трем циклам по узлам линий вдоль осей x , y и z . Волновое поле на верхней грани сеточной области на каждом временном шаге заполняется в качестве результирующего во внешней памяти. Объем этой памяти может быть значительным, поскольку для достижения высокого уровня детальности моделируемого поля следует применять малый шаг по времени. Таким образом, для конечно-разностного трехмерного моделирования волнового поля необходимо подключать кластерные вычисления.

Алгоритм моделирования трехмерного волнового поля точечного источника с распараллеливанием на нескольких процессорах для ускоренного вычисления объемных задач предусматривает подготовку входных данных, последовательный старт процессоров, выбор каждым процессором параметров конкретного пункта возбуждения и скоро-

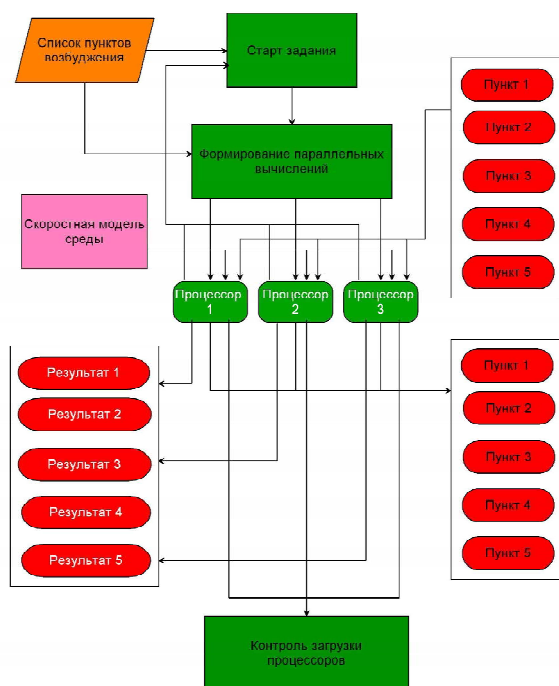


Рис. 2. Блок-схема алгоритма моделирования трехмерного волнового поля точечного источника с распараллеливанием процесса вычислений на трех процессорах

стной модели среды в его расчетной сеточной области. В процессе счета осуществляется контрольная запись в отдельный файл информации о прохождении вычислений по каждому процессору. На заключительном этапе по отдельным временным срезам формируются кубы расчетного волнового поля, которые накапливаются в общей директории. Блок-схема описанного алгоритма моделирования трехмерного волнового поля точечного источника с распараллеливанием процесса вычислений на кластере, который состоит из трех процессоров, показан на рис. 2.

Важным этапом алгоритма моделирования трехмерного волнового поля точечного источника является задание скоростной модели, которое состоит в определении скорости в каждом узле про-

странственной сетки, используемой при вычислениях. Для этого требуются следующие данные: параметры сеточной области; координаты пункта возбуждения (x_0, y_0, z_0); название файла, содержащего трехмерный массив скорости; координаты первого узла массива скорости (x_v, y_v); шаги по осям координат массива скорости ($\Delta x_v, \Delta y_v, \Delta z_v$); количество шагов по осям координат в массиве скорости (n_x, n_y, n_z). По заданным параметрам интерполяцией определяется значение скорости в каждом узле конечно-разностной сетки (см. рис. 1, а).

Для начала процесса распараллеливания вычислений готовится задание, которое содержит информацию о количестве процессоров, необходимых для выполнения моделирования волнового поля, а также номера первого и последнего пунктов возбуждений, для которых будет рассчитано волновое поле. Именно по пунктам возбуждения происходит процесс распараллеливания. При этом важна правильно организованная синхронная работа отдельных процессоров, чтобы не было накладок или перезаписи результатов. В нашем случае это достигается программированием в системе Linux с помощью библиотеки Posix Threads, которая содержит функции управления потоками.

Согласно разработанному алгоритму создано программное обеспечение, которое было опробовано на примерах с разной степенью сложности скоростных моделей среды.

На рис. 3 показаны три среза скоростной модели среды, которая содержит две границы раздела и нарушение. Для данной модели выполнено конечно-разностное моделирование волнового поля с применением описанного алгоритма с распараллеливанием процесса вычислений. При этом были задействованы три процессора и выбраны пять пунктов возбуждения. Срезы смоделированного волнового поля для одного пункта возбуждения представлены на рис. 4.

Для проверки корректности выполнения моделированного волнового поля по предложенно-

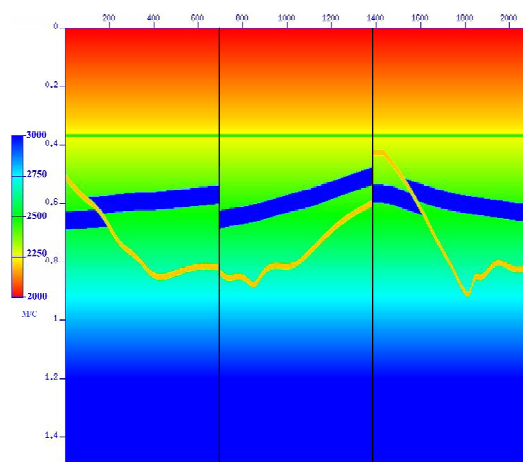


Рис. 3. Отдельные срезы трехмерной скоростной модели среды

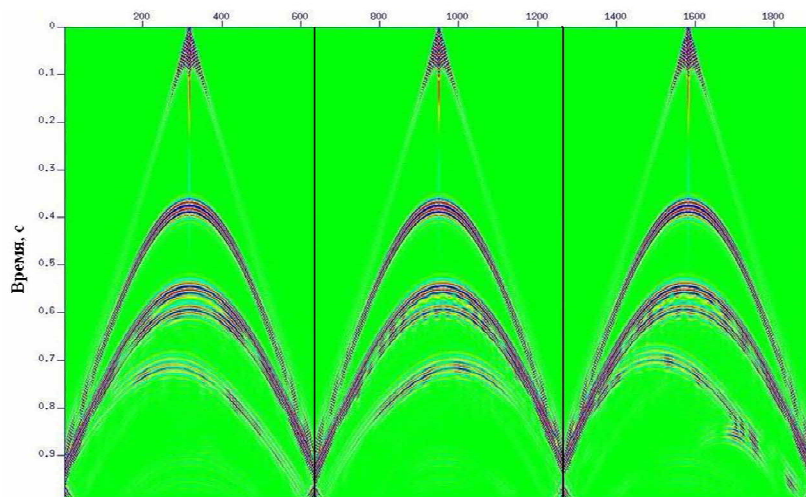


Рис. 4. Срезы трехмерного смоделированного волнового поля, которые соответствуют срезам скоростной модели, показанным на рис. 3

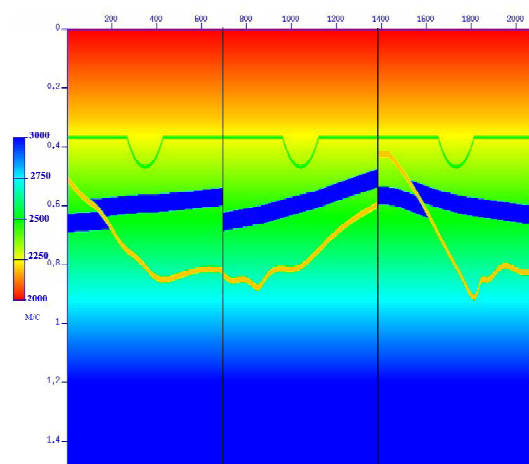


Рис. 5. Срезы измененной трехмерной скоростной модели среды

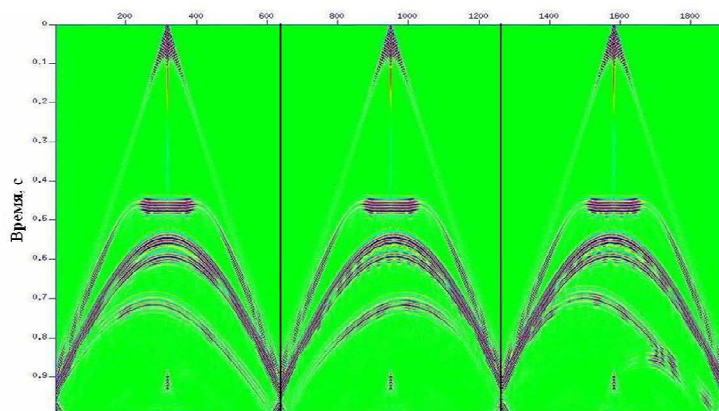


Рис. 6. Срезы трехмерного смоделированного волнового поля, которые соответствуют срезам скоростной модели, показанным на рис. 5

му алгоритму в скоростную модель были внесены изменения в виде небольшой синклинали на верхней границе раздела (рис. 5). Как показывают рис. 3–6, смоделированные волновые поля содержат всю необходимую информацию о строении

среды, соответственно заданном скоростными моделями, что подтверждает корректность предложенного метода конечно-разностного трехмерного моделирования с распараллеливанием процесса вычислений на кластере.

Теоретические основы конечно-разностной миграции исходных сейсмограмм и алгоритм с параллеливанием процесса вычислений на нескольких процессорах. Заключительной процедурой обработки сейсмических наблюдений является миграция, которая позволяет получить картину глубинного строения изучаемой среды со всеми деталями и особенностями. В последнее время для получения наиболее полного и качественного результата миграции применяют миграцию “до суммы” или миграцию исходных сейсмограмм.

Исходя из существующих научных публикаций, наиболее популярна версия RTM (Reverse Time Migration) конечно-разностного формирования изображения до суммы [9, 11]. Идея версии заключается в выполнении двух продолжений волнового поля: прямого от точечного источника и обратного от приемников, а затем процедуры свертки этих двух продолженных волновых полей. При таком подходе для профильных наблюдений необходимо выполнять дважды пространственно-временной расчет волнового поля на трехмерной сетке. При этом одно из полей сохраняется в памяти, пока рассчитывается второе, а затем выполняется процедура их свертки.

В нашем подходе основой конечно-разностной миграции исходных сейсмограмм служат обратное продолжение волнового поля, наблюдаемого на земной поверхности, и прямое продолжение временного поля точечного источника. В процессе продолжения волнового поля по каждому пункту возбуждения в пространственных узлах разностной сетки выбираются значения амплитуд поля, которые принадлежат миграционному изображению. Условием выбора служит совпадение в текущем узле сетки значений временного поля и времени продолженного волнового поля.

В основе продолжения временного поля источника лежит решение уравнения эйконала, которое в декартовой системе координат имеет вид

$$\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial z}\right)^2 = \frac{1}{V^2(x, z)},$$

где V – скорость, линейно возрастающая с глубиной: $V = V_0(1 + \beta z)$, V_0 – скорость на земной поверхности; β – константа.

Для продолжения временного поля в нашем случае используется разностная сетка, которая является ортогональной системой лучей и изохрон (рис. 7). Такой выбор сетки обеспечивает наиболее приближенный расчет поля к реальному распространению сейсмических волн в среде. Переход к новой системе лучей γ и изохрон τ осуществляется согласно формулам

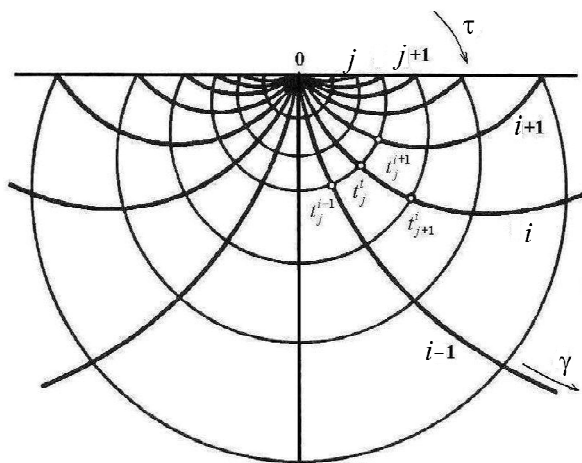


Рис. 7. Сетка ортогональной системы лучей и изохрон для конечно-разностного продолжения временного поля

$$\gamma = \arctg \frac{2x}{\beta(x^2 + z^2) + 2z};$$

$$\tau = \text{arch} \left[\frac{\beta^2(x^2 + z^2)}{2(\beta z + 1)} + 1 \right].$$

Дифференциальная задача конечно-разностного продолжения временного поля в новой системе координат заключается в решении уравнения

$$\left[\frac{\partial t(\gamma, \tau)}{\partial \tau} \right]^2 + \frac{1}{\text{sh}^2 \gamma} + \left[\frac{\partial t(\gamma, \tau)}{\partial \gamma} \right]^2 - \frac{1}{V^2(\gamma, \tau) \beta^2 (\text{ch } \tau - \cos \gamma \text{ sh } \tau)^2} = 0 \quad (2)$$

с начальным условием в источнике $t(\gamma, 0) = 0$ и граничными условиями $t(\gamma_1, \tau) = 0$; $t(\gamma_2, \tau) = 0$, которые определяют время в лучах, ограничивающих область решения.

Продолжение временного поля выполняется аппроксимацией дифференциального уравнения (2) конечно-разностным на сетке с четырехточечным шаблоном, по двухуровневой относительно изохрон явной схеме, которая обеспечивает квадратичную степень приближения:

$$t_{i,j+1} = t_{i,j} + \Delta \tau \left[\frac{\partial t}{\partial \tau} \right] + \frac{\Delta \tau^2}{2} \left[\frac{\partial^2 t}{\partial \tau^2} \right],$$

где [...] – конечно-разностное приближение соответствующих дифференциальных операторов.

Явная схема решения приводит к условной устойчивости, физический смысл которой в данной задаче состоит в том, чтобы луч, который приходит в узел разностной сетки $(i, j+1)$, не выходил за пределы шаблона, ограничивающегося узлами $(i-1, j)$ и $(i+1, j)$ (рис. 7).

В алгоритме продолжения временного поля предвидены ситуации, когда нарушена корректность процесса вычислений, связанных с нелинейностью уравнения эйконала и скачкообразным изменением скорости в среде. В таких ситуациях на первом этапе вычислений определяется время в тех узлах сетки, в которых его можно вычислить, а на втором этапе — в пропущенных узлах путем интерполяции или экстраполяции. Таким образом, происходит естественное сглаживание, которое в данном случае носит локальный характер.

Продолжение волнового поля — наиболее сложный процесс в алгоритме конечно-разностной миграции исходных сейсмограмм, поскольку даже в двумерном варианте выполняется на трехмерной пространственно-временной сетке. Дифференциальное уравнение, описывающее поведение волнового поля в двумерной среде, имеет вид

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = V^2(x, z) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

где u — амплитуда поля.

Задача обратного продолжения волнового поля состоит в расчете волнового поля $u(x, z, t)$ в параллелепипеде, ограниченном гранями $z = 0$, $z = z_m$, $t = 0$, $t = t_m$, $x = x_1$, $x = x_2$, где t_m — максимальное время регистрации колебаний; z_m — максимальная глубина продолжения волнового поля; x_1 и x_2 — координаты соответственно начала и конца профиля. Граничными условиями выступают нулевые значения на гранях прямоугольной области $u(x, z_m, t) = 0$, $u(x_1, z, t) = 0$, $u(x_2, z, t) = 0$, а также поле на земной поверхности $u(x, 0, t) = U_{x,t}$. В качестве начального условия рассматривается нулевое значение поля на времени, большем t_m :

$$u(x, z, t_m) = 0; \quad \left. \frac{\partial u(x, z, t)}{\partial t} \right|_{t=t_m} = 0.$$

Существует несколько алгоритмов продолжения волнового поля, но в данном случае применяется наиболее быстрый из них, основанный на явной схеме конечно-разностного решения уравнения (3) на семиточечном шаблоне (рис. 8) прямоугольной пространственно-временной сетки:

$$u_{i,j}^{k+1} = -u_{i,j}^{k-1} + 2 \left(1 - \frac{\Delta t^2}{\Delta x^2} - \frac{\Delta t^2}{\Delta z^2} \right) u_{i,j}^k + \frac{\Delta t^2}{\Delta x^2} (u_{i+1,j}^k + u_{i-1,j}^k) + \frac{\Delta t^2}{\Delta z^2} (u_{i,j+1}^k + u_{i,j-1}^k).$$

Проверка конечно-разностной аппроксимации дифференциального уравнения (3) с помощью разложения в ряд Тейлора показала квадратичную степень приближения $O(\Delta x^2, \Delta z^2, \Delta t^2)$, что означает уменьшение в квадратичной зависимости ошибки продолжения волнового поля при умень-

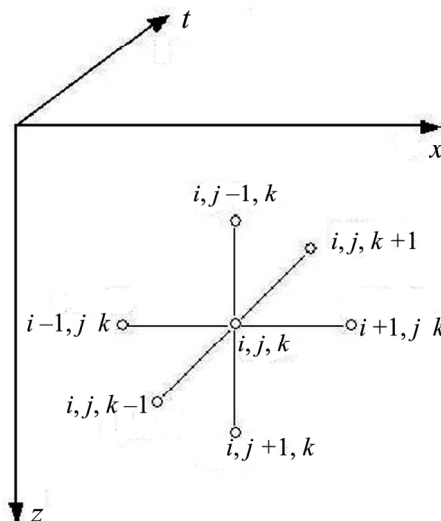


Рис. 8. Семиточечный шаблон прямоугольной трехмерной пространственно-временной сетки для конечно-разностного продолжения волнового поля

шении шагов по сетке Δx , Δz , Δt . При этом условием корректности решения является неравенство

$$\Delta t \cdot \max_p V_{i,j} \leq \frac{\Delta x \Delta z}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2}}.$$

Таким образом, конечно-разностная миграция исходных сейсмограмм, основанная на прямом продолжении временного поля и обратном продолжении волнового поля по описанным схемам, позволяет получить корректное изображение глубинного строения среды по исходному волновому полю. Поскольку это довольно трудоемкий процесс, необходимо привлечение дополнительных машинных ресурсов, таких как кластер.

Алгоритм конечно-разностной миграции исходных сейсмограмм с распараллеливанием процесса вычислений на кластере предусматривает следующее: подготовку данных, параллельные миграционные расчеты и формирование результирующего профильного изображения среды. Процесс распараллеливания происходит при миграции отдельных пунктов возбуждения, причем задание надо подготовить таким образом, чтобы не происходило повторной обработки и пересечения расчетов различных процессоров на едином массиве памяти кластера. Блок-схема выполнения конечно-разностной миграции исходных сейсмограмм с привлечением необходимого количества процессоров показана на рис. 9.

Программно процесс распараллеливания вычислений, как уже указывалось ранее, реализован в системе Linux с использованием библиотеки для многопроцессорного счета Posix Threads. Количество процессоров предусматривается в задании. После окончания миграции сейсмограмм отдельных пунктов возбуждения формирование суммар-

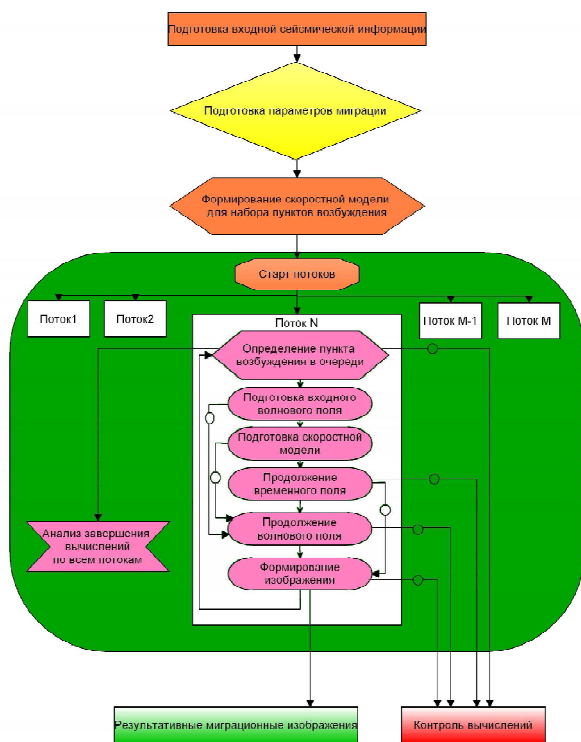


Рис. 9. Блок-схема выполнения конечно-разностной миграции исходных сейсмограмм с привлечением произвольного количества процессоров

ного изображения происходит вне кластера, непосредственно на компьютере пользователя.

Соответственно разработанному алгоритму усовершенствовано программное обеспечение миграции исходных сейсмограмм с распараллеливанием процесса вычислений. Программы были опробованы на практическом материале, наблюдаемом при морской сейморазведке. Рассмотрим пример их применения более детально.

Практический пример применения конечно-разностной миграции исходных сейсмограмм. Как показывает практика, необходимость изучения сложных по геологическим условиям объектов разведки требует отойти от упрощенных подходов в реализации процедур миграции, ориентируясь на достижение высокой степени устойчивости при трансформации волнового поля в изображение среды. Именно конечно-разностный метод миграции исходных сейсмограмм с распараллеливанием процесса вычислений в полной мере отвечает этой задаче.

ГПП “Укргеофизика” были выполнены профильные сейсмические наблюдения в северо-западной части Черного моря с целью детального изучения геологического строения Архангельской структуры по отложениям палеоцена и подготовки рекомендаций по размещению поисково-разведочных скважин глубокого бурения на исследуемой площади. Структурно-тектоническая схема района исследований и расположения сейсмического профиля, который был выбран для примера

применения миграции исходных сейсмограмм с распараллеливанием процесса вычислений, представлена на рис. 10. Глубина моря на участке, где проводились наблюдения, достигала 100 м.

Архангельское поднятие было обнаружено сейморазведкой методом отраженных волн (МОВ) в 1965 г. в отложениях майкопа и эоцена. Дальнейшее изучение геологического строения и нефтегазоносности этой структуры было тесно связано с проведением геолого-геофизических разведочных работ в районе северо-западного шельфа Черного моря.

Согласно структурно-тектонической схеме северо-западной части Черного моря (рис. 10), Архангельская площадь находится в границах Каркинитско-Северо-Крымского прогиба, в самой глубокой его части, с севера ограничена Сулимско-Тарханкутским разломом.

Каркинитско-Северо-Крымский прогиб приурочен к сложнопостроенной зоне сочленения древней Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты и представляет собой грабеноподобную структуру, образованную в раннем мелу как внутриконтинентальный рифт.

По сейсмическим данным, вдоль оси прогиба Каркинитского рифта фиксируется субширотный Сулинско-Тарханкутский разлом, который рассматривается как удлиненная зона рифтовых сбросов. В процессе рифтогенеза разлом представлял собой нормальный сброс, который был инвертирован и преобразовался в надвиг в период кайнозойской тектонической активности, где отображается в виде надвига в верхнемеловых и палеогеновых отложениях. Во время инверсии вдоль этого надвига в послемеловую эпоху сформировались структуры Архангельская, Гамбурцевая, Штормовая [6].

Технологическим центром ГПП “Укргеофизика” выполнена обработка материалов профиля в системе ProMAX. Прежде всего, на основе анализа этих материалов по исследуемому участку проведена обработка сейсмических данных для получения максимально разрешенной сейсмической записи волнового поля и подавления кратных волн. На рис. 11 показана эффективность выбранного варианта повышения разрешенности волнового поля. На заключительном этапе цикла обработки в Технологическом центре ГПП “Укргеофизика” была выполнена временная миграция Кирхгоффа суммы ОГТ, результат которой для части профиля представлен на рис. 12.

Как можно заметить из структурно-тектонического описания, геологическое строение района очень сложное, с преобладанием горизонтов с большими углами наклона и структурными элементами с разрывными нарушениями. Именно поэтому для качественной обработки было необходимо обратиться к миграции исходных сейс-

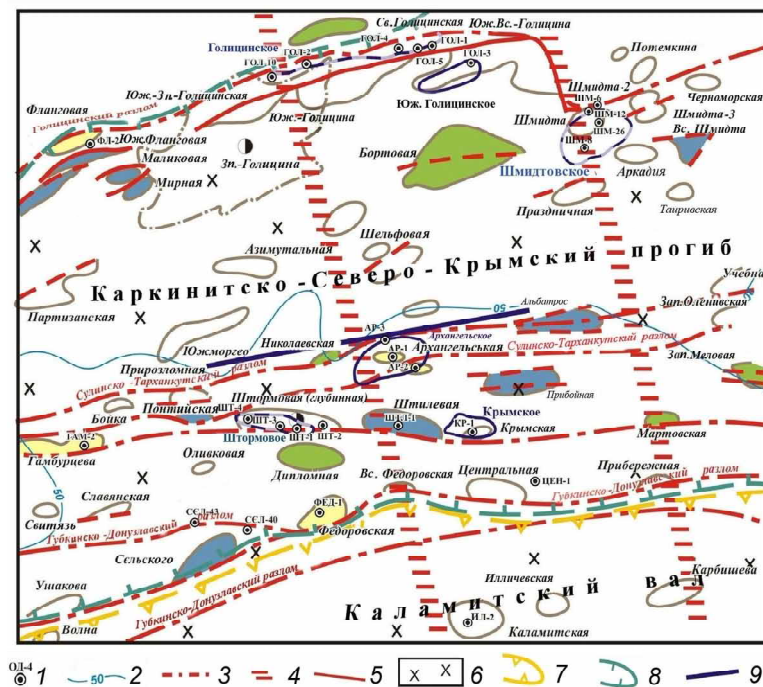


Рис. 10. Структурно-тектоническая схема северо-западной части Черного моря и расположение профиля наблюдений, выбранного для примера: 1 – скважина и ее номер; 2 – изобаты, м; 3 – субширотные разломы; 4 – субмеридиональные разломы; 5 – разрывные нарушения; 6 – Скифская плита; 7 – выступы, валы; 8 – прогибы, впадины; 9 – линия профиля исследований 70 408/10

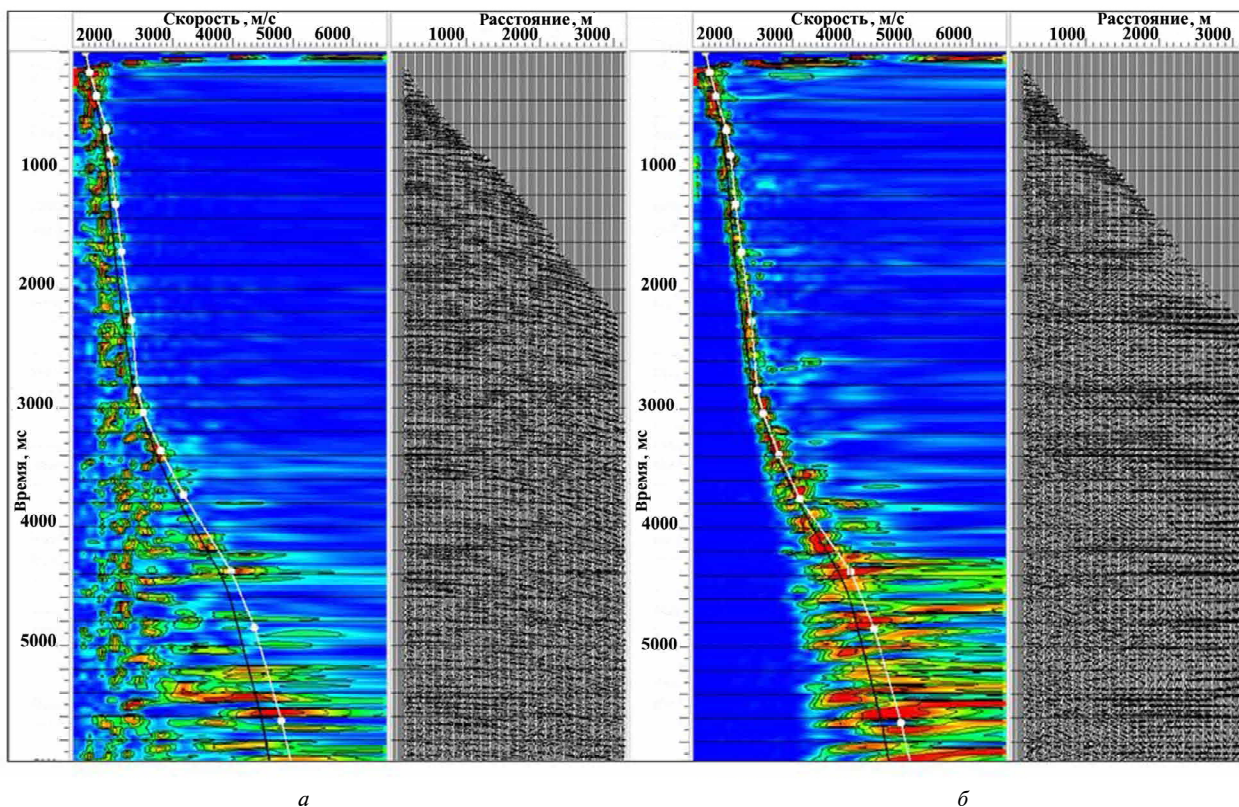


Рис. 11. Фрагмент сейсмограммы и ее вертикального спектра до (а) и после (б) применения процедуры подавления кратных волн

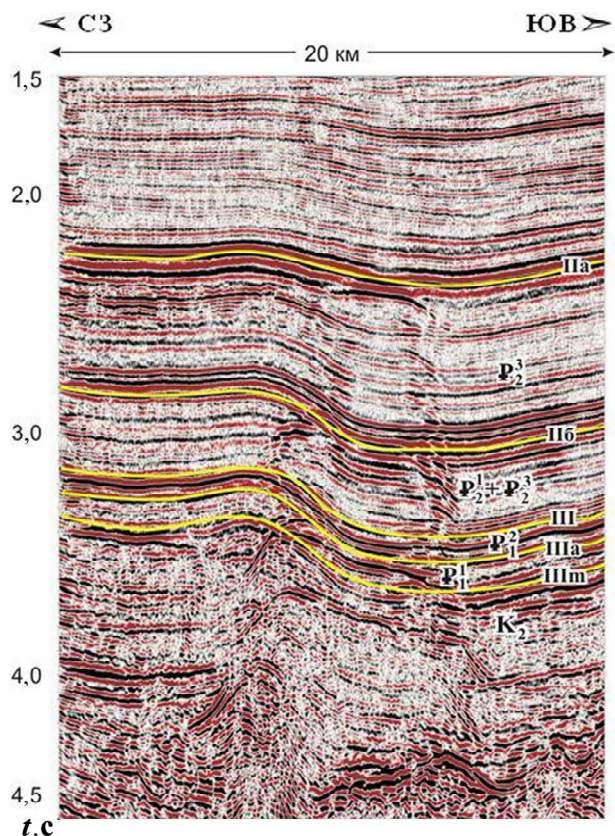


Рис. 12. Результат применения временной миграции Кирхгофа для части профиля, полученный в Технологическом центре ГПП “Укргеофизика”, и вариант его интерпретации

мограмм, которая признана более информативной процедурой, чем миграция суммы ОГТ в районах со сложным строением. Однако, как известно, такая обработка требует значительных компьютерных и временных ресурсов, поэтому конечно-разностная миграция исходных сейсмограмм с распараллеливанием процесса вычислений по

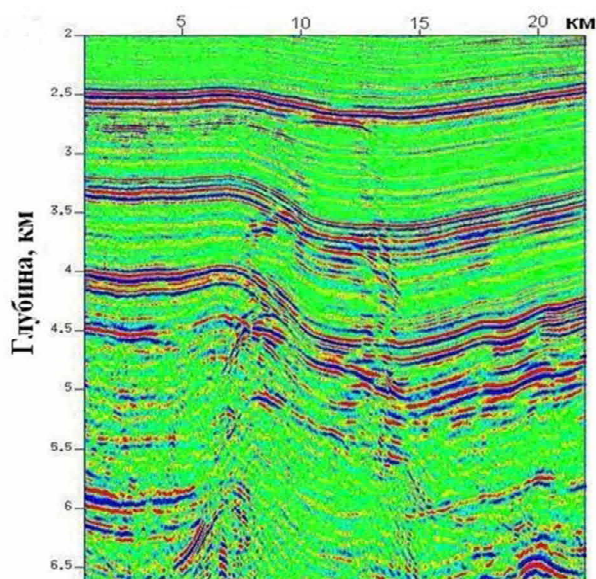
представленному выше алгоритму позволила получить результат в кратчайшие сроки.

На выбранном для примера профиле общей длиной около 40 км был расположен 831 пункт возбуждения через каждые 50 м, а регистрация колебаний производилась 240 приемниками с расстоянием в 12,5 м между ними. В общем исходный объем информации сейсмического волнового поля составил 3,3 Гб. При этом в процессе продолжения волнового поля были использованы сеточные шаги по профилю 5 м, по глубине – 4 м. С такими параметрами обработка на отдельном компьютере заняла бы не один месяц. В то же время формирование изображения среды на глубину 9 км с распараллеливанием процесса вычислений на 8 процессорах было выполнено за 4200 мин (или 70 ч) машинного времени.

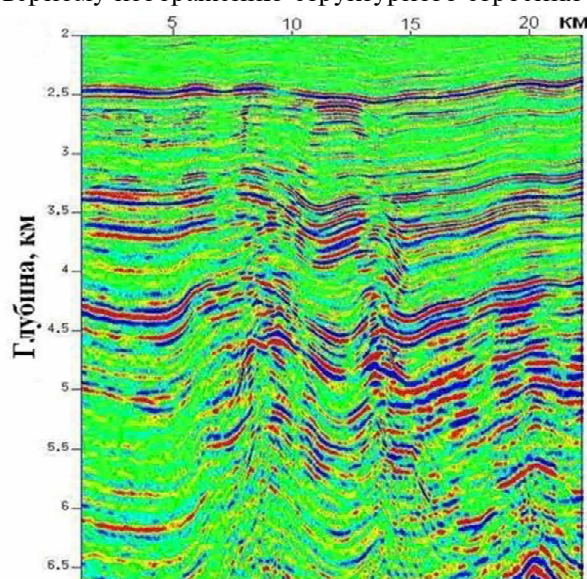
На рис. 13 демонстрируется сопоставление результатов обработки фрагмента профиля, полученных в ГПП “Укргеофизика” с применением миграции суммы ОГТ (рис. 13, а) и в Институте геофизики миграцией исходных сейсмограмм (рис. 13, б). На данном рисунке разрез, показанный на рис. 12, переведен в масштаб глубин.

Сравнение миграционных изображений, сформированных по рассмотренному алгоритму и стандартной методике в системе ProMAX, позволяет сделать вывод, что при изучении сложных геологических объектов разработанный в Институте геофизики метод миграции исходных сейсмограмм дает возможность уточнить важные детали их строения, которые нечетко просматриваются, а иногда и вовсе отсутствуют на результате миграции суммы ОГТ.

По заключению интерпретаторов, применение миграции исходных сейсмограмм на результативном разрезе привело к более уверенному и достоверному изображению структурного строения от-



а



б

Рис. 13. Сопоставление результатов обработки фрагмента морского разведочного профиля, полученных в ГПП “Укргеофизика” с применением миграции суммы ОГТ (а) и в Институте геофизики миграцией исходных сейсмограмм (б)

ражающих горизонтов: P_1 — в кровле отложений нижнего палеогена, K_2 — в кровле отложений верхнего мела.

Выводы. Требования сейсморазведки к повышению детальности результатов обработки и интерпретации ведут к необходимости увеличивать плотность профильных наблюдений и переходить на трехмерные системы наблюдений. Такой материал на обычном компьютере невозможно быстро и качественно обработать ввиду недостатка мощности. Поэтому в современной обработке следует применять новейшие компьютерные технологии, такие как кластер, который объединяет несколько процессоров в единый блок и позволяет значительно увеличить компьютерные ресурсы. Особенно актуально использовать кластер при применении таких процедур обработки сейсмических наблюдений, как миграция исходных сейсмограмм и трехмерное моделирование волнового поля.

Моделирование волнового поля — незаменимая процедура обработки, поскольку дает возможность проверить корректность того или иного разработанного метода, а также выбрать наиболее эффективный вариант миграции при решении конкретных задач сейсморазведки.

Как показывает практика, с помощью миграции исходных сейсмограмм можно отобразить строение сложных элементов среды, которые не полностью изображены или отсутствуют на результате миграции суммы ОГТ. Однако современные системы наблюдения характеризуются значительными объемами регистрируемых данных, что не позволяет в короткие сроки выполнить их обработку с применением миграции по исходным сейсмограммам без привлечения кластерных вычислений.

Разработанные алгоритмы выполнения трехмерного моделирования волнового поля точечного источника и миграции по исходным сейсмограммам профильных наблюдений с распараллеливанием процесса вычислений значительно сокращают временные затраты и дают возможность сделать эти процедуры общедоступными при обработке больших объемов сейсмических данных. Эффективность конечно-разностной миграции исходных сейсмограмм по сравнению с общепринятой миграцией суммы ОГТ в районах со сложным глубинным строением подтверждена на практическом примере профильных данных морской сейсморазведки с плотной системой наблюдений.

1. Верпаховская А.О. 3D конечно-разностное моделирование волнового поля с распараллеливанием вычис-

лительного процесса / Верпаховская А.О., Пилипенко В.Н. // 2-я Междунар. науч.-практ. конф. "Сейсмо-2011", г. Феодосия, 18–24 сент. 2011 г. — Феодосия, 2011. — С. 6.

2. Пилипенко В.Н. Исследование особенностей миграционных преобразований поля преломленных волн с использованием 2D и 3D конечно-разностного моделирования сейсмограмм / Пилипенко В.Н., Верпаховская А.О. // Геофиз. журн. — 2008. — Т. 30, № 1. — С. 84–96.
3. Пилипенко В.Н. Конечно-разностная волновая миграция исходных сейсмограмм общего пункта взрыва во временной области / Пилипенко В.Н., Верпаховская А.О., Гневуш В.В. // Там же. — 2012. — Т. 34, № 3. — С. 40–48.
4. Пилипенко В.Н. Миграция исходных сейсмограмм общего пункта взрыва во временной области конечно-разностным методом / Пилипенко В.Н., Верпаховская А.О., Пилипенко Е.В. // 2-я Междунар. науч.-практ. конф. "Сейсмо-2011", г. Феодосия, 18–24 сент. 2011 г. — Феодосия, 2011. — С. 5.
5. Продолжение временного поля в трехмерной неоднородной среде в процедурах обработки и интерпретации сейсмических данных / Пилипенко В.Н., Верпаховская А.О., Кекух Д.А., Пилипенко Е.В. // Геоинформатика. — 2011. — № 4. — С. 32–43.
6. Тектоника и история развития северо-западного шельфа Черного моря / Отв. ред. Е.В. Хаин. — М.: Наука, 1981. — 244 с.
7. Тимошин Ю.В. Импульсная сейсмическая голография. — М.: Недра, 1978. — 286 с.
8. BEOWULF: A Parallel Workstation For Scientific Computation / Sterling T., Becker D., Savarese D., Dorband J., Ranawake U., Packer Ch. // Proc. of the 24th Intern. conf. on Parallel Processing. — Oconomowoc, WI: CRC-Press, 1995. — P. 11–14.
9. Farmer P. The role of reverse time migration in imaging and model estimation / Farmer P., Zhou Zh., Jones D. // The Leading Edge. — 2009. — V. 28, N 4. — P. 436–441.
10. Gray S.H. Kirchhoff migration using eikonal equation traveltimes / Gray S.H., May W.P. // Geophysics. — 1994. — V. 59. — P. 810–817.
11. Levin S.A. Principle of reverse-time migration // Ibid. — 1984. — V. 49. — P. 581–583.
12. PVM: Parallel Virtual Machine: A Users' Guide and Tutorial for Networked Parallel Computing / Geist A., Beguelin A., Dongarra J. and etc. — Cambridge: The MIT Press, England, 1994. — 298 p.
13. Schneider W.A. Developments in seismic data processing and analysis (1968–70) // Geophysics. — 1971. — V. 36. — P. 1043–1073.
14. Sterling T. Beowulf Cluster Computing With Linux. — Cambridge: The MIT Press, England, 2001. — 536 p.
15. Zhu J. Comparison of Kirchhoff and reverse-time migration methods with applications to prestack depth imaging of complex structures / Zhu J., Lines L.R. // Geophysics. — 1998. — V. 63, N 4. — P. 1166–1176.

¹Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина
E-mail: lenasloboda@gmail.com

Поступила в редакцию 11.06.2013 г.

²ГП "Укргеофизика", Киев, Украина

МІГРАЦІЯ СПОСТЕРЕЖЕНИХ СЕЙСМОГРАМ І МОДЕЛЮВАННЯ ХВИЛЬОВОГО ПОЛЯ СКІНЧЕННО-РІЗНИЦЕВИМ МЕТОДОМ З РОЗПАРАЛЕЛЮВАННЯМ ПРОЦЕСУ ОБЧИСЛЕНЬ НА КЛАСТЕРІ

У зв'язку із зростанням вимог сейсморозвідки до детальнішого вивчення глибинної будови Землі, а також переходом до тривимірних спостережень слід мати значні обчислювальні ресурси для обробки даних, особливо із застосуванням таких об'ємних процедур, як міграція спостережених сейсмограм (до суми) та моделювання хвильового поля. Для збільшення обчислювальної потужності комп'ютера застосовують багатопроцесорні кластери. При цьому потрібна розробка спеціального програмного забезпечення, яке передбачатиме розпаралелювання процесу обчислень на декількох процесорах. Запропоновано алгоритми скінченно-різницевої міграції вхідних сейсмограм і моделювання хвильового поля з розпаралелюванням обчислень на заданій кількості процесорів. Ефективність розробок показано на модельних і практичних прикладах.

Ключові слова: скінченно-різницевий метод, міграція до суми, моделювання, обчислення на кластері.

A.O. Verpakhovska, G.D. Sydorenko, V.N. Pylypenko, E.V. Pylypenko

A FINITE-DIFFERENCE METHOD OF PRE-STACK MIGRATION PROCEDURES AND MODELING OF THE WAVE FIELD WITH PARALLELIZING OF CALCULATION ON CLUSTER

Given the increasing demand of seismic exploration for more detailed seismic study of the deep structure of the Earth, as well as the transition to 3D-observations, it is necessary to have significant computing resources to process data, in particular, to perform pre-stack migration procedures and modeling of the wave field. Multi-processor clusters are used to increase the calculation power of the computer. It is necessary to develop special software which provides parallelizing of calculation on several processors. The authors offer algorithms of pre-stack finite-difference migration and modeling of the wave field with parallelizing of calculation on a predetermined number of processors. The efficiency of the developed software is demonstrated on a model and practical examples.

Keywords: finite-difference method, pre stack migration, modeling, calculation on cluster.