

Формирование трехмерного изображения среды по сумме ОГТ для изучения геологического строения шахтных полей

© *В. Н. Пилипенко, А. О. Верпаховская, В. Б. Будкевич, Е. В. Пилипенко, 2015*

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 16 февраля 2015 г.

Представлено членом редколлегии В. Г. Омельченко

Традиційно сейсмічні спостереження виконують методом відбитих хвиль з багаторазовим перекриттям. При цьому первинним результатом обробки таких даних є сума СГТ. Для подальшого формування зображення необхідно мати коректний варіант міграції без обмежень стосовно кута нахилу відбитих меж, що особливо актуально для вивчення геологічної будови шахтних полів. Наведено варіант тривимірної повнохвильової скінченно-різницевої міграції в часовому масштабі глибин, що дає змогу виділити тонкі особливості будови середовища, швидкісна модель якого може бути неоднорідною за всіма напрямками. Ефективність запропонованого методу для вивчення геологічної будови шахтних полів показано на модельному прикладі та практичних матеріалах, спостережених у районі Донбасу.

Ключові слова: 3D зображення, міграція суми СГТ, шахтні поля.

Введение. Площадные сейсмические наблюдения методом отраженных волн (МОВ) с многократными перекрытиями получили широкое распространение в современной сейсморазведке. Качественная интерпретация куба зарегистрированного волнового поля непосредственно зависит от корректности и точности процедур его обработки. Формирование трехмерного изображения среды с применением процедуры миграции является заключительным этапом обработки и должно обеспечивать получение максимально приближенных к реальным сведений о глубинном положении границ раздела и объектов разведки в изучаемом разрезе. Это, в свою очередь, требует тщательного выбора варианта миграции, который, прежде всего, зависит от условий как системы наблюдений и характера зарегистрированного волнового поля, так и строения изучаемой среды.

В обработке данных сейсморазведки МОВ многократными перекрытиями одну из главных позиций занимает процедура суммирования трасс методом общей глубинной точки (МОГТ). Свою популярность МОГТ завоевал благодаря простым теоретическим основам и скорости получения предварительной информации о строении глубинного разреза [Maupé, 1962]. Одним из основных преимуществ суммирования трасс по ОГТ является его высокая помехоустойчивость. При этом кратные волны

на временных разрезах суммотрасс ОГТ отсутствуют или могут быть достаточно хорошо подавлены за счет высокой кратности при суммировании трасс.

Относительно очередности выполнения процедуры суммирования трасс МОГТ миграция бывает до и после суммы (в английском варианте pre- и poststack migration) [Bancroft, 2007]. Идея миграции после суммы или до суммы ОГТ состоит в корректировке положения объектов разведки по глубине или времени, в зависимости от типа результативного разреза. Так, существуют разработки в направлении развития как временной, так и глубинной миграции суммы ОГТ [Reshef, Kessler, 1989; Hale, 1991; Yilmaz, 2001; Nemeth et al., 2002].

В статье [Hoffe et al., 1997] проведено сравнение результатов применения при изучении Матагамского шахтного района (Канада) двух методов миграции: двумерной до суммы и трехмерной после суммы. Авторами сделан вывод, что оба результата во многих случаях могут дополнять друг друга, но при обработке зашумленных данных, наблюдаемых в шахтных полях, трехмерная миграция до суммы показывает лучший результат. При этом авторы применяли миграцию в частотной области или «фазового сдвига», предложенную Газдагом [Gazdag, 1978] и реализованную в трехмерном варианте [Chun, Jacowitz, 1981].

Необходимо отметить, что при изучении

шахтных полей с достаточно однородной скоростной характеристикой тонкослоистого разреза с приближенным к горизонтальному напластованию слоев, как показывает практика, миграция после суммы во временном масштабе глубин позволяет получить качественное изображение среды с минимальными затратами времени, что является важным преимуществом при обработке больших объемов зарегистрированных волновых полей и особенно актуально при трехмерной сейсморазведке.

В Институте геофизики НАН Украины занимаются разработкой вариантов конечно-разностной миграции для формирования изображений среды по данным двумерной и трехмерной сейсморазведок как до, так и после суммирования трасс МОГТ [Пилипенко и др., 2011, 2012; Верпаховская и др., 2013]. Поскольку сейсмические наблюдения в районах шахтных полей традиционно выполняются МОВ многократными перекрытиями и имеют сложную волновую картину, что связано со структурным строением геологического разреза, то для формирования изображения среды в таких условиях необходимо иметь корректный вариант миграции суммы ОГТ. Таким вариантом является конечно-разностная полноволновая миграция во временном масштабе глубин. Ранее был разработан двумерный вариант такой миграции, эффективность которого была подтверждена при изучении сложного строения Прикарпатского региона [Пилипенко и др., 2012].

Принципиальным моментом при подготовке первичных данных к выполнению миграционных преобразований является применение процедур обработки, исключающих или, в крайнем случае, минимизирующих субъективное влияние геофизика, выполняющего обработку и определяющего граф и значения управляющих параметров программ, на структуру волновых полей. В первую очередь это касается процедур коррекции остаточных статических поправок, а также подавления регулярных волн-помех. В Институте разработана программа расчета остаточных статических поправок по ансамблям первых вступлений равноудаленных трасс (RUST3D), в которой минимизировано количество необходимой для ее работы априорной информации о строении изучаемого объекта [Дядюра, Будкевич, 2005]. Программа успешно прошла всестороннюю проверку и широко используется в геофизических организациях Украины. Эффективность разработанных программ миграции

продемонстрирована на примерах обработки модельных, а также реальных площадных наблюдений, выполненных в районе Донбасса.

Трехмерная конечно-разностная полноволновая миграция во временном масштабе глубин. Необходимыми исходными данными для миграции суммы ОГТ являются набор суммотрасс ОГТ и информация о скоростях распространения волн в среде, которая задается в глубинном масштабе в виде системы вертикальных графиков или поверхностей границ распределения скоростей по площади. В результате применения процедуры трехмерной миграции формируется образ среды, который подается в виде трасс мигрированного разреза.

В целом алгоритм выполнения трехмерной полноволновой миграции суммы ОГТ во временном масштабе глубин представляет собой последовательность следующих этапов: подготовка куба суммы трасс ОГТ; формирование куба скоростной модели среды; полноволновая миграция суммы трасс ОГТ. Последний этап, в свою очередь, предполагает подготовку оптимальных параметров миграции, обратное трехмерное продолжение волнового поля на каждом глубинном уровне во временном масштабе и формирование результирующего куба изображения среды, который может быть подан как во временном, так и в глубинном масштабе.

Наиболее сложным элементом представленного алгоритма является обратное продолжение волнового поля в трехмерном варианте, которое основано на конечно-разностном решении скалярного волнового уравнения с использованием четырехмерной пространственно-временной сетки. Дифференциальное волновое уравнение в трехмерной среде имеет вид

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

где x, y, z — пространственные координаты; $V(x, y, z)$ — скорость в среде; $u(x, y, z)$ — амплитуда волнового поля в точке пространства с координатами x, y, z ; t — время.

Чтобы перейти во временной масштаб глубин, необходимо произвести замену координаты z на τ согласно формуле

$$\tau(x, y, z) = \int_0^z \frac{dz}{V(x, y, z)}. \quad (2)$$

Согласно уравнению (2) переведем волно-

вое уравнение (1) в новую систему координат:

$$V^2(x, y, \tau) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0. \quad (3)$$

Поскольку целью обратного продолжения волнового поля является определение изображения среды, которое соответствует волновому полю, зафиксированному в момент отражения волны от неоднородностей среды, для процесса миграции информативными будут волны, которые распространяются из глубины среды к дневной поверхности. Учитывая это, для оптимальной аппроксимации волнового уравнения конечно-разностным Клаербаут [Claerbout, Doherty, 1972] предложил трансформацию уравнения (3) в новой системе координат, которая движется в соответствии с распространением фронта плоской волны из глубины в направлении дневной поверхности, что гарантирует оптимальное конечно-разностное продолжение волнового поля в среде:

$$x' = x, \quad y' = y, \quad \tau' = \tau, \quad t' = \tau + t, \quad (4)$$

где x', y', τ', t' — новая пространственно-временная система координат, которая является косоугольной. При ее использовании конечно-разностное продолжение временного поля сопровождается искажением волновой картины в случае больших углов подхода отражений к сейсмоприемникам, что особенно актуально при изучении сложного геологического строения шахтных полей. Для устранения ограничений на угол подхода волн при формировании изображения среды было использовано другое преобразование системы координат для полноволнового продолжения, которое впервые было предложено Ли [Li, 1986] для профильного варианта миграции. В трехмерном варианте новая система координат будет иметь вид

$$x' = x, \quad y' = y, \quad \tau' = \frac{1}{\sqrt{2}}\tau - \frac{1}{\sqrt{2}}t, \quad t' = \frac{1}{\sqrt{2}}\tau + \frac{1}{\sqrt{2}}t. \quad (5)$$

Применив систему координат (5) к (1), получим следующее выражение:

$$V^2(x, y, \tau) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y'^2} \right) + 2 \frac{\partial^2 u}{\partial t' \partial \tau'} = 0. \quad (6)$$

Использование новой системы координат (5) позволяет достигнуть соответствия линий разностной сетки основному направлению распространения отраженных волн при обратном продолжении волнового поля. Такой подход дает возможность удовлетворительно

аппроксимировать дифференциальные операторы разностными при использовании относительно больших сеточных шагов по глубине. Таким образом, конечно-разностная сетка формируется сеточными линиями, которые соответствуют осям координат x', y', t', τ' в системе уравнений (5) со следующими узлами по осям:

$$x' = i\Delta x', \quad y' = j\Delta y', \quad t' = k\Delta t', \quad \tau' = l\Delta \tau'.$$

где $i=1 \div n, j=1 \div m, k=1 \div p, l=1 \div q; n, m, p, q$ — количество сеточных узлов по направлениям осей x', y', t', τ' .

Выбранная система координат (5) повернута в плоскости τ', t' пространственно-временной области на 45° с сохранением ортогональности, что обеспечивает возможность полноволнового продолжения. На рис. 1 показана проекция конечно-разностной сетки на плоскость $t\tau$, а также две проекции четырехмерного сеточного шаблона на плоскости $t\tau$ и $x'y'$. Именно поворот системы координат гарантирует удовлетворительную аппроксимацию при использовании относительно больших сеточных шагов по глубине, что, в свою очередь, позитивно влияет как на время расчетов, так и на устойчивость процедуры миграции.

Конечно-разностная аппроксимация дифференциального волнового уравнения (6) выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} & \left(E - \frac{V^2 \Delta t \Delta \tau}{16} L_{xx} \right) \left(E - \frac{V^2 \Delta t \Delta \tau}{16} \right) u_{i,j}^{k-1,l+1} = \\ & = \left(E + \frac{V^2 \Delta t \Delta \tau}{16} L_{xx} + \frac{V^2 \Delta t \Delta \tau}{16} L_{yy} \right) \times \end{aligned}$$

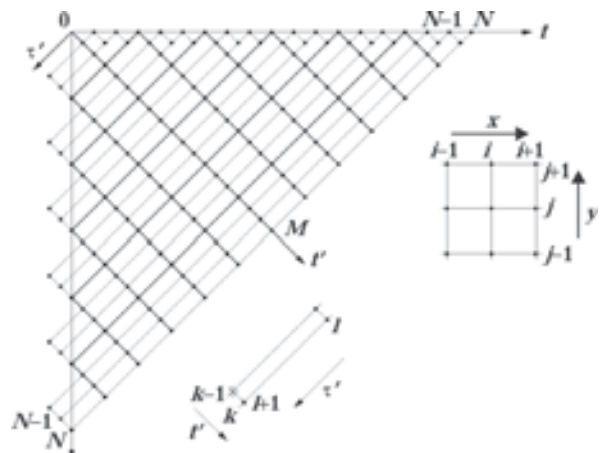


Рис. 1. Проекция конечно-разностной пространственно-временной сетки на плоскость $t\tau$, а также две проекции четырехмерного сеточного шаблона на плоскости $t\tau$ и $x'y'$.

$$\begin{aligned} & \times (u_{i,j}^{k-1,l} + u_{i,j}^{k,l+1}) - \left(E - \frac{V^2 \Delta t \Delta \tau}{16} L_{\bar{x}\bar{x}} - \right. \\ & \left. - \frac{V^2 \Delta t \Delta \tau}{16} L_{\bar{y}\bar{y}} - \frac{V^2 \Delta t \Delta \tau}{16} L_{\bar{x}\bar{x}} L_{\bar{y}\bar{y}} \right) u_{i,j}^{k,l}, \end{aligned} \quad (7)$$

где E — единичный оператор; $u_{i,j}^{k,l}$ — значение волнового поля в узле четырехмерной сетки; $L_{\bar{x}\bar{x}}$ и $L_{\bar{y}\bar{y}}$ — разностные операторы, которые определяются согласно выражениям

$$\begin{aligned} L_{\bar{x}\bar{x}}(u_{i,j}^{k,l}) &= \frac{1}{\Delta x^2} (u_{i+1,j}^{k,l} - 2u_{i,j}^{k,l} + u_{i-1,j}^{k,l}); \\ L_{\bar{y}\bar{y}}(u_{i,j}^{k,l}) &= \frac{1}{\Delta y^2} (u_{i,j+1}^{k,l} - 2u_{i,j}^{k,l} + u_{i,j-1}^{k,l}). \end{aligned}$$

Для упрощения всех дальнейших записей, как и в уравнении (7), штрихи при координатных переменных будем опускать.

В соответствии с шаблоном сетки (см. рис. 1) значения скорости выбираются в точке с сеточными координатами $\left(i, j, k - \frac{1}{2}, l + \frac{1}{2} \right)$, где дробь обозначает, что скорость определяется в точке, которая соответствует центру сеточного шаблона и находится между двух сеточных узлов.

Для эффективного численного решения конечно-разностного уравнения на четырехмерной пространственно-временной сетке необходимо предвидеть факторизацию разностной схемы, что позволит обеспечить раздельный по координатным направлениям разностный счет. В нашем случае факторизация состоит в расщеплении оператора при $u_{i,j}^{k-1,l+1}$. Соответственно после факторизации процесс решения уравнения (7) будет происходить в два этапа [Самарский, 1983]:

$$\begin{aligned} & \left(E - \frac{V^2 \Delta t \Delta \tau}{16} L_{\bar{x}\bar{x}} \right) w_{i,j} = \\ & = \left[\left(E + \frac{V^2 \Delta t \Delta \tau}{16} L_{\bar{x}\bar{x}} + \frac{V^2 \Delta t \Delta \tau}{16} L_{\bar{y}\bar{y}} \right) (u_{i,j}^{k-1,l} + u_{i,j}^{k,l+1}) - \right. \\ & \quad \left. - \left(E - \frac{V^2 \Delta t \Delta \tau}{16} L_{\bar{x}\bar{x}} - \right. \right. \\ & \quad \left. \left. - \frac{V^2 \Delta t \Delta \tau}{16} L_{\bar{y}\bar{y}} - \frac{V^4 \Delta t^2 \Delta \tau^2}{256} L_{\bar{x}\bar{x}} L_{\bar{y}\bar{y}} \right) u_{i,j}^{k,l} \right]; \\ & \left(E - \frac{V^2 \Delta t \Delta \tau}{16} L_{\bar{y}\bar{y}} \right) u_{i,j}^{k-1,l+1} = w_{i,j}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $w_{i,j}$ — промежуточная двумерная функция волнового поля.

Для того, чтобы сформулировать конечно-разностную задачу трехмерного обратного продолжения волнового поля, необходимо уравнения (8) дополнить граничными условиями

$$\begin{aligned} u_{i,j,0}^k &= U_{i,j}^k, \quad u_{0,j,l}^k = u_{n,j,l}^k = 0, \\ u_{i,0,l}^k &= u_{i,m,l}^k = 0, \quad u_{i,j,l}^p = 0, \end{aligned}$$

где $U_{i,j}^k$ — волновое поле исходного куба сейсмотрасс ОГТ; n, m, p — граничные узлы сетки по координатным осям x, y, t .

Расчет значений поля в узлах сетки происходит последовательно в направлении уменьшения координаты t' и увеличения t'' . Процесс миграции заканчивается этапом определения результирующего куба изображения среды $u(x, y, \tau)$ при условии $t=0$.

Согласно описанному алгоритму было разработано программное обеспечение, реализующее трехмерную полноволновую конечно-разностную миграцию суммы ОГТ во временном масштабе глубин. Программные модули написаны на языке С и могут функционировать под операционными системами как WINDOWS, так и LINUX (с незначительной коррекцией, которая необходима при адаптации программ к форматам конкретной системы обработки данных сейсморазведки), а также предвидят распараллеливание процесса вычислений на кластере.

Применение программ при обработке модельных волновых полей и реальных данных площадной сейсморазведки показало как корректность предложенного алгоритма, так и его эффективность в условиях строения шахтных полей.

Модельный пример. Для моделирования трехмерного волнового поля был использован разработанный в Институте геофизики оригинальный вариант моделирования трехмерного поля суммы ОГТ, основанный на прямом продолжении волнового поля. В качестве модельного примера для демонстрации корректности и точности работы разработанного программного обеспечения, реализующего предложенную конечно-разностную трехмерную миграцию суммы ОГТ во временном масштабе глубин, была задана скоростная модель, которая характерна для строения шахтных полей. На рис. 2 показана выбранная для примера скоростная модель среды: в виде куба (рис. 2, а) и один из его срезов (рис. 2, б).

При задании скоростной модели был использован специальный подход, который позволяет задавать тонкослоистую среду с

тектоническими нарушениями. Описание распределения скорости задается отдельными вертикальными графиками скоростных параметров, непрерывные значения которых определяются путем двумерной интерполяции в горизонтальной плоскости. На общем фоне непрерывного распределения скорости задаются отдельные пласты или группы пластов вместе с нарушениями, которые описываются глубиной расположения верхней поверхности пласта, его толщиной и скоростными параметрами.

Выбранная скоростная модель содержит тонкий пласт, который имеет сложное нарушение. При этом и пласт, и само нарушение представлены в криволинейной форме для демонстрации эффективности разработанного метода в наиболее сложных условиях строения среды.

Для данной модели было выполнено конечно-разностное моделирование трехмерного волнового поля ОГТ. На рис. 3 показан куб смоделированного волнового поля и один из его срезов для заданной скоростной модели (см. рис. 2). К кубу смоделированного волно-

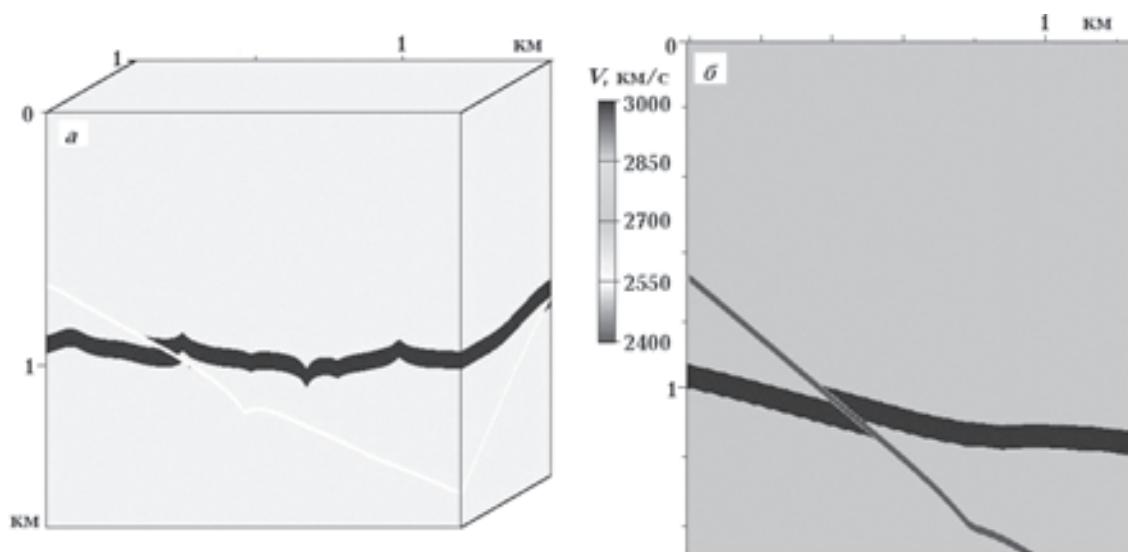


Рис. 2. Скоростная модель среды в виде куба (а) и один из его срезов (б).

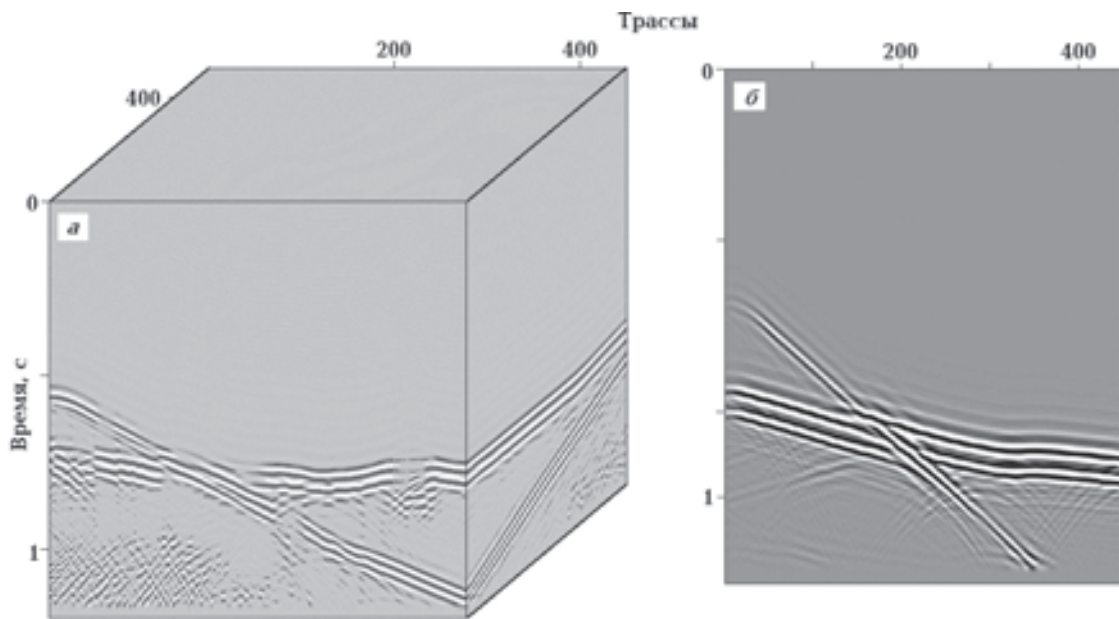


Рис. 3. Куб смоделированного волнового поля (а) и один из его срезов (б) для заданной скоростной модели (см. рис. 2).

вого поля была применена предложенная трехмерная конечно-разностная миграция суммы ОГТ во временном масштабе глубин. На рис. 4 показан результат ее применения: миграционный куб и один из его срезов.

Результат применения трехмерной конечно-разностной миграции суммы ОГТ во временном масштабе глубин на модельном примере позволил подтвердить ее корректность и эффективность в условиях сложного тонкослоистого строения среды.

Коррекция остаточных статических поправок и удаление волн-помех. При обработке реальных данных сейсморазведки результат применения миграции напрямую зависит, прежде всего, от качества исходного волнового поля. В условиях строения шахтных полей с характерным тонкослоистым высокоскоростным разрезом очень часто наблюдаемое волновое поле осложнено разного рода помехами. Особо актуальным при этом становится максимально точный учет статических поправок, включающий расчет как априорных, так и корректирующих (остаточных).

Процедура автоматической коррекции статических поправок (фазовая коррекция) является одной из основных при обработке сейсмических данных, наблюдаемых МОВ с многократными перекрытиями. Как правило, недостаточный объем специальных полевых работ (сейсмический каротаж, метод прелом-

ленных волн и др.) для определения априорных статических поправок приводит к необходимости их последующей коррекции.

В Институте геофизики НАН Украины разработана программа автоматической коррекции остаточных статических поправок RUST3D [Дядюра, Будкевич, 2005], которая основывается на использовании для определения остаточных статических поправок зон первых вступлений ансамблей равноудаленных сейсмограмм. Программа позволяет выполнять вычисления по материалам профильной и площадной сейсморазведки при условии статистической корректности, а также отсутствия требований к априорной информации о геологическом строении района исследований. В общем процесс вычислений состоит из двух основных этапов: расчета временных сдвигов между отрезками равноудаленных трасс в зоне первых вступлений и решения факторной задачи (системы уравнений). Таким образом, определяются значения остаточных статических поправок для всех пунктов возбуждения и приема на профиле или площади работ.

Наиболее ответственным и влияющим на качество процедуры автоматической коррекции статических поправок является этап расчета временных сдвигов. Поэтому важным является правильное определение времени начала интервала трассы («окна») и его длина. При этом на процесс расчета временных сдвигов

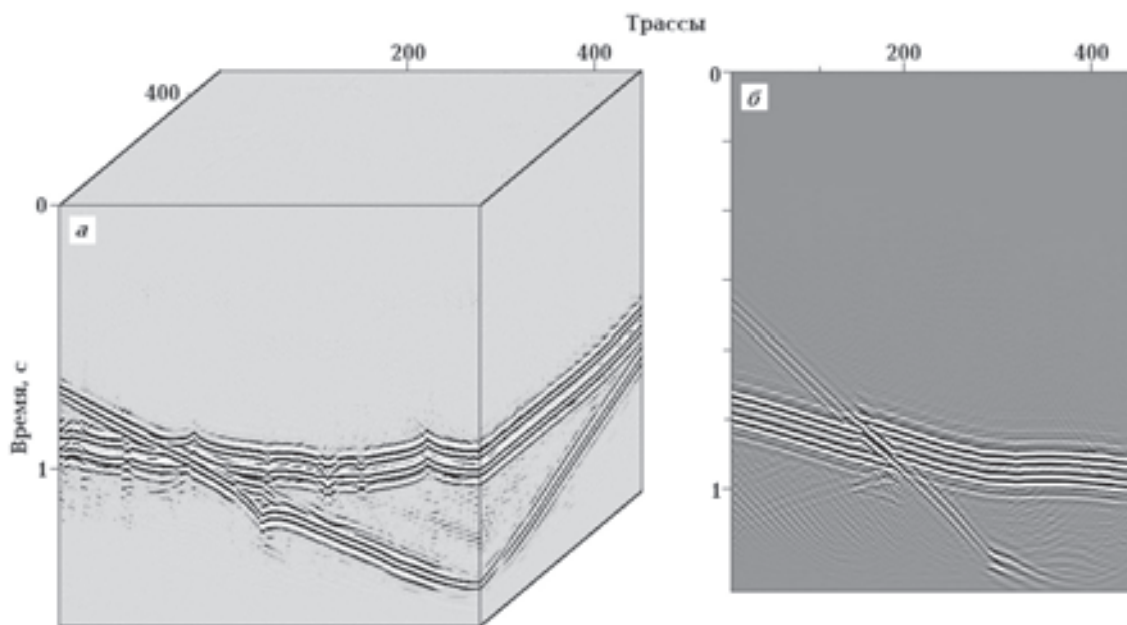


Рис. 4. Результат применения трехмерной полноволновой конечно-разностной миграции во временном масштабе глубин: а — результирующий куб, б — один из его срезов.

вливают четыре параметра, которые определяются при обработке, а именно скорость волн в зоне первых вступлений, длина «окна», диапазон ожидаемых поправок и линейный сдвиг «окна» по оси времени.

Многолетний опыт применения программы RUST3D позволил выбрать процедуру автоматической коррекции остаточных статических поправок для предварительной подготовки материалов сейсморазведки приповерхностных отложений в условиях строения шахтных полей для дальнейшего применения миграции.

После выполнения процедуры коррекции остаточных статических поправок необходимо извлечение из наблюденного волнового поля «звуковой» волны, а также определение по спектру параметров полосовой частотной фильтрации для устранения волн-помех.

После корректного выполнения описанных процедур в значительной мере снижена вероятность получения ошибочных построений изображения среды после применения конечно-разностной миграции.

Предложенный алгоритм обработки трехмерных сейсмических данных, наблюденных в условиях строения шахтных полей, состоящий из предварительной подготовки наблюденного волнового поля и конечно-разностной полноволновой миграции суммы ОГТ, был опробован при обработке наблюдений площадной сейсморазведки, выполненных на шахтных полях Донбасса.

Практический пример. В качестве практического примера были взяты площадные сейсмические наблюдения, выполненные в районе Донбасса на участке поля шахты «Краснолиманская». Выбранный участок шахтного поля характеризуется в тектоническом плане наличием пологой флексуры с поднятым крылом. При этом залегание пород осложнено рядом разрывных нарушений типа сбросов и взбросов [Анциферов и др., 2008].

Низкое качество наблюденных волновых полей четко просматривается с большой разницей в энергии трасс от разных пунктов возбуждения, достигающей двух-трех порядков, а также при наличии значительного количества помех техногенного происхождения и интенсивной звуковой волны.

Сейсморазведочные площадные работы в районе исследований выполнялись по технологии ортогональной системы наблюдений типа «крест» по общепринятой методике МОВ многократными перекрытиями. Количество одновременно регистрируемых линий наблю-

дений в блоке составляло 6. На каждой линии использовалась центральная симметричная расстановка из 100 активных каналов с шагом 20 м между ними. Максимальное расстояние между источником и приемником было 1000 м на каждом фланге вдоль линий наблюдений при выносе 20 м. При этом 21 линия наблюдений имела общую длину 4100 м, содержала 206 приемников и располагалась с шагом 80 м. В то же время в работах были задействованы 32 линии возбуждения, на каждой из которых было расположено 72 источника с шагом 20 м. Каждая линия имела длину 1420 м с расстоянием между соседними линиями возбуждения 100 м.

Неблагоприятные поверхностные условия, такие как крутые склоны балок, лесистые и затопленные участки, зоны коммуникаций и построек, обусловили наличие пропусков в наблюдениях из-за невозможности отработать отдельные пункты возбуждения и даже целые интервалы вдоль линий возбуждения и приема. В таких случаях были выполнены компенсационные выносные пункты возбуждения, которые располагались ортогонально на расстоянии 20, 40 или 60 м от линии возбуждения, на которой были подобного рода пропуски.

Регистрация колебаний выполнялась с дискретизацией 2 мс общей длиной 11 с. В качестве источника применялись вибрационные возбуждения линейным свипом с частотной разверткой 28—112 Гц продолжительностью 8 с. Общий объем первичных сейсмических данных составил 2 304 600-канальных физических наблюдений или 1 382 400 сейсмических трасс.

Для эксперимента был использован фрагмент из 378 000 сейсмотрасс.

Обработка наблюденных площадных данных была выполнена в два этапа: подготовка исходных материалов с применением автоматической коррекции остаточных статических поправок и исключением волн-помех, а также трехмерная конечно-разностная полноволновая миграция во временном масштабе глубин.

Как было отмечено, на качество процедуры автоматической коррекции статических поправок больше всего влияет расчет временных сдвигов, который требует определения оптимальных значений четырех параметров. После экспериментальных исследований при обработке куба данных, наблюденных в районе Донбасса, были выбраны следующие их значения:

– скорость волн в зоне первых вступлений 3200 м/с,

- длина временного «окна» 300 мс,
- временной диапазон ожидаемых поправок ± 30 мс,
- линейный сдвиг «окна» по оси времени 0 мс.

После выполнения процедуры коррекции из наблюдаемого поля были исключены звуковые волны, а также применен нуль-фазовый полосовой фильтр с параметрами 15–30–40–70 Гц. Следует отметить, что звуковые волны удаляются уже после процедуры коррекции статических поправок, так как находятся за пределами «окна», в котором происходят вычисления временных поправок, и не влияют на их точность.

После всех описанных процедур, направленных на корректное улучшение качества сейсмических трехмерных наблюдений, к подготовленному кубу данных была применена трехмерная конечно-разностная полноволновая миграция во временном масштабе глубин.

Для наглядной демонстрации эффективности как предложенного подготовительного этапа, так и трехмерной полноволновой миграции во временном масштабе глубин на рис. 5 приведено сопоставление куба исходного волнового поля и результат его миграции, а на рис. 6 показаны куб исходного волнового поля после предварительной обработки с применением автоматической коррекции остаточных стати-

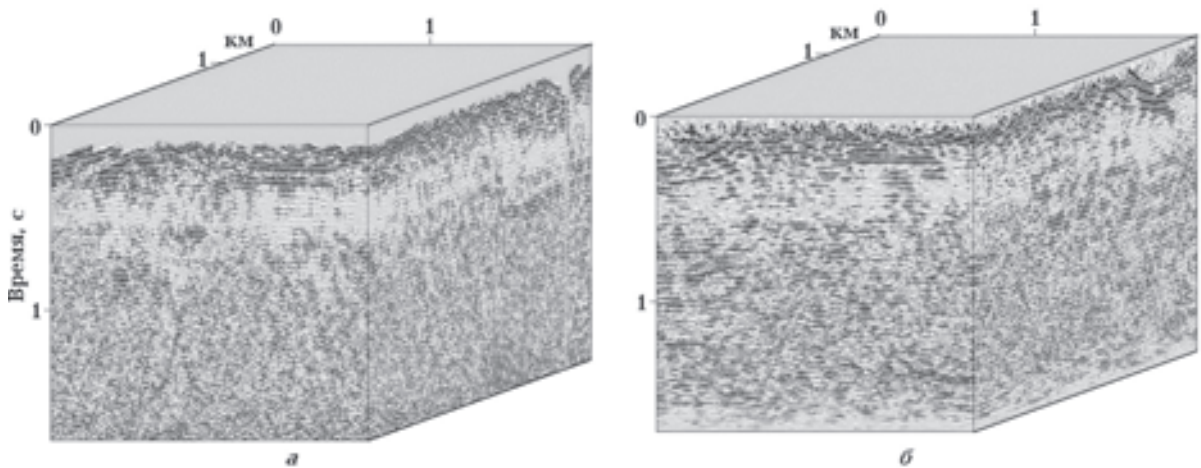


Рис. 5. Сравнение наблюдаемого куба данных (а) и результата применения к нему конечно-разностной трехмерной полноволновой миграции во временном масштабе глубин (б).

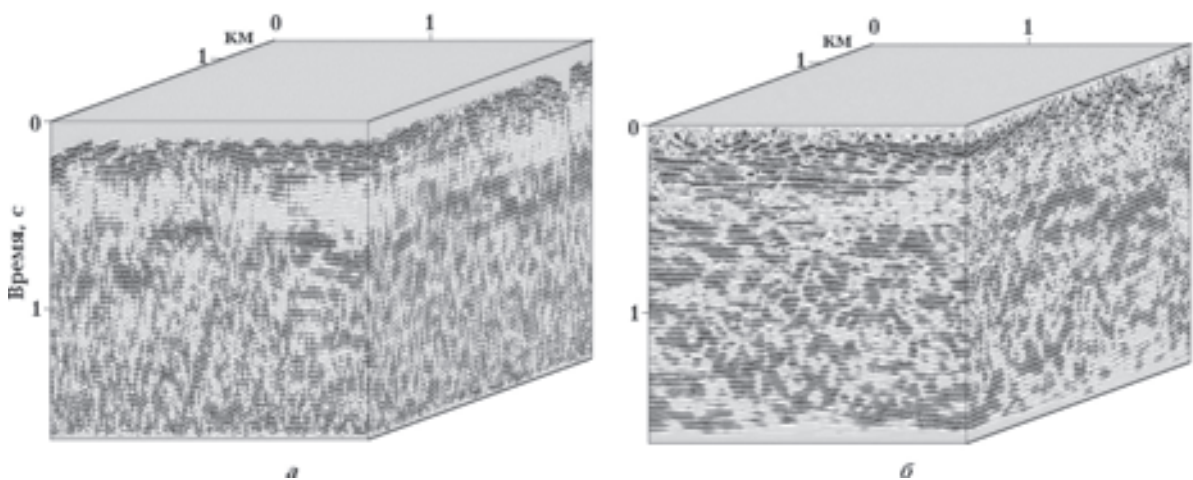


Рис. 6. Сравнение наблюдаемого волнового поля после применения автоматической коррекции остаточных статических поправок и исключения волн-помех (а), а также результата применения к нему конечно-разностной трехмерной полноволновой миграции во временном масштабе глубин (б).

ческих поправок и исключения волн-помех, а также результат применения к нему предложенного варианта трехмерной миграции. Как видно из рис. 5 и 6, трехмерная полноволновая миграция во временном масштабе глубин позволяет получить информацию о строении среды даже при наличии в наблюдаемом волновом поле значительных техногенных помех и в сложных сейсмогеологических условиях, что является характерным для шахтных полей. При этом подготовительный этап дает возможность значительно улучшить результат миграции (см. рис. 6), что, в свою очередь, позволит более качественно выполнить дальнейшую интерпретацию сейсмических данных.

Заключение. Предложенная 3D конечно-разностная полноволновая миграция во временном масштабе глубин является миграцией суммы ОГТ и позволяет быстро получить предварительную информацию о строении тонкослоистого разреза, характерного для шахтных

полей. При этом в качестве исходных параметров используются суммотрассы ОГТ и скоростная модель среды.

Описанный граф предварительной обработки материала является стандартным при обработке любых материалов сейсморазведки методом многократных перекрытий и приведен в работе с целью подчеркнуть важность применения из всего обилия программ, реализующих ту или иную процедуру обработки, именно той, которая корректирует, а не искажает первичное волновое поле. В первую очередь это относится к процедурам, вносящим временные сдвиги в сейсмические трассы.

Как показано на примере трехмерных данных, наблюдаемых в районе шахтных полей, такой подход значительно улучшает качество обработки и гарантирует получение реальной информации о глубинном положении границ раздела и объектов разведки в изучаемом разрезе.

Список литературы

- Анциферов А. В., Туркель М. Г., Анциферов В. А. Сейсмическая разведка углепородных массивов. Донецк: Вебер, 2008. 204 с.
- Верпаховская А. О., Пилипенко В. Н., Коболев В. П. Особенности обработки морских сейсмических наблюдений с использованием конечно-разностной полноволновой миграции. *Геофиз. журн.* 2013. Т. 35. № 5. С. 187—195.
- Дядюра В. А., Будкевич В. Б. Определение корректирующих статических поправок по ансамблям равноудаленных трас сейсморазведки 3D. *Сборник научных трудов УкрГГРИ.* Киев: Изд. УкрГГРИ, 2005. № 3. С. 71—83.
- 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.
- Пилипенко В. Н., Верпаховская А. О., Кекух Д. А., Пилипенко Е. В. Продолжение временного поля в трехмерной неоднородной среде в процедурах обработки и интерпретации сейсмических данных. *Геоинформатика.* 2011. № 4. С. 32—43.
- Самарский А. А. Теория разностных схем. Москва: Наука, 1983. 616 с.
- Bancroft J. C., 2007. A Practical Understanding of Pre- and Poststack migration. Vol. 1 (Poststack). Issue 13 of Course notes series. SEG Books, Science. 486 p.
- Chun J. H., Jacewitz C., 1981. Fundamentals of frequency-domain migration. *Geophysics* 46, 717—732.
- Claerbout J. F., Doherty S. N., 1972. Downward continuation of moveout corrected seismograms. *Geophysics* 37, 741—768.
- Gazdag J., 1978. Wave-equation migration by phase shift. *Geophysics* 43, 124—131.
- Hale D., 1991. 3-D depth migration by McClellan transformations. *Geophysics* 56, 1778—1785.
- Li Z., 1986. Wave-field extrapolation by the linearly transformed wave equation. *Geophysics* 51, 1538—1551.
- Hoffe B. H., Burton A. J., Lines L. R., 1997. Comparison of 2D pre-stack and 3D post-stack migrations from the Matagami mining camp, Québec. *CREWES Res. Report* 9, 36—11.
- Mayne W. H., 1962. Horizontal data stacking techniques. *Supplement to Geophysics* 27, 927—938.
- Nemeth B., Danyluk T., Prugger A., 2002. Benefits of 3D poststack depth migration: Case study from the Potash Belt of Saskatchewan Corporation of Saskatchewan Steve Halabura — North Rim Exp. *CSEG Geophysics*, P. 4.
- Reshef M., Kessler D., 1989. Practical implementation of three-dimensional poststack depth migration. *Geophysics* 54, 309—318.
- Yilmaz O., 2001. Seismic Data Analysis: Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data. Vols. 1 & 2. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa Oklahoma, 2027 p.

Formation of three-dimensional image of the medium by the sum of CDP for the studies of geological structure of mine fields

© V. N. Pilipenko, A. O. Verpakhovskaya, V. B. Budkevich, E. V. Pilipenko, 2015

Traditionally, seismic observations are carried out by the reflected wave method with multiple overlaps. Thus, the primary result of the processing of such data is the sum of CDP. For further imaging there is necessary to have the correct variant of migration without restrictions on the angle of reflectors, which is particularly important for the study of the geological structure of the mine fields.

The paper presents a three-dimensional variant of the full-wave finite-difference migration in the time scale of the depths. That variant allows defining delicate structural features of the environment, the velocity model of which can be non-uniform across the board. The effectiveness of the proposed method to study the geological structure of the mine fields is demonstrated on a model example and practical materials observed in the Donbas region.

Key words: 3D image, migration by CMP sum, mine fields.

References

- Antsiferov A. V., Tirkel M. G., Antsiferov V. A.*, 2008. Seismic rock mass. Donetsk: Veber, 204 p. (in Russian).
- Verpakhovskaya A. O., Pilipenko V. N., Kobolev V. P.*, 2013. Specifics of processing marine seismic observations using full-wave finite difference migration. *Geofizicheskiy zhurnal* 35(5), 187—195 (in Russian).
- Dyadyura V. A., Budkevich V. B.*, 2005. Definition corrective static corrections for seismic ensembles equidistant Trace 3D. *Collection of scientific papers UkrGGRI*. Kiev: UkrGGRI Publ., number 3, 71—83 (in Russian).
- Pilipenko V. N., Verpakhovskaya A. O., Gnevush V. V.*, 2012. The finite-difference migration wave source seismograms common shot in the time domain. *Geofizicheskiy zhurnal* 34(3), 40—48 (in Russian).
- Pilipenko V. N., Verpakhovskaya A. O., Kekukh D. A., Pilipenko E. V.*, 2013. Continued time field in the three-dimensional inhomogeneous medium, the processing procedure and interpretation of seismic data. *Geoinformatika* (4), 32—43 (in Russian).
- Samarskiy A. A.*, 1983. Theory of difference schemes. Moscow: Nauka, 616 p. (in Russian).
- Bancroft J. C.*, 2007. A Practical Understanding of Pre- and Poststack migration. Vol. 1. (Poststack). Issue 13 of Course notes series. SEG Books, Science. 486 p.
- Chun J. H., Jacewitz C.*, 1981. Fundamentals of frequency-domain migration. *Geophysics* 46, 717—732.
- Claerbout J. F., Doherty S. N.*, 1972. Downward continuation of moveout corrected seismograms. *Geophysics* 37, 741—768.
- Gazdag J.*, 1978. Wave-equation migration by phase shift. *Geophysics* 43, 124—131.
- Hale D.*, 1991. 3-D depth migration by McClellan transformations. *Geophysics* 56, 1778—1785.
- Li Z.*, 1986. Wave-field extrapolation by the linearly transformed wave equation. *Geophysics* 51, 1538—1551.
- Hoffe B. H., Burton A. J., Lines L. R.*, 1997. Comparison of 2D pre-stack and 3D post-stack migrations from the Matagami mining camp, Québec. *CREWES Res. Report* 9, 36—11.
- Mayne W. H.*, 1962. Horizontal data stacking techniques. *Supplement to Geophysics* 27, 927—938.
- Nemeth B., Danyluk T., Prugger A.*, 2002. Benefits of 3D poststack depth migration: Case study from the Potash Belt of Saskatchewan Corporation of Saskatchewan Steve Halabura — North Rim Exp. CSEG Geophysics, P. 4.
- Reshef M., Kessler D.*, 1989. Practical implementation of three-dimensional poststack depth migration. *Geophysics* 54, 309—318.
- Yilmaz O.*, 2001. Seismic Data Analysis: Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data. Vols. 1 & 2. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa Oklahoma, 2027 p.