

Особенности обработки морских сейсмических наблюдений с использованием конечно-разностной полноволновой миграции

© А. О. Верпаховская, В. Н. Пилипенко, В. П. Коболев, 2013

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 27 июля 2013 г.

Представлено членом редколлегии В. Д. Омельченко

Розглянуто особливості та основні принципи побудови графу обробки морських сейсмічних спостережень із застосуванням оригінального методу скінченнорізницевої повнохвильової міграції суми загальної глибинної точки, який є стійкішим у разі вивчення складнопобудованих геологічних розрізів. Ефективність методу показана на матеріалах сейсмічних морських спостережень, виконаних на континентальному схилі північно-західного шельфу Чорного моря.

Features and basic principles of plotting the graph of marine seismic observations processing with application of original method of finite-difference total wave migration of the sum of central middle point, which is more stable in case of investigation of complicated geological sections have been considered. The effectiveness of the method is demonstrated on materials of seismic marine observations performed on the continental slope of northwestern shelf of the Black Sea.

Введение. Обработка сейсмических наблюдений включает два основных этапа. На первом непосредственно во время проведения наблюдений выполняется "экспресс" или предварительная обработка зарегистрированных данных. Детальная обработка на втором этапе требует более тщательного выбора параметров и подбора более сложных процедур для получения качественного результата, необходимого для последующей геологической интерпретации [Дядюра и др., 1980].

При обработке сейсмических наблюдений определяется последовательность применяемых процедур, или же граф обработки, выбор которого зависит от поставленных задач, применяемой системы наблюдений и качества зарегистрированного волнового поля. Граф предварительной обработки обеспечивает оценку качества сейсмических данных, соответствия выбранной методики наблюдений поставленным задачам, возможность получения первичной информации об особенностях геологического строения района исследований с целью

оптимизации размещения сейсмических профилей и подготовки первичных данных для последующей детальной обработки.

Существует ряд процедур, которые являются неотъемлемыми элементами стандартного графа обработки сейсмических наблюдений [Полшков и др., 1984]. Однако данные морской сейсморазведки несколько отличаются от волновых полей, зарегистрированных при наземных работах [Хаттон и др., 1989; Орленок, 1997]. Это обусловлено спецификой морских наблюдений и характером зарегистрированного волнового поля, что естественно влияет на состав процедур в графе обработки. Основные различия между морскими и наземными данными заключаются в геометрии наблюдений, отсутствии статических поправок, различных типах источников и приемников.

Морские сейсмоприемники (гидрофоны) регистрируют давление, в то время как наземные — измеряют скорость смещения частиц среды. Поскольку давление и скорость различаются по фазе на 90° , это существенно отра-

жается при регистрации волнового поля. Отношение сигнал/помеха при проведении морской сейсморазведки выше, чем на записях при наземной регистрации колебаний. При сухопутных наблюдениях дополнительными шумами являются поверхностные и звуковые волны, которые отсутствуют при работах на море. В то же время фильтрация морских сейсмических наблюдений является сложным процессом, поскольку зарегистрированное волновое поле кроме кратных волн содержит особые помехи, к которым относятся реверберация и вторичные удары, образующиеся за счет пульсации газового пузыря пневмоисточника [Орленок, 1997].

Детальная обработка более сложная и включает в себя стандартные и специальные процедуры, направленные на получение качественного результата дальнейшей интерпретации зарегистрированных волновых полей. Одной из специальных, и в то же время необходимых, процедур обработки является миграция, которая для данных морских наблюдений, как правило, выполняется после суммирования трасс методом общей глубинной точки (ОГТ) [Gazdag, Sguazzero, 1984; Морская ..., 2004; Stolt, Benson, 1986].

В настоящей статье рассмотрены принципы выбора графа обработки данных морской сейсморазведки методом отраженных волн (МОВ) с учетом их специфики на примере наблюденных волновых полей, зарегистрированных в западной части Черного моря в 2011 г. [Коболев и др., 2011]. При этом в качестве последнего этапа обработки предложен оригинальный метод конечно-разностной полноволновой миграции суммы ОГТ, основанный на аппроксимации волнового уравнения на трехмерной пространственно-временной сетке с 12-точечным шаблоном. Это гарантирует высокую степень аппроксимации дифференциального уравнения конечно-разностным методом, а также устойчивость и точность результата.

Основные этапы обработки и визуализация выполняются с помощью программ системы Seismic Unix (SU), которая выгодно отличается доступностью исходных кодов и возможностью разрабатывать собственные программные продукты для решения конкретных задач сейсморазведки [Stockwell, 1999]. Эффективность применения конечно-разностной полноволновой миграции суммы ОГТ демонстрируется на материалах сейсмических морских наблюдений, зарегистрированных в западной части Черного моря.

Особенности обработки данных морской сейсморазведки МОВ. На начальном этапе на-

блюденные при морской сейсморазведке данные подвергаются "экспресс" обработке. Для получения более детальной информации о глубинном строении района исследований на заключительном этапе применяют миграцию суммы ОГТ. Поскольку "экспресс" обработка выполняется непосредственно во время проведения сейсморазведочных работ, ее граф не должен содержать процедуры, которые требуют значительных временных и машинных ресурсов.

Стандартный граф "экспресс" обработки морских данных включает подготовку сейсмических записей (перевод первичных данных в стандартный формат, редакцию паспортов, исключение из волнового поля неподлежащих обработке частей и т. п.), фильтрацию и регулирование амплитуд, введение предварительных кинематических поправок и получение суммарного временного разреза МОГТ. Подготовка данных сейсморазведки является ответственной процедурой "экспресс" обработки, поскольку зарегистрированные волновые поля необходимо привести к стандартному формату (SEG-Y), внести в паспорт трасс информацию о геометрии наблюдений: координаты источников и приемников, номера ОГТ и т. п. Без подобной подготовки обработка зарегистрированных волновых полей невозможна ни в одной специализированной системе.

Особенностью сейсмических данных, полученных в западной части Черного моря в 71-м рейсе НИС "Профессор Водяницкий" в 2011 г. [Коболев и др., 2011], является система наблюдений. Работы проводились сейсмической косой, состоящей из двенадцати приемников, расстояние между которыми составляло 3 м. При этом первый приемник находился от источника возбуждения колебаний на расстоянии 90 м и был погружен на глубину 3 м. Регистрация колебаний выполнялась с дискретностью 0,005 с, общей длиной 3 с и расстоянием между источниками 12,5 м. Протяженность результирующих галсов при такой системе наблюдений составляла от 40 до 110 км, что свидетельствует о значительном объеме полученного первичного материала.

В специализированной системе обработки сейсмических наблюдений SU, некоторые программы которой используются в исследованиях, существует собственный формат данных [Stockwell, 1999], легко переводимый в стандартный SEG-Y [Barry et al., 1975].

Анализ полученного волнового поля — один из наиболее важных этапов обработки сейсмических данных, поскольку от корректного выделения полезных волн на общем фоне помех зависят все дальнейшие результаты. При проведении наблюдений на акваториях достаточно сильной помехой являются многократные отражения в водной толще (реверберация), для исключения которых наряду с методом суммирования ОГТ [Орленок, 1997] применяют верную фильтрацию [Зенов, Кондратьев, 1972; Herrmann et al., 2008], преобразование Радона [Guitton, 2000; Shankar et al., 2009], предсказание и вычитание на основании волновых уравнений (метод SRME — surface related multiple elimination) [Козлов и др., 1993; Van Borselen et al., 2005]. Еще одной не менее серьезной помехой при морских сейсмических наблюдениях считается возникновение газовых пузырей, которые после срабатывания пневмоисточника, пульсируя, поднимаются к поверхности моря и разрываются. При этом происходит нарушение приема полезных волн, поскольку повторные пульсации действуют как дополнительный источник. Колебания от такого вторичного источника, как правило, регистрируются в волновом поле на временном интервале 0,1—0,15 с от основного отражения.

С целью исключения данного эффекта пневмоисточник заглубляется на 1,5—2 м, что приводит к выбросу в воздух половины энергии пульсации пузыря при разрыве, либо определяется глубина положения пневмоисточника, при которой период пульсации совпадает с периодом основных отражений и усиливает их [Орленок, 1997].

На рис. 1 приведен фрагмент наблюдаемого волнового поля, на котором четко видно влияние эффекта двойного удара в виде дублирующей границы дна (около 0,75 с по времени на волновом поле слева). Для уменьшения и удаления эффектов реверберации и двойного удара на этапе фильтрации применяют деконволюцию. На рис. 2 показан пример наблюдаемого волнового поля без применения фильтрации и регулировки амплитуд (а), с фильтрацией и усилением амплитуды (б) и после процедуры деконволюции (в).

После редакции паспортов трасс (внесение координат профиля, номеров ОГТ и т. п.), применения фильтрации, усиления амплитуд и процедуры деконволюции выполняется суммирование трасс по ОГТ. Для этого в волновое поле вводятся кинематические поправки, которые

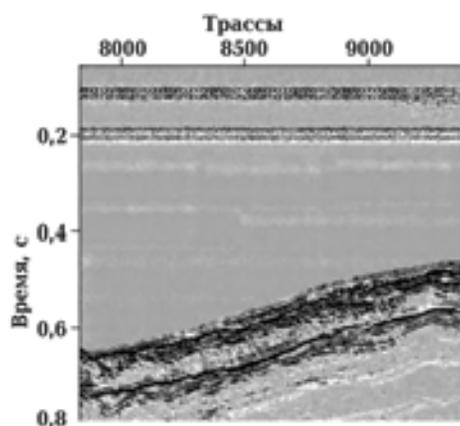


Рис. 1. Фрагмент наблюдаемого волнового поля, демонстрирующий эффект двойного удара.

зависят от значений скорости распространения волн в среде, определяемые, как правило, перебором скоростей. При этом средняя скорость в воде принимается равной 1500 м/с. После внесения кинематических поправок выполняется суммирование трасс по ОГТ. На рис. 3 показана сумма ОГТ для профиля, приведенного на рис. 2.

Учитывая строение региона и особенности системы сейсмических наблюдений, выполненных в западной части Черного моря в 2011 г., был определен наиболее оптимальный вариант формирования глубинного изображения среды с помощью применения конечно-разностной полноволновой миграции суммы ОГТ во временном масштабе глубин.

Алгоритм конечно-разностной полноволновой миграции суммы ОГТ во временном масштабе глубин. Наиболее распространенным вариантом миграции суммы ОГТ является миграция Кирхгоффа, благодаря простоте и скорости получения временного разреза по наблюдаемым данным МОВ—ОГТ [Мешбей, 1973; Chun, Jacewitz, 1981; Dobrin, Savit, 1988; Yilmaz, Doherty, 2001]. В случае сложнопостроенного геологического разреза (резкие углы наклонов и падений границ) миграция Кирхгоффа после суммы может заметно исказить результат обработки. Для изображения таких границ конечно-разностный вариант миграции предпочтительнее, поскольку позволяет задавать скоростную модель среды в дискретном виде и, соответственно, получать результат миграции в каждой точке среды [Пилипенко, Сидорак, 1973; Nan, 1998]. Таким образом, появляется возможность построения разреза среды со всеми особенно-

стями строения крутопадающих отражающих границ и других геологических структур.

Принимая во внимание то, что конечно-разностная полноволновая миграция суммы ОГТ во временном масштабе глубин хорошо зарекомендовала себя на производстве при обработке данных наземной сейсморазведки, было предложено опробовать ее эффективность при формировании изображения среды по данным морских исследований. Для выполнения конечно-разностной полноволновой миграции суммы ОГТ во временном масштабе глубин необходимы следующие входные данные: сумма ОГТ, геометрия наблюдений, которая содержится в паспортах трасс, и априорная информация о значениях скорости распространения волн в среде в виде системы вертикальных годографов или границ по профилю.

Миграция основывается на конечно-разностном решении волнового уравнения, где для перевода во временной масштаб координату глубины заменяем на координату времени:

$$V^2(x, \tau) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} \right) - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0. \quad (1)$$

Здесь $\tau(x, z) = \int_0^z \frac{dz}{V(x, z)}$ — функция глубины в масштабе времени.

Ранее при решении уравнения (1) пользовались заменой системы координат, предложенной Клаербутом [Claerbout, Doherty, 1972], но такой подход имеет ограничения на угол подхода волн к сейсмоприемникам. Поэтому воспользуемся полноволновым продолжением, а также новой системой пространственно-временных координат [Li, 1986]:

$$\begin{aligned} x' &= x; \quad \tau' = \frac{1}{\sqrt{2}} \tau - \frac{1}{\sqrt{2}} t; \\ t' &= \frac{1}{\sqrt{2}} \tau + \frac{1}{\sqrt{2}} t. \end{aligned} \quad (2)$$

Переход к полноволновому продолжению отличается сменой сеточного заполнения пространственно-временной области, которое в данном случае подчиняется поведению осей системы координат и именно им соответствуют сеточные линии (2). При двумерном продолжении волнового поля используется трехмерная пространственно-временная сетка, проекция кото-

рой на плоскость τ', t' и 12-точечный шаблон представлены на рис. 4 (см. с. 193).

Для полноволнового продолжения поля система координат разностной сетки повернута в пространственно-временной области на 45° с сохранением ее ортогональности. Благодаря этому достигается соответствие линий разностной сетки основному направлению распространения отраженных волн и, следовательно, можно получить удовлетворительную аппроксимацию поля при задании относительно больших сеточных шагов по глубине.

Разностное уравнение, которое аппроксимирует дифференциальное уравнение с точностью $O(\Delta x^4, \Delta \tau^2, \Delta t^2)$ на 12-точечном шаблоне сетки (рис. 4, б), имеет вид

$$\begin{aligned} \left[2L_{\tau t} \left(1 + \frac{\Delta x^2}{12} L_{xx} \right) + \left(E + \frac{\Delta \tau}{2} L_{\tau} + \frac{\Delta t}{2} L_t + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\Delta \tau \Delta t}{4} L_{\tau t} \right) V_{i, j+1/2}^2 L_{xx} \right] u_{i, j}^k = 0, \quad (3) \end{aligned}$$

где E — единичный оператор; $V_{i, j+1/2}$ — скорость в сеточных координатах; $u_{i, j}^k$ — значение волнового поля в узлах с сеточными координатами (i, j, k) ; $L_{\tau}, L_t, L_{\tau t}, L_{xx}$ — разностные операторы, которые соответствуют дифференциальным операторам.

Уравнение (3) позволяет определять волновое поле на линии сетки $(j+1, k)$, когда на предыдущих линиях сетки $(j+1, k+1), (j, k)$ и $(j, k+1)$ значения поля уже известны.

Граничные условия для конечно-разностного продолжения волнового поля таковы:

$$\begin{aligned} u_{i, 0}^k &= U_i^k, \quad u_{0, j}^k = 0, \quad u_{n, j}^k = 0, \\ u_{i, m}^k &= 0, \quad u_{i, j}^p = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

где U_i^k — волновое поле исходных сейсмотрасс ОГТ.

Таким образом, задача конечно-разностного полноволнового продолжения формируется уравнением (3) и граничными условиями (4), при этом изображение среды $w_{i, j}$ формируется при условии $w_{i, j} = u_{i, j}^0$.

Для получения корректного решения конечно-разностной задачи необходимо, кроме определения степени аппроксимации дифференциального уравнения, убедиться в устойчивости

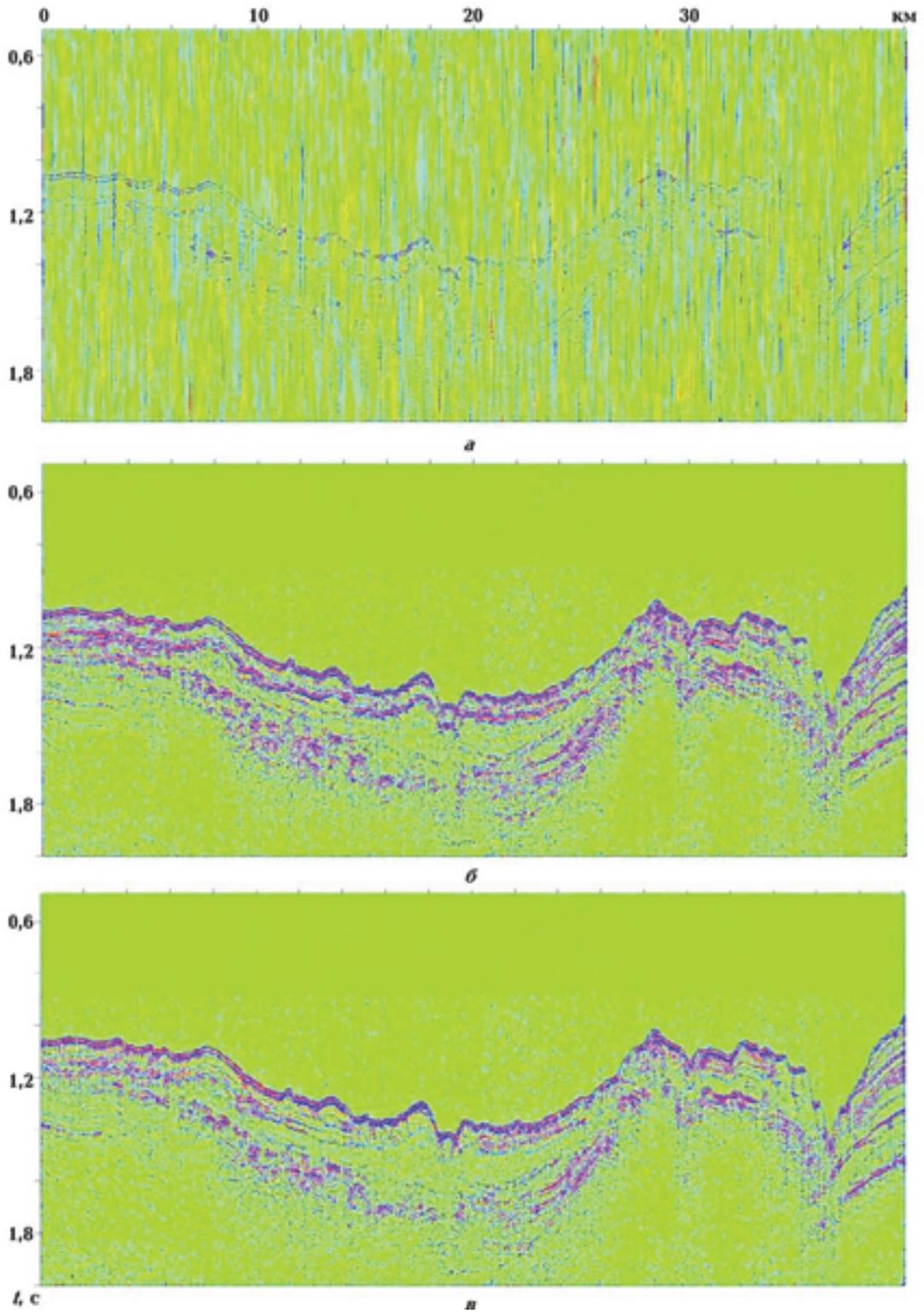


Рис. 2. Наблюдаемое волновое поле (а), после применения фильтрации и усиления уровня амплитуд (б), после применения деконволюции (в).

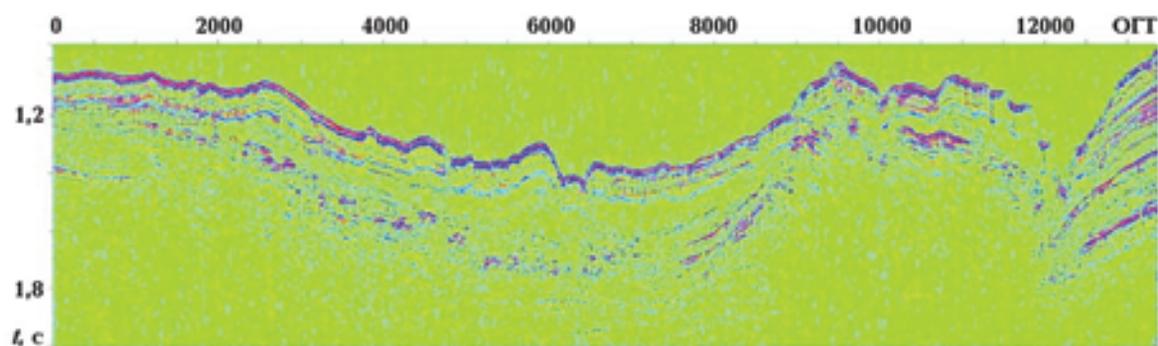


Рис. 3. Сумма ОГТ для профиля, изображенного на рис. 2.

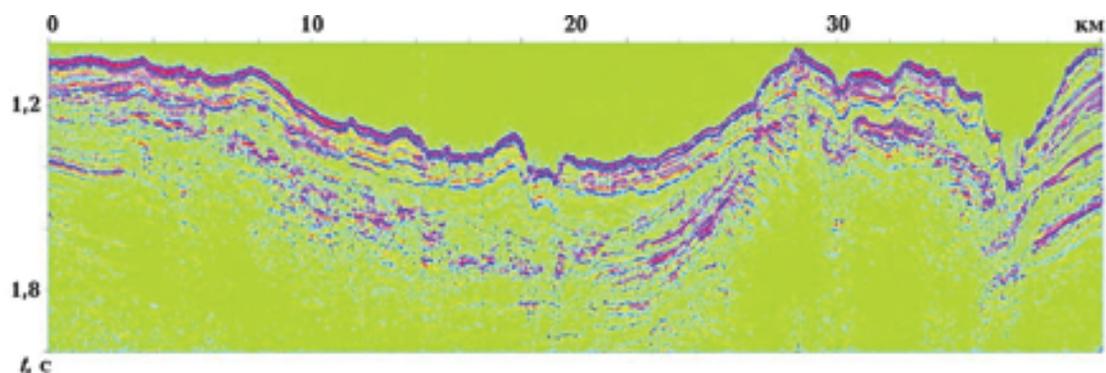


Рис. 5. Результат применения конечно-разностной полноволновой миграции суммы ОГТ во временном масштабе глубин.

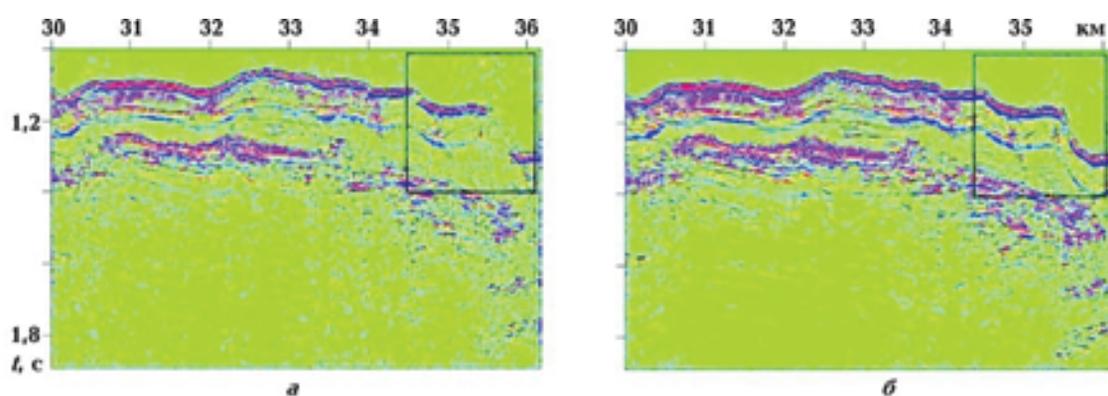


Рис. 6. Фрагменты временного разреза в интервале 34000—36000 м: *а* — сумма ОГТ; *б* — результат применения конечно-разностной полноволновой миграции суммы ОГТ во временном масштабе глубин. Прямоугольником выделен участок с нарушениями, где показана эффективность применения миграции.

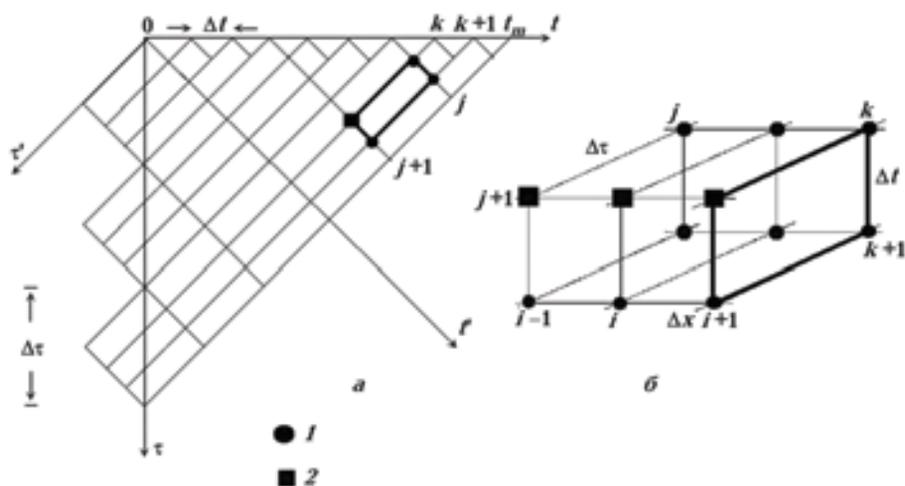


Рис. 4. Прямоугольная сетка обратного полноволнового продолжения поля: *a* — сечение сетки в плоскости; *б* — трехмерный 12-точечный шаблон (1 — узлы сетки, в которых волновое поле определено, 2 — узлы сетки, в которых волновое поле определяется).

разностного расчета. Устойчивость представленной схемы была доказана операторным методом ее оценки [Самарский, Гулин, 1973]. Продолжение волнового поля конечно-разностным методом составляет основу алгоритма программной реализации миграции суммы ОГТ во временном масштабе глубин, который предусматривает также подготовку входных данных и скоростной модели среды, выбор параметров миграции и на заключительном этапе формирование изображения среды.

Применение конечно-разностной полноволновой миграции суммы ОГТ во временном масштабе глубин. Описанный метод конечно-разностной полноволновой миграции суммы ОГТ во временном масштабе глубин был использован при обработке морских сейсмических данных МОВ, полученных в 2011 г. на акватории Черного моря. На рис. 5 показан результат применения конечно-разностной полноволновой миграции во временной области. Сформированное изображение ввиду достаточно большой протяженности профиля (около 40 км) сжато в горизонтальном масштабе, что не позволяет в полном объеме увидеть различия между двумя изображениями и оценить преимущества результата миграции просто перед суммой ОГТ (см. рис. 3).

Увеличенные фрагменты результатов суммы ОГТ (см. рис. 3) и конечно-разностной полноволновой миграции суммы ОГТ во временном масштабе глубин (см. рис. 5) в интервале 30 000—36 200 м сейсмического профиля пред-

ставлены на рис. 6. Здесь четко видны различия в изображении неоднородностей геологического строения. Так, если в результате суммы ОГТ резкие неоднородности выглядят несколько сглаженными, то после применения конечно-разностной миграции неоднородности принимают более контрастный вид. Обращает на себя внимание крутопадающая граница (ПК 34 000 и 36 000 м, выделенная на обоих изображениях прямоугольником), которая на разрезе суммы ОГТ практически не проявляется, тогда как на миграционном разрезе ее можно уверенно проследить.

Таким образом, применение конечно-разностной полноволновой миграции суммы ОГТ во временной области позволяет более четко отобразить элементы тектонического строения района исследования при обработке данных морской сейсморазведки МОВ, что при правильном выборе процедур предварительной обработки может гарантировать их качественную интерпретацию.

Выводы. При составлении графа обработки сейсмических наблюдений необходимо учитывать используемое оборудование и расстановку в системе наблюдений, особенности зарегистрированного волнового поля, а также условия глубинного строения изучаемого разреза. Особое значение в графе детальной обработки данных занимает выбор варианта миграции для формирования изображения среды, особенно в случае исследования сложнопостроенных разрезов.

Как показано на примере, рассмотренный вариант конечно-разностной полноволновой миграции суммы ОГТ во временном масштабе глубин в сочетании с тщательно подобран-

ным графом предварительной обработки представляется эффективным методом формирования глубинного изображения геологического строения дна акваторий.

Список литературы

- Дядюра В.А., Турчаненко Н.Т., Кившик Н.К., Будкевич В.Б., Золотаренко В.Я., Петрик Д.В., Рева А.Ф., Сергей Г.Б. Обработка сейсмической информации на ЭВМ. — Киев: Техника, 1980. — 183 с.
- Зенов А.А., Кондратьев И.К. Теоретические предпосылки использования обратной и веерной фильтрации в методе ОГТ // Прикл. геофизика. — Вып. 66. — Москва: Недра, 1972. — С. 73—82.
- Коболев В.П., Буртный П.А., Верпаховская А.О., Довбыш С.Н., Жук В.Ф., Любицкий А.А., Михайлюк С.Ф., Чулков С.С., Яцота Д.О. 71-й рейс НИС "Профессор Водяницкий" — комплексные экспедиционные исследования в западной части Черного моря // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. — 2011. — № 4. — С. 94—99.
- Козлов Е.А., Гогоненков Г.Н., Мушин Н.А., Мешбей В.И., Климович Н.И., Яновский И.И. Цифровая обработка сейсмических данных. — Москва: Недра, 1993. — 312 с.
- Мешбей В.И. Сейсморазведка методом общей глубинной точки. — Москва: Недра, 1973. — 152 с.
- Морская сейсморазведка / Под ред. А.Н. Телегина. — Москва: ООО "Геоинформмарк", 2004. — 237 с.
- Орленок В.В. Морская сейсмоакустика: Учеб. пособие. — Калининград: Изд-во Калининград. ун-та, 1997. — 150 с.
- Пилипенко В.Н., Сигорак Д.И. Преобразование сейсмических записей в изображении среды // Сейсмические методы поиска и разведки полезных ископаемых. — Киев: Знание, 1973. — С. 15—17.
- Полишков М.К., Козлов Е.А., Мешбей В.И., Крейсберг В.М., Борковский Г.М., Цукерник В.Б., Климович Н.И., Иванов В.А., Табаков Г.Г. Системы регистрации и обработки данных сейсморазведки. — Москва: Недра, 1984. — 381 с.
- Самарский А.А., Гулин А.В. Устойчивость разностных схем. — Москва: Наука, 1973. — 416 с.
- Хаттон Л., Уэргингтон М., Мейкин Дж. Обработка сейсмических данных. Теория и практика. — Москва: Мир, 1989. — 216 с.
- Barry K.M., Cavers D.A., Kneale C.W. Report on recommended standards for digital tape formats // Geophysics. — 1975. — 40, № 2. — P. 344—352.
- Chun J.H., Jacewitz C.A. Fundamentals of Frequency Domain Migration // Geophysics. — 1981. — 46, № 5. — P. 717—733.
- Claerbout J.F., Doherty S.N. Downward continuation of moveoutcorrected seismograms // Geophysics. — 1972. — 37, № 5. — P. 741—768.
- Dobrin M.B., Savit C.H. Introduction to Geophysical Prospecting. — New York: McGraw-Hill, 1988. — 867 p.
- Gazdag J., Sguazzero P. Migration of Seismic Data // Proc. IEEE. — 1984. — 72, № 10. — P. 1302—1315.
- Guitton A. Prestack Multiple Attenuation Using the Hyperbolic Radon Transform. Stanford Exploration Project, 2000. — Report 103. — P. 123—195.
- Han B. A comparison of four depth-migration methods: 68 Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts. — 1998. — P. 1104—1107.
- Herrmann F.J., Wang D., Verschuur D.J. Adaptive curvelet-domain primary-multiple separation // Geophysics. — 2008. — 73, № 3. — A17—A21.
- Li Zhi. Wave-field extrapolation by the linearly transformed wave equation // Geophysics. — 1986. — 51, № 8. — P. 1538—1551.
- Shankar U., Singh Sh., Sain K. Signal enhancement and multiple suppression using Radon transform: an application to marine multichannel seismic data // Marine Geophys. Res. — 2009. — 30. — P. 85—93
- Stockwell Jr.J.W. The CWP/SU: Seismic Unix Package // Computers and Geosciences. — 1999. — 25, № 4. — P. 415—419.

Stolt R. H., Benson A. K. Seismic migration: Theory and Practice in Handbook of Geophysical Exploration. — London: Geophysical Press, UK, 1986. — 382 p.

Van Borselen R. G., Schonewille M. A., Hegge R. F. 3D surface-related multiple elimination: acquisi-

tion and processing solutions // The Leading Edge. — 2005. — **24**. — P. 260—268.

Yilmaz O., Doherty M. Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data. — Tulsa, USA: Soc. Explor. Geophys, 2001. — 1030 p.