

Методика изображения кристаллического фундамента по данным ГСЗ

А. О. Верпаховская, 2021

Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина
Поступила 26 августа 2021 г.

Метод глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) имеет системы наблюдений с нерегулярным расположением вдоль профиля как источников сейсмических колебаний, так и их приемников, значительным шагом между приемниками, а также максимальными расстояниями источник—приемник, превышающими несколько сотен километров. Данные ГСЗ позволяют получить изображение кристаллического фундамента с применением сейсмической динамической миграции поля отраженных/рефрагированных волн. Основная часть известных методов миграции, применение которых дает возможность сформировать изображение глубинного строения района исследований в динамических характеристиках зарегистрированного волнового поля, ориентирована на обработку сейсмических данных, полученных методом отраженных волн с системами наблюдений многократными перекрытиями (МОВ—ОГТ). Как правило, эти методы миграции рассчитаны на плавное изменение скорости с глубиной. Вместе с тем на границе кристаллического фундамента скорость изменяется очень резко, что необходимо учитывать при обработке данных с применением миграции.

Предлагаемая методика построения изображения кристаллического фундамента основана на применении конечно-разностной миграции поля отраженных/рефрагированных волн, которая разработана в Институте геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины. Данный метод динамической миграции рассчитан на выделение закритически отраженных и рефрагированных волн, зарегистрированных от толщи фундамента в дальней зоне источника, и учитывает полную траекторию прохождения волнами двухслойной среды, на границе которой происходит значительный скачок скорости. Таким образом, миграция поля отраженных/рефрагированных волн позволяет получить корректное изображение строения преломляющей толщи кристаллического фундамента.

В статье подробно описан алгоритм методики построения изображения кристаллического фундамента с применением конечно-разностной миграции поля отраженных/рефрагированных волн и его отличие от подобных методов миграции. Показаны преимущества и недостатки предложенной методики при решении задач региональных сейсмических исследований. Объяснены и проиллюстрированы особенности построения изображения нарушений на границе фундамента. Эффективность методики демонстрируется на модельном примере и реальных сейсмических данных, наблюденных методом ГСЗ на территории Украины.

Ключевые слова: региональная сейсморазведка, ГСЗ, конечно-разностная миграция, продолжение временного поля, продолжение волнового поля, рефрагированные волны, кристаллический фундамент.

Введение. Построение изображения глубинного строения геологической среды по данным ГСЗ требует специальных методов сейсмической миграции, которые должны предусматривать обработку вол-

нового поля, зарегистрированного в дальней зоне источника. Система наблюдений ГСЗ предполагает не только значительные расстояния между источником и приемниками, но и, как правило, нерегулярность в

их размещении. Кроме того, шаг при ГСЗ между приемниками достигает нескольких километров в отличие от метода отраженных волн многократными перекрытиями (МОВ—ОГТ), при котором он равен 10—50 м, что не может сказываться на детальности исследований. Таким образом, система наблюдений ГСЗ, обладая преимуществом — позволяет уменьшить затраты на выполнение работ, имеет существенные недостатки — низкую детальность и сложность обработки зарегистрированных данных, поскольку при использовании сейсмической миграции необходимо учитывать дальнюю зону источника, где наряду с закритически отраженными регистрируются и рефрагированные волны.

Сейсмические исследования методом ГСЗ успешно применяются и в настоящее время в разных странах как на континентах, так и на морских акваториях [Hu et al., 2004; Старостенко, Стифенсон, 2006; Starostenko et al., 2012; Кашубин и др., 2016]. Естественно, что различия между ГСЗ и МОВ—ОГТ, детально рассмотренные ранее [Верпаховская и др., 2017], приводят к необходимости поиска наиболее корректных и эффективных методов сейсмической миграции для получения качественного изображения строения геологической среды и разработки методик их применения.

Основным общепризнанным результатом обработки данных ГСЗ (WARRP) является скоростная модель среды, которая рассчитывается обычно по временам прихода (годограммам) отраженных и преломленных волн. При этом метод лучевого моделирования [Алексеев, Гельчинский, 1959; Červený et al., 1977] широко используется и в настоящее время при построении скоростных разрезов [Павленкова, 1999; Grad et al., 2003; Старостенко, Стифенсон, 2006; Кашубин и др., 2016], и лишь иногда для этого используется метод сейсмической томографии [Zelt et al., 2003; Zhou et al., 2010; Berry, 2013; Сакулина и др., 2016]. Таким образом, при традиционной обработке данных ГСЗ используется только кинематика волн. В то же время по опыту обработки данных МОВ—ОГТ было ясно,

что сформированное глубинное изображение среды с применением динамической миграции дает возможность получить дополнительные детали внутреннего строения геологического разреза и более полно использовать как кинематические, так и динамические характеристики наблюдаемого волнового поля.

Если говорить об общем алгоритме динамической миграции, то основными его составляющими является решение волнового уравнения и определение кинематического условия для формирования изображения среды. Именно на разности подходов к их реализации и основывается различие существующих методов динамической миграции. В статье [Jones, 2014] сделан обзор существующих современных подходов к определению кинематического условия для формирования изображения при выполнении динамической миграции. Автор разделил методы миграции в соответствии с их теоретическими основами на те, которые основываются на лучевой теории (миграцию Кирхгоффа и лучевую миграцию (beam migration)) и на экстраполяцию волнового поля. Вторую группу он делит на два больших класса в зависимости от учета вертикального направления распространения волн: односторонние (one-way wave equation wavefield extrapolation migration или часто ее называют просто WET) и двусторонние (two-way wave-equation reverse time migration — RTM). В то же время Джонс подчеркивает, что в основе всех методов миграции заложена концепция построения изображения по точке отражения, которая была предложена Кларбаутом [Claerbout, 1985].

Метод RTM является очень распространенным за рубежом вариантом динамической миграции и по теоретическим основам наиболее приближен к конечно-разностному методу, который разработан в Институте геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины. На рис. 1 схематически показаны алгоритмы RTM (рис. 1, а), конечно-разностной миграции поля отраженных (рис. 1, б) и поля отраженных/рефрагированных волн (рис. 1, в).

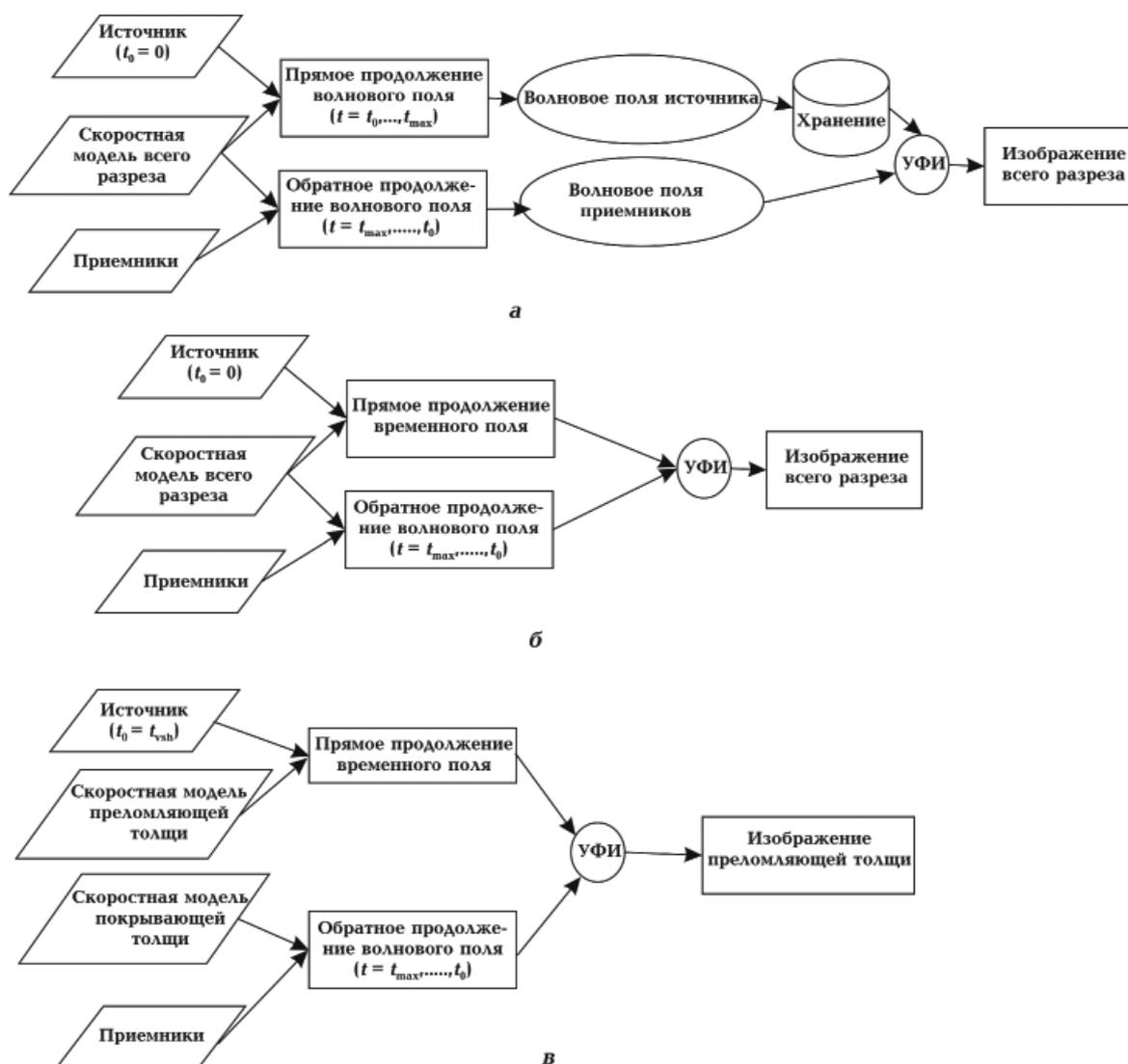


Рис. 1. Сопоставление алгоритмов миграции в обратном времени (RTM) (*а*) и конечно-разностной миграции поля отраженных (*б*) и отраженных/рефрагированных волн (*в*).

Fig. 1. Comparison of migration algorithms: *а* — reverse time migration (RTM); *б* — finite-difference reflected migration; *в* — finite-difference reflected/refracted.

Как видно из рисунка, отличие метода RTM заключается в том, что при его выполнении используются два продолжения волнового поля: прямое от источника и обратное от приемников. Данный подход предвидит необходимость сохранения обоих рассчитанных волновых полей в памяти компьютера, что в случае большого объема наблюдаемых данных создает дополнительные требования к ресурсам во время обработки.

В разработанном в Институте геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины ме-

тоде конечно-разностной миграции как поля отраженных, так и поля отраженных/рефрагированных волн использована комбинация прямого продолжения временного поля от источника и обратного продолжения волнового поля от приемников. Кроме того, необходимо отметить, что в отличие от миграции поля отраженных волн при миграции поля отраженных/рефрагированных волн применяются две скоростные модели, которые характеризуют отдельно покрывающую и преломляющую толщ. При этом источник условно пере-

мещается на границу преломления путем пересчета времени $t_0=t_{vsh}$. Эти принципы конечно-разностной миграции поля отраженных и поля отраженных/рефрагированных волн использованы и в трехмерном варианте [Верпаховская и др., 2015; Пилипенко и др., 2016].

Разработка метода миграции поля отраженных/рефрагированных волн, которая рассчитана на обработку данных, зарегистрированных методом ГСЗ, была начата в Институте геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины в 80-е годы прошлого века. В то время в Институте был получен большой объем детальных данных ГСЗ для разных по структуре земной коры и кинематическая интерпретация этих данных проводилась на основе не только головных, но и закритически отраженных и рефрагированных волн [Сологуб и др., 1969; Павленкова и др., 1972]. Именно для такого волнового поля и был предложен вариант динамической конечно-разностной миграции поля отраженных/рефрагированных волн, теория распространения которых предполагает их проникание в преломляющую толщу [Пилипенко, 1990].

Метод конечно-разностной миграции поля отраженных/рефрагированных волн был опробован при изучении разных районов мира. Наиболее детальные результаты использования этого метода были получены для профиля ГСЗ CINCA, который был выполнен в области перехода континент—океан в Южной Америке [Пилипенко и др., 2006; Pavlenkova et al., 2009] и профиля DOBRE, секущего Днепровско-Донецкую впадину [Pilipenko et al., 2011], а также при изучении Карпатского региона [Verpakhovska et al., 2018]. При этом постоянно совершенствуется методология применения конечно-разностного метода миграции отраженных/рефрагированных волн [Пилипенко, Верпаховская, 2003; 2008; Пилипенко и др., 2003; 2011; 2016; Pilipenko et al., 2011, Верпаховская, 2012, 2014; Верпаховская и др., 2017; Verpakhovska et al., 2018].

Разработанный метод динамической миграции поля отраженных/рефрагиро-

ванных волн предполагает отдельную миграцию исходных сейсмограмм для каждого пункта возбуждения колебаний с последующим суммированием полученных индивидуальных глубинных изображений для всей области наблюдений (профиль или площадь) [Пилипенко, Верпаховская, 2008; Верпаховская и др., 2016]. При этом учет полной траектории прохождения преломленными волнами двухслойной среды с резким изменением скорости на границе раздела требует учета скоростной характеристики обоих слоев. Таким образом, алгоритм конечно-разностной миграции поля отраженных/рефрагированных волн имеет ряд различий, которые напрямую связаны с особенностями распространения волн в двухслойной среде. Так как миграционное изображение формируется для каждой контрастной по скорости границы раздела отдельно, то ниже будет рассмотрена методика построения границы кристаллического фундамента.

Метод конечно-разностной динамической миграции поля отраженных/рефрагированных волн был опробован на ряде модельных примеров со скоростными моделями сложного строения среды и применен при обработке данных региональной сейсморазведки, наблюдаемых ГСЗ и WARRP в разных районах мира. Сформированные в результате глубинные изображения позволяют говорить о высокой эффективности метода конечно-разностной миграции поля отраженных/рефрагированных волн при изучении строения границы фундамента.

Необходимо подчеркнуть уникальность разработанного метода миграционных преобразований по полноте используемой информации. Встречаются лишь единичные примеры миграции закритических отражений [McMechan, Fuis, 1987], а при миграции рефрагированных волн многие ученые до сих пор предпочитают для простоты ограничиться кинематическими принципами распространения только головных волн [Телегин и др., 2003; De Franco, 2005]. И при этом используются принципы миграции поля отраженных

волн, выполняемой после суммирования трасс методом общей глубинной точки (ОГТ), в которых преимущественно решение волнового уравнения основано на интеграле Кирхгоффа. Поэтому важной характеристикой рассматриваемого в статье миграционного преобразования является привлечение конечно-разностного решения уравнения эйконала. Таким образом, разработанный метод конечно-разностной миграции поля отраженных/рефрагированных волн на сегодняшний момент является единственным действенным инструментом для формирования изображения кристаллического фундамента по данным ГСЗ, зарегистрированным в удаленной зоне источника.

Особенности алгоритма конечно-разностной динамической миграции поля отраженных/рефрагированных волн. Конечно-разностная динамическая миграция поля отраженных/рефрагированных волн выполняется до суммы по исходным сейсмограммам общего пункта взрыва. К тому же необходимо учитывать, что в отличие от миграции поля отраженных волн миграция поля отраженных/рефрагированных волн позволяет сформировать изображение отдельной контрастной по скорости границы раздела и прилегающей к ней нижней толщи. В то же время, поскольку рефрагированная волна проходит две толщи с разными скоростными характеристиками, то еще одним требованием является учет двух разных скоростных моделей.

На рис. 2 схематически изображен путь прохождения рефрагированной волны двухслойной среды, нижний слой которой соответствует кристаллическому фундаменту. Из точки источника X_0 рефрагированная волна следует в точку перехода из покрывающей в преломляющую толщу X_{vsh} , далее проходит по преломляющей толще и в точке X_{out} возвращается в покрывающую толщу и доходит до приемника. В рассматриваемой методике формирования миграционного изображения кристаллического фундамента применяется следующий принцип, который заключается в условном переносе источника с линии

профиля (X_0) на границу фундамента (X_{vsh}) путем расчета и замены времени вступления волны $t_0=t_{vsh}$ и условия формирования изображения (УФИ). Согласно выборке значений продолженного волнового поля в значениях времени, которые соответствуют времени выхода рефрагированной волны из толщи кристаллического фундамента, формируется волновое изображение.

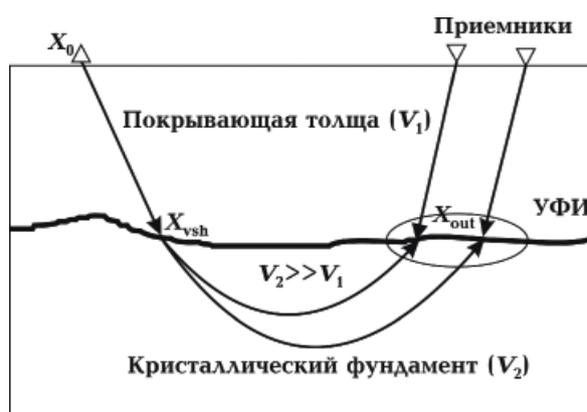


Рис. 2. Схема прохождения рефрагированными волнами двухслойной среды, нижний слой которого соответствует кристаллическому фундаменту.

Fig. 2. Scheme of the propagation of refracted waves of a two-layer environment, the lower layer of which corresponds to the crystalline basement.

На схеме эллипсом показана область, в которой происходит формирование изображения и которая соответствует времени выхода рефрагированных волн из толщи кристаллического фундамента. Такой принцип объясняется тем, что волновое поле в выделенной области содержит полную информацию о строении исследуемой границы и нижележащей толще, что подтверждено соответствующими исследованиями [Пилипенко, Верпаховская, 2008; Верпаховская и др., 2016].

Рассмотрим алгоритм формирования изображения границы кристаллического фундамента, блок-схема которого представлена на рис. 3, более подробно.

Оценка качества и подготовка наблюдаемых волновых полей каждого пункта взрыва. Система наблюдений методом ГСЗ предполагает, что вдоль профиля расположены стационарно приемники и несколько



Рис. 3. Блок-схема алгоритма формирования изображения кристаллического фундамента с применением конечно-разностной миграции поля отраженных/рефрагированных волн.

Fig. 3. Block diagram of an algorithm for forming an image of a crystalline basement using finite-difference reflection/refraction migration.

пунктов взрыва, которые производят с нерегулярным шагом. В миграции поля отраженных/рефрагированных волн используют набор трасс, зарегистрированных при-

емниками от каждого пункта взрыва или сейсмограммы по общему пункту взрыва. Таким образом, на входе имеем волновые поля всех пунктов взрыва, которые были

выполнены вдоль профиля ГСЗ. В то же время не все волновые поля содержат информацию, которая полезна при обработке и интерпретации. На рис. 4 показаны смоделированные волновые поля для двух пунктов взрыва одного профиля ГСЗ. Как видно, левое волновое поле (пункт взрыв ПВ1) не содержит полезной информации и его дальнейшая обработка не даст необходимого результата. Это связано с расположением пункта взрыва по профилю относительно формы исследуемой границы. Так, расположение ПВ1 над нарушением, которое присутствует на преломляющей границе, приводит к регистрации по всему волновому полю достаточно слабой рефрагированной волны. В то же время ПВ2 находится в области горизонтального прохождения границы и его волновое поле содержит всю необходимую информацию о структурных элементах исследуемой границы для формирования ее миграционного изображения. Поэтому оценка качества и отбор волновых полей играет важную роль при формировании изображения кристаллического фундамента.

Подготовка наблюдаемых волновых полей заключается в их приведении к необходимому формату, редакции паспортов трасс, фильтрации, вводе редукции и т. д.

Ввод редукции со скоростью, которая характерна для распространения волн в кристаллическом фундаменте, необходим для сокращения времени расчетов при миграции.

Выбор и подготовка параметров миграции. Параметры миграции зависят от системы наблюдений, а также скоростных характеристик покрывающего слоя и слоя кристаллического фундамента. Готовится параметрический файл для каждого пункта взрыва, который содержит информацию о расположении пункта взрыва на профиле, его глубине, шагах по профилю, времени и глубине при расчетах, начале и конце интервала профиля и времени для миграции, расположении по профилю и глубине границы кристаллического фундамента для пересчета времени $t_0=t_{vsh}$, а также значениями скорости редукции.

Определение и подготовка скоростных параметров среды (двух скоростных моделей). Поскольку, как уже было отмечено, рефрагированные волны проходят два слоя и при этом на границе их раздела значение скорости резко изменяется (см. рис. 2), то необходимо учитывать это изменение не в ущерб корректности миграции. С этой целью при выполнении расчетов используют две разные скоростные модели,

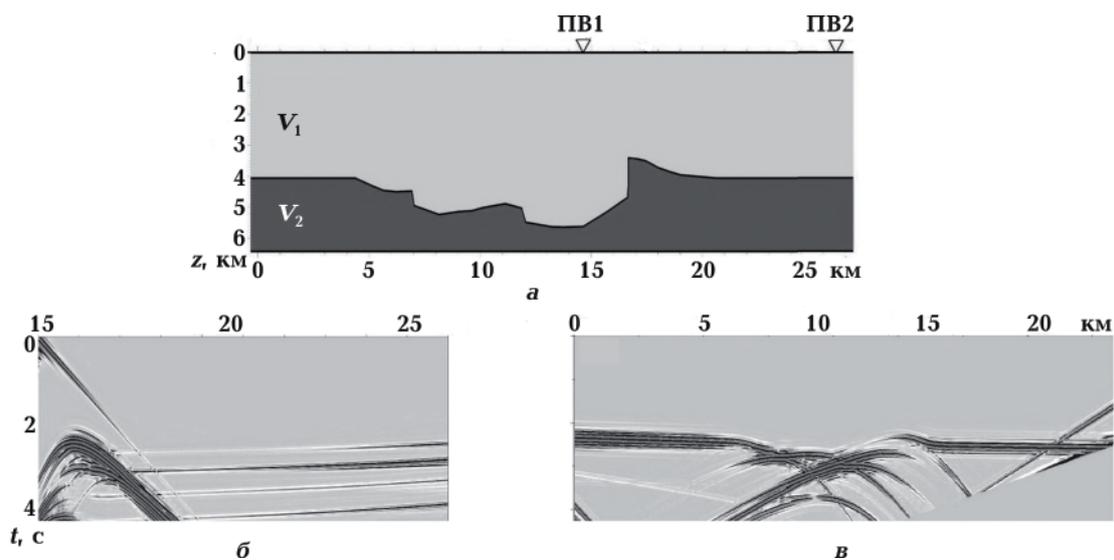


Рис. 4. Демонстрация на модельном примере разного качества волновых полей двух пунктов взрыва одного профиля ГСЗ.

Fig. 4. Demonstration on a model example of different quality of wave fields of two shot points of a DSS profile.

одна из которых характеризует покрывающую среду, а вторая — толщу кристаллического фундамента. Процесс подготовки скоростных моделей предполагает задание параметров среды и значений скоростей вдоль профиля и в глубину, градиентов скорости, шагов по профилю и глубине, а также их общих количеств для выбранного профиля. В случае отсутствия скоростной модели, рассчитанной лучевым методом или томографией, для формирования изображения кристаллического фундамента с применением конечно-разностной миграции поля отраженных/рефрагированных волн была разработана методика конечно-разностной кинематической миграции преломленных волн, которая позволяет по наблюдаемому волновому полю получить всю необходимую информацию о скоростных характеристиках среды [Верпаховская, 2014].

Формирование изображения кристаллического фундамента для одного пункта взрыва. Этот шаг включает выполнение конечно-разностной миграции поля отраженных/рефрагированных волн, который основан на прямом продолжении временного поля от пункта взрыва и обратном продолжении волнового поля от приемников в глубину. Временное поле от пункта взрыва сначала переносится на границу кристаллического фундамента

путем пересчета времени $t_{vsh} = t_0 + X_{vsh}/V_1$, а затем выполняется прямое продолжение временного поля, которое основано на решении конечно-разностной аппроксимации уравнения эйконала с использованием сетки в виде взаимно ортогональной системы лучей γ и изохрон τ (рис. 5, а) при линейном изменении скорости с глубиной z : $V = V_0(1 + \beta z)$, где V_0 — скорость на дневной поверхности, β — константа, определяющая градиент скорости с глубиной. Замена координат будет следующей:

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

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

а уравнение эйконала в новой системе координат будет иметь вид

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

Продолжение временного поля выполняется последовательно на линиях изохрон $\tau = \text{const}$ в направлении роста координаты τ по явной разностной схеме:

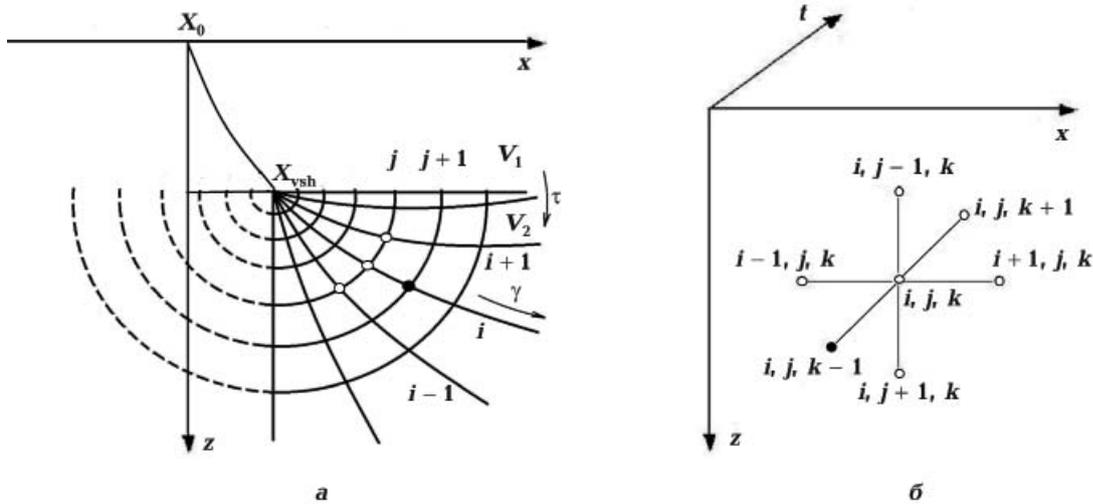


Рис. 5. Разностные сетки для продолжения: временного (а) и волнового поля (б).

Fig. 5. Difference grids for continuation: time (a) and wave field (б).

$$\begin{aligned}
 & t_{j+1}^i = \\
 & = \Delta\tau \sqrt{\frac{1}{V^2\beta^2(\operatorname{ch}\tau - \cos\gamma\operatorname{sh}\tau)^2} - \frac{1}{\operatorname{sh}^2\tau} \frac{b^2}{4\Delta\gamma^2}} + t_j^i + \\
 & + \frac{\Delta\tau^2}{2} \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{V^2\beta^2(\operatorname{ch}\tau - \cos\gamma\operatorname{sh}\tau)^2} - \frac{1}{\operatorname{sh}^2\tau} \frac{a^2}{4\Delta\gamma^2}}} \times \\
 & \times \left\{ \frac{b^2\operatorname{ch}\tau}{4\Delta\gamma^2\operatorname{sh}^3\tau} - \frac{\partial V}{\partial\tau} \frac{1}{\beta^2V^3(\operatorname{ch}\tau - \cos\gamma\operatorname{sh}\tau)^2} - \right. \\
 & \quad \left. \frac{\operatorname{sh}\tau - \cos i_0\operatorname{ch}\tau}{\beta^2V^2(\operatorname{ch}\tau - \cos\gamma\operatorname{sh}\tau)^3} - \right. \\
 & \quad \left. \frac{1}{2\Delta\gamma\operatorname{sh}^2\tau} \sqrt{\frac{1}{V^2\beta^2(\operatorname{ch}\tau - \cos\gamma\operatorname{sh}\tau)^2} - \frac{b^2}{4\Delta\gamma^2\operatorname{sh}^2\tau}} \right. \\
 & \quad \times \left(\frac{\operatorname{sh}\tau\sin\gamma}{\beta^2V^2(\operatorname{ch}\tau - \cos\gamma\operatorname{sh}\tau)^3} + \right. \\
 & \quad \left. \left. + \frac{\partial V/\partial\gamma}{\beta^2V^3(\operatorname{ch}\tau - \cos\gamma\operatorname{sh}\tau)^2} + \frac{bc}{2\Delta\gamma^3\operatorname{sh}^2\tau} \right) \right\}, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где

$$a = t_j^{i+1} - t_j^i; \quad b = t_j^{i+1} - t_j^{i-1}; \quad c = t_j^{i+1} - 2t_j^i + t_j^{i-1};$$

$\Delta\gamma, \Delta\tau$ — шаги по осям сетки.

Как известно [Самарский, Гулин, 1973], в случае явной схемы устойчивость будет условной. Было выполнено исследование устойчивости предложенной схемы (1) и определено условие, физический смысл которого состоит в требовании нахождения луча, который приходит в узел сетки с координатами $(i, j + 1)$ в пределах сеточного шаблона (рис. 5, а) [Пилипенко, Верпаховская, 2003].

Так как продолжение временного поля выполняется с использованием скоростной характеристики только преломляющей толщи, которая в реальности соответствует линейному увеличению скорости с глубиной, то реальные траектории лучей будут близки к радиальным линиям сетки, что позволяет говорить о корректности разностной схемы с учетом природного распространения волн в дальние зоны источника.

Наиболее важным в вычислительном процессе миграции по сложности и требованиям к компьютерным ресурсам является обратное продолжение волнового поля, которое основано на конечно-разностной аппроксимации скалярного волнового уравнения с использованием трехмерной пространственно-временной сетки, шаблон которой приведен на рис. 5, б со следующей заменой координат:

$$x' = x; \quad z' = z; \quad t' = t - \frac{x}{V_r};$$

где x — расстояние до источника колебаний, а V_r — скорость редукции.

Конечно-разностная аппроксимация волнового уравнения на выбранной сетке выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}
 & \left(E - \frac{2V^2(x, z)V_r}{(V_r^2 - V^2(x, z))} \frac{\Delta t}{4\Delta x} L_x - \right. \\
 & \quad \left. - \frac{\sigma\Delta t^2}{\Delta x^2} L_{xx} - \frac{\sigma\Delta t^2}{\Delta z^2} L_{zz} \right) u_{i,j}^{k-1} = \\
 & = \left[2E - \frac{\Delta t^2}{\Delta x^2} \left(2\sigma - \frac{V^2(x, z)V_r^2}{V_r^2 - V^2(x, z)} \right) L_{xx} - \right. \\
 & \quad \left. - \frac{\Delta t^2}{\Delta z^2} \left(2\sigma - \frac{V^2(x, z)V_r^2}{V_r^2 - V^2(x, z)} \right) L_{zz} \right] u_{i,j}^k - \\
 & \quad - \left(E + \frac{2V^2(x, z)V_r}{V_r^2 - V^2(x, z)} \frac{\Delta t}{4\Delta x} L_x - \right. \\
 & \quad \left. - \frac{\sigma\Delta t^2}{\Delta x^2} L_{xx} - \frac{\sigma\Delta t^2}{\Delta z^2} L_{zz} \right) u_{i,j}^{k+1}; \quad (2)
 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 L_x &= u_{i+1,j}^k - u_{i-1,j}^k; \quad L_{xx} = u_{i+1,j}^k - 2u_{i,j}^k + u_{i-1,j}^k; \\
 L_{zz} &= u_{i,j+1}^k - 2u_{i,j}^k + u_{i,j-1}^k;
 \end{aligned}$$

E — единичный оператор; i, j, k — сеточные координаты, σ — константа, которая обеспечивает устойчивость конечно-разностного счета и должна соответствовать условию

$$\sigma > \frac{1}{4} \frac{V_r^2 V^2(x, z)}{(V_r^2 - V^2(x, z))}.$$

Уравнение (2) аппроксимирует дифференциальное волновое уравнение с квадратичной точностью и решается по неявной факторизованной экономной схеме, которая предполагает расщепление оператора при $u_{i,j}^{k-1}$ на умножение двух операторов, соответствующим отдельным осям координат:

$$\begin{aligned} & \left(E - \frac{2V^2(x,z)V_r}{(V_r^2 - V^2(x,z))4\Delta x} L_x - \frac{\sigma\Delta t^2}{\Delta x^2} L_{xx} \right) \times \\ & \quad \times \left(E - \frac{\sigma\Delta t}{\Delta z^2} L_{zz} \right) u_{i,j}^{k-1} = \\ & = \left[2E - \frac{\Delta t^2}{\Delta x^2} \left(2\sigma - \frac{V^2(x,z)V_r^2}{V_r^2 - V^2(x,z)} \right) L_{xx} - \right. \\ & \quad \left. - \frac{\Delta t^2}{\Delta z^2} \left(2\sigma - \frac{V^2(x,z)V_r^2}{V_r^2 - V^2(x,z)} \right) L_{zz} \right] u_{i,j}^k - \\ & - \left(E + \frac{2V^2(x,z)V_r}{V_r^2 - V^2(x,z)} \frac{\Delta t}{4\Delta x} L_x - \frac{\sigma\Delta t^2}{\Delta x^2} L_{xx} - \right. \\ & \quad \left. - \frac{\sigma\Delta t^2}{\Delta z^2} L_{zz} - \frac{2V^2(x,z)V_r}{V_r^2 - V^2(x,z)} \frac{\Delta t^3}{4\Delta x\Delta z^2} L_x L_{zz} + \right. \\ & \quad \left. + \frac{\sigma^2\Delta t^4}{\Delta x^2\Delta z^2} L_{xx} L_{zz} \right) u_{i,j}^{k+1}. \quad (2) \end{aligned}$$

Таким образом, обратное продолжение волнового поля выполняется на каждом временном уровне k последовательно в двух направлениях i и j .

Решение происходит в два этапа методом прогонки. На первом этапе вычисляются коэффициенты прогонки, а на втором выполняется рекуррентный расчет значений волнового поля в обратном направлении от u_N, u_{N-1} до u_1, u_0 [Годунов, Рябенский, 1977].

Задача обратного продолжения волнового поля формулируется как решение системы уравнений (3) с начальными и краевыми условиями:

$$u_{i,j}^k = u_{i,j}^{k-1} = 0; u_{i,0}^k = U_{i,k}; u_{0,j}^k = u_{1,j}^k = 0; u_{i,j}^k = 0,$$

где $U_{i,k}$ — наблюдаемое на земной поверхности волновое поле.

Определение изображения кристалли-

ческого фундамента происходит путем выборки значений амплитуд продолженного волнового поля в соответствии с УФИ:

$$MI(z, x) = U(x, z, t)$$

при условии $t = T(x, z)$, где $MI(z, x)$ — миграционное изображение кристаллического фундамента, $U(x, z, t)$ — амплитуды продолженного волнового поля, а $T(x, z)$ — продолженное временное поле от источника, перенесенного на преломляющую границу.

Проверка корректности и анализ полученных изображений кристаллического фундамента для всех пунктов взрыва. Для проверки корректности полученных результатов использован принцип сравнения встречных изображений одного и того же интервала кристаллического фундамента, полученных для пунктов взрыва, которые расположены с разных сторон от этого интервала. При заданных реальных параметрах миграции наклон и глубина границы фундамента должны совпадать на обоих изображениях. В противном случае необходимо подкорректировать такие параметры, как значения скорости в покрывающем и преломляющем слоях, а также положение (координату профиля и глубину) перенесенного пункта взрыва на границу, поскольку именно эти параметры, как показывают исследования [Пилипенко, Верпаховская, 2003], оказывают наибольшее влияние на точность миграции.

Продемонстрируем изменения результатов миграции при на примере. На рис. 6 (1) показан результат формирования изображения кристаллического фундамента для отдельного пункта взрыва с изменением значений скорости в покрывающем слое: 4600, 4900 и 5100 м/с. При этом реальная скорость в покрывающей толще в районе исследования составляет 4900 м/с. Проанализировав результат, изображенный на рис. 6 (1), заметим, что резкие нарушения также изменяют форму на картинке границы с изменением значения скорости в покрывающей толще.

Изменение значений скорости в преломляющей толще влияет не только на

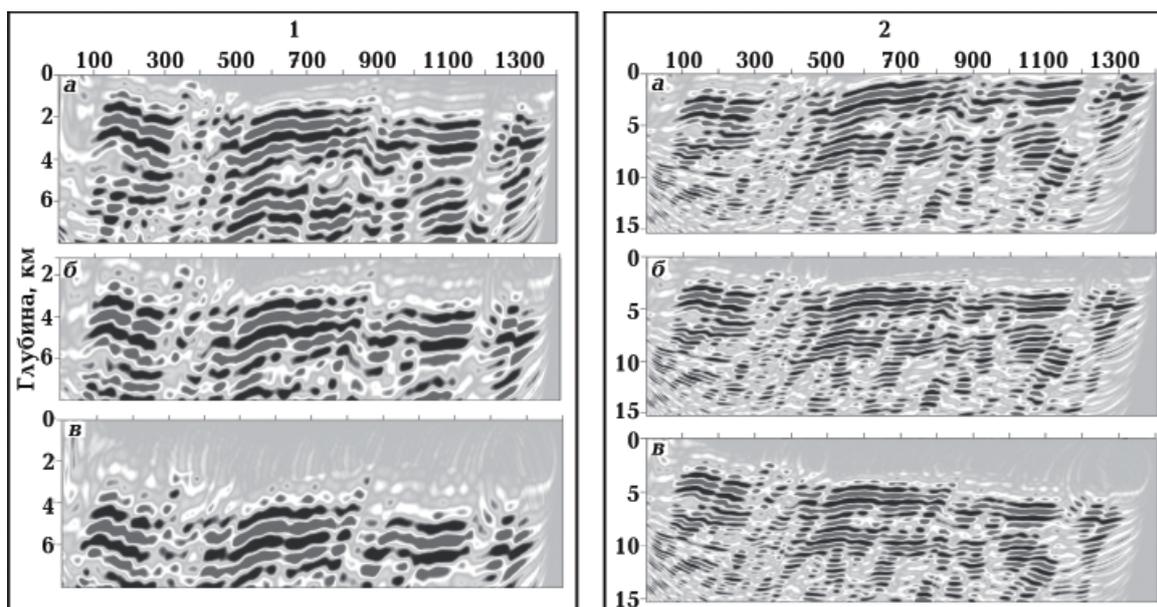


Рис. 6. Влияние изменения параметров миграции на изображение кристаллического фундамента на примере обработки одного пункта взрыва: 1 — скорости в покрывающем слое (а — 4600 м/с, б — 4900 м/с, в — 5100 м/с); 2 — скорости в преломляющем слое (а — 6000 м/с, б — 6200 м/с, в — 6400 м/с).

Fig. 6. The effect of changing migration parameters on the image of a crystalline basement by the example of processing a shot: 1 — velocities in the covering thicker (a — 4600 m/s, б — 4900 m/s, в — 5100 m/s); 2 — velocities in the refractive thicker (a — 6000 m/s, б — 6200 m/s, в — 6400 m/s).

глубинное положение границы на миграционном изображении, но и на ее наклон. На рис. 6 (2) показано влияние изменения значений скорости в преломляющей толще: 6000, 6200 и 6400 м/с. Реальное значение скорости в ней для данного профиля составляет 6200 м/с. При этом величина изменения положения точки переноса пункта взрыва на границу кристаллического фундамента соответствует величине глубинного перемещения границы преломления на картинке, но только в противоположном направлении. После проверки корректности сформированных для всех пунктов взрыва миграционных изображений необходимо их тщательно проанализировать для подтверждения отдельных деталей строения кристаллического фундамента при построении корректного суммарного его изображения вдоль профиля наблюдений.

Для корректного изображения структурных элементов строения исследуемой толщи кристаллического фундамента необходимо тщательно анализировать и срав-

нивать полученные для отдельных пунктов возбуждения результаты миграции и постепенно воспроизводить общую картину его строения вдоль профиля. При этом для формирования изображения каждой отдельной детали важно иметь ее изображение с разных сторон от интервала наблюдения, поскольку для воспроизведения ее реальной формы необходимо суммировать части изображения выбранного интервала границы именно с разных сторон. Это связано с тем, что принцип формирования изображения среды в области выхода рефрагированных волн в покрывающую толщу, который был описан, заставляет смотреть на границу под углом преломления со стороны источника. Результаты выполненных ранее исследований формирования отдельного нарушения на границе преломления в виде антиклинали [Верпаховская, 2012] позволяют сделать вывод о том, что со стороны пункта взрыва хорошо отображается поднятие, в то время как спуск нарушения наблюдается значительно хуже. Следовательно, для формирования нарушения в

виде синклинали лучше отбирать изображение для пунктов взрыва, которые размещены со стороны спуска нарушения, а для изображения антиклинали пункты взрыва должны располагаться со стороны подъема.

Формирование суммарного изображения кристаллического фундамента вдоль всего профиля. Для формирования изображения кристаллического фундамента вдоль всего профиля необходим тщательный отбор и суммирование наиболее четких изображений вдоль профиля с учетом отдельно сформированных структурных деталей, которые на ней находятся. При этом динамические характеристики зарегистрированного волнового поля остаются неизменными, что особенно важно для дальнейшего этапа интерпретации сейсмических наблюдений.

Для получения на суммарном изображении кристаллического фундамента четкого изображения правильной формы имеющих на границе нарушений необходимо иметь волновые поля от пунктов возбуждения, расположенных на разных расстояниях и с разных сторон от этих нарушений. В то же время для реальных данных ГСЗ это очень проблематичное требование, потому что, как правило, для удешевления систем наблюдений используют мало пунктов возбуждения на профилях значительной длины. К тому же, как показывает практика их обработки, а также приведенные примеры, качество зарегистрированных волновых полей не всегда позволяет использовать в обработке наблюдения в полном объеме.

Таким образом, суммарное изображение толщи кристаллического фундамента вдоль всего профиля формируется из частей отдельных миграционных изображений для выбранных пунктов взрыва, в отличие от конечно-разностной миграции поля отраженных волн, при которой в суммарном изображении участвуют миграционные изображения всех пунктов взрыва.

Модельный пример. Важным моментом при разработке любого метода является подтверждение корректности и точности как его теоретических основ, так и практического применения. Для такой проверки

метода миграции поля отраженных/рефрагированных волн может служить моделирование волнового поля [Пилипенко, Верпаховская, 2008]. Поскольку модель среды с глубинным расположением всех деталей ее строения задается, то, естественно, что в случае корректности метода сформированное изображение должно быть идентичным заданной модели.

Для примера была выбрана модель двухслойной среды с границей раздела сложного строения, которая показана на рис. 7, а. Скорость в верхнем слое равна 4,5 км/с, а скорость в нижней толще составляет 6,2 км/с.

На условном профиле общей длиной 350 км были выбраны два пункта возбуждения, расположенные на координатах 0 и 330 км. При этом приемники вдоль профиля были размещены с шагом 500 м. Смоделированные волновые поля для выбранных пунктов возбуждения с введенной редукцией 6,2 км/с показаны на рис. 7, б и 7, в. Для моделирования волнового поля была использована оригинальная программа конечно-разностного моделирования волнового поля в дальней зоне источника с использованием сетки, шаблон которой движется в направлении распространения преломленных волн. Программа разработана в Институте геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины с целью проверки корректности методов обработки волновых полей, зарегистрированных в дальней зоне источника [Пилипенко, Верпаховская, 2008].

К обоим смоделированным волновым полям была применена конечно-разностная миграция поля отраженных/рефрагированных волн, результаты которой демонстрируются на рис. 8. Поскольку граница раздела на всех изображениях находится на одинаковой глубине и полностью соответствует заданной модели, можно говорить о корректности как теоретических разработок, так и программной реализации метода конечно-разностной миграции поля отраженных/рефрагированных волн. Кроме того, на рис. 8 четко продемонстрирована необходимость вы-

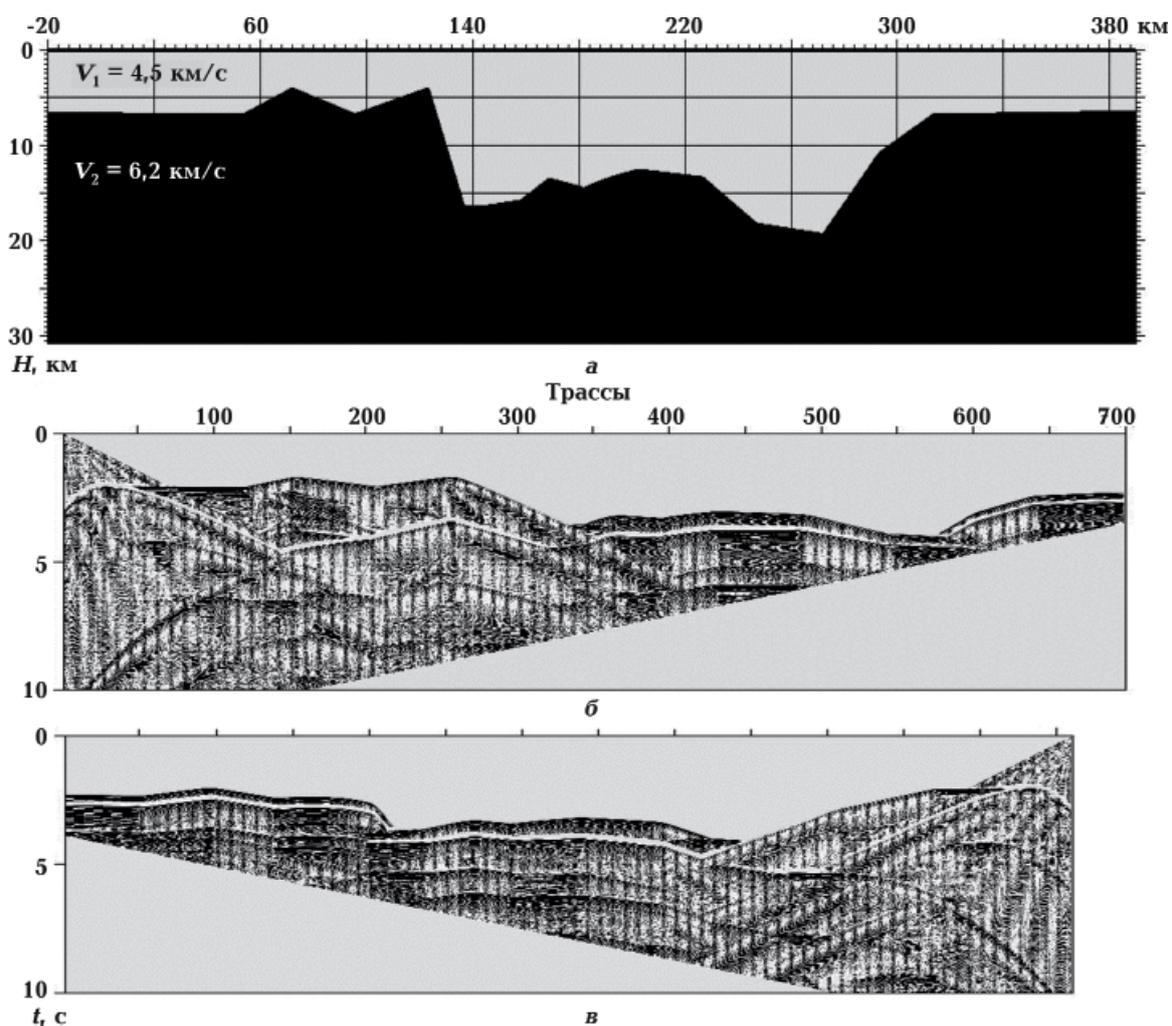


Рис. 7. Скоростная модель (а) и смоделированные волновые поля для пунктов возбуждения, расположенных на 0 км (б) и 330 км профиля (в).

Fig. 7. Velocity model (a) and simulated wave fields for shot points located at 0 km (b) and 330 km of the profile (v).

полнения миграции для встречных пунктов возбуждения в условиях строения преломляющей границы, осложненной разными нарушениями. Так, для изображения нарушения с резким спуском (выделено прямоугольником на рис. 8, а и б) миграция для пункта взрыва, который расположен со стороны спуска, дает более правильную его форму (рис. 8, а), в то время как в результате миграции для пункта взрыва, расположенного с противоположной стороны, будет иметь место сглаживание резких углов (см. рис. 8, б). Для того чтобы получить полное корректное изображение подобного нарушения на границе раздела и границы в целом, необходимо тща-

тельно проанализировать и сопоставить отдельные результаты миграции для всех пунктов взрыва и суммирование отдельных фрагментов, которые соответствуют и наиболее четко отображают все элементы исследуемой границы. На рис. 8, в показан результат суммы частей отдельных глубинных изображений по двум пунктам взрыва, приведенным на рис. 8, а, б. Можно увидеть, что суммарное миграционное изображение полностью соответствует заданной скоростной модели.

Результаты представленного модельного примера позволяют говорить о корректности разработанной методики формирования изображения кристаллического

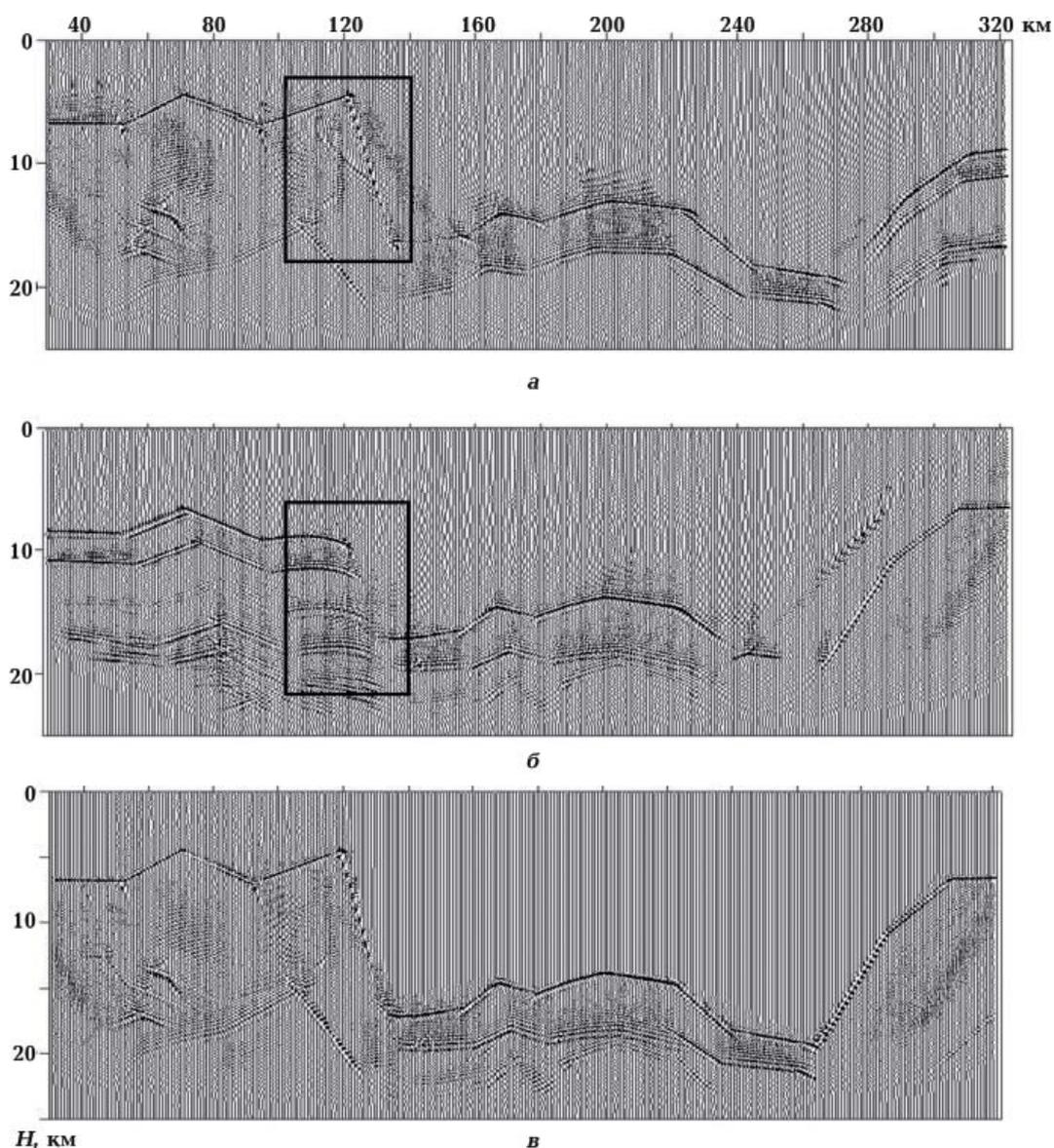


Рис. 8. Результат конечно-разностной миграции поля отраженных/рефрагированных волн по смоделированным волновым полям для пунктов возбуждения, расположенных на 0 км (а) и 330 км профиля (б), и суммарное волновое изображение кристаллического фундамента (в).

Fig. 8. The result of the finite-difference reflection/refraction migration of the simulated wave fields for shot points located at 0 km (a) and 330 km of the profile (б) and the total wave image of the crystalline basement along profile (в).

фундамента с применением конечно-разностной миграции поля отраженных/рефрагированных волн.

Кроме тестирования разработанной методики формирования изображения кристаллического фундамента на модельных примерах, она применялась при обработке реальных данных региональных сейсмических исследований ГСЗ, проведенных на территории Украины.

Практические примеры. Эффективность применения конечно-разностной миграции поля отраженных/рефрагированных волн при формировании изображения кристаллического фундамента продемонстрируем на примерах обработки данных ГСЗ, наблюдаемых на территории Украины в районах с разными структурно-тектоническими условиями глубинного строения.

На рис. 9 приведено сравнение результатов обработки регионального профиля DOBRE до глубины 15 км с применением разных методов: скоростная модель, полученная с применением лучевого моделирования, рис. 9, а [Grad et al., 2003], и изображение толщи кристаллического фундамента в динамических характеристиках наблюдаемого волнового поля, сформированное с применением конечно-разностной миграции поля отраженных/рефрагированных волн, рис. 9, б [Пилипенко и др., 2010; Pilipenko et al., 2011]. Как видно, на миграционном изображении структура кристаллического фундамента в районе южного склона Днепровско-Донецкой впадины представлена серией близвертикальных разломов, а не полого поднимается, как это показано на скоростной модели.

Приведем пример формирования изображения кристаллического фундамента на основе конечно-разностной миграции поля отраженных/рефрагированных волн по данным морской сейсмозазведки, полученным в районе Азовского моря. Это часть профиля DOBRE-2, который выпол-

нен в рамках Международного проекта и проходит через Азовское море, Крымский полуостров и Черное море [Starostenko et al., 2012]. Вдоль части профиля, которая относится к району Азовского моря, общей протяженностью около 176 км, были размещены шесть OBS (донных сейсмических станций) с нерегулярным шагом от 17 до 40 км и выполнено 1084 возбуждений колебаний. На рис. 10, а приведены сейсмограммы для OBS27, размещенного на 148 км профиля, и OBS24, который расположен на 89 км профиля. Видна разница в качестве зарегистрированных волновых полей. Волновое поле, зарегистрированное OBS27, не содержит никакой полезной информации, в то время как волновое поле OBS24 содержит информацию о строении границы фундамента почти вдоль всего профиля. Для участка, который находится возле источника возбуждения, можно получить миграционные изображения при обработке соседнего OBS22, расположенного на 129 км профиля и также имеющего достаточно качественное волновое поле. Следовательно, в данном случае сформировать изображение кристаллическо-

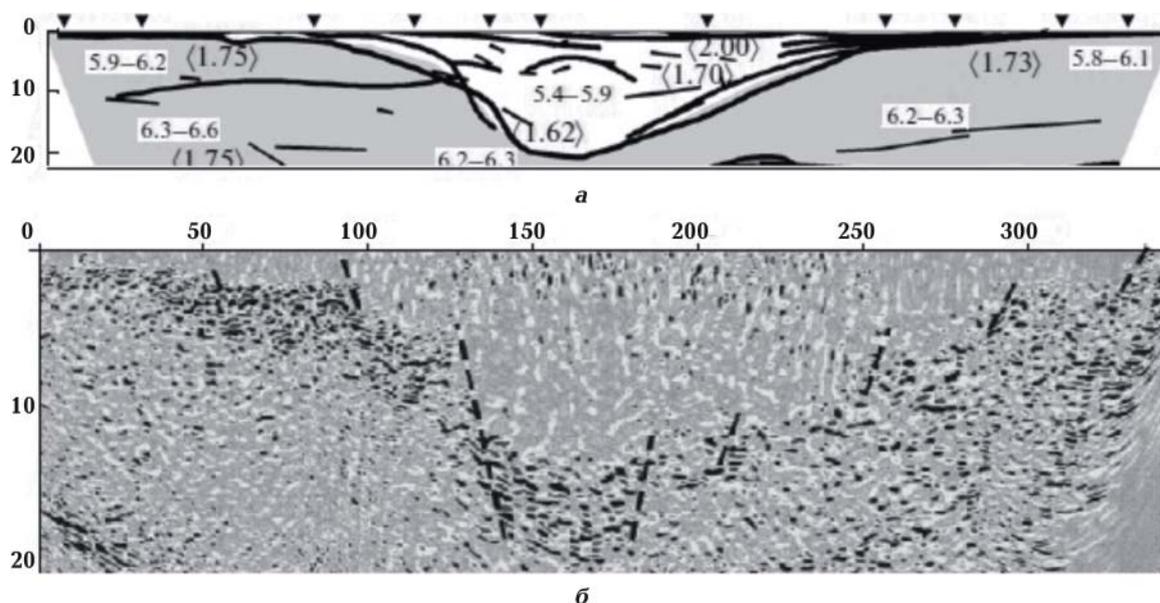


Рис. 9. Сопоставление результатов обработки данных, наблюдаемых вдоль профиля ГСЗ, пересекающего Днепровско-Донецкую впадину, полученных с применением лучевого трассирования (а) и конечно-разностной миграции поля отраженных/рефрагированных волн (б).

Fig. 9. Comparison of the results of processing the data observed along the DSS profile crossing the Dnieper-Donetsk depression, obtained using ray tracing (a) and finite-difference reflected/refracted migration (b).

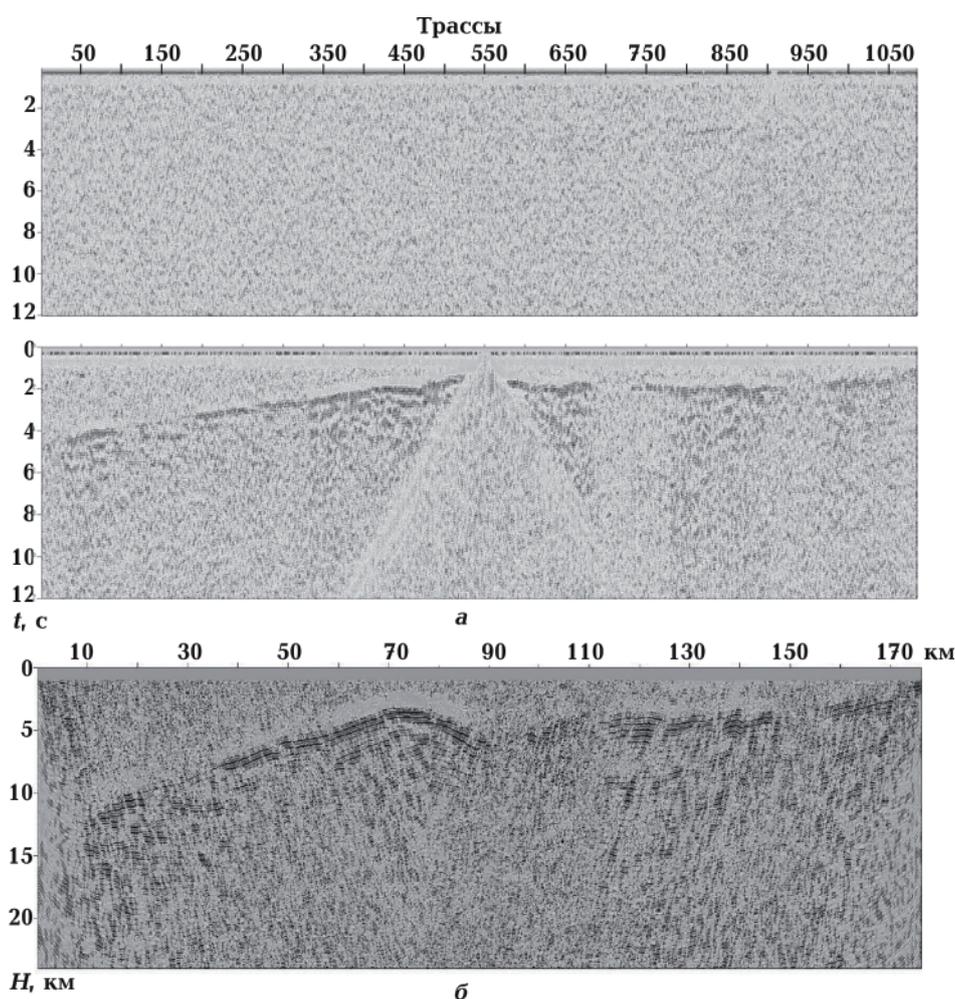


Рис. 10. Профиль ГСЗ, наблюдаемый в районе Азовского моря: волновые поля двух OBS (а) и результат формирования изображения кристаллического фундамента с применением конечно-разностной миграции поля отраженных/рефрагированных волн (б).

Fig. 10. DSS profile observed in the Azov Sea region: wave fields of two OBS (a) and the result of forming an image of the crystalline basement using finite-difference reflection/refraction migration (b).

го фундамента с применением конечно-разностной миграции поля отраженных/рефрагированных волн для всего профиля возможно по волновому полю всего двух OBS. Полученное изображение кристаллического фундамента, сформированное для района Азовского моря, показано на рис. 10, б.

Эффективность применения миграции поля отраженных/рефрагированных волн в случае формирования изображения сложного строения кристаллического фундамента показана на рис. 11. Полученное изображение позволило получить дополнительную информацию о геологическом строении района исследований и

дало возможность лучше понять сценарий эволюции Украинских Карпат. Геологическая интерпретация показана на рисунке линиями. [Verpakhovska et al., 2018]. Как следует из рисунка, миграция дает возможность получить не только форму границы кристаллического фундамента, но и отобразить строение всей толщи фундамента.

Таким образом, изображения кристаллического фундамента, сформированные по смоделированным волновым полям и реальным сейсмическим наблюдениям, позволили подтвердить корректность теоретических основ и алгоритмических разработок, а также предложенных методических подходов и эффективность при-

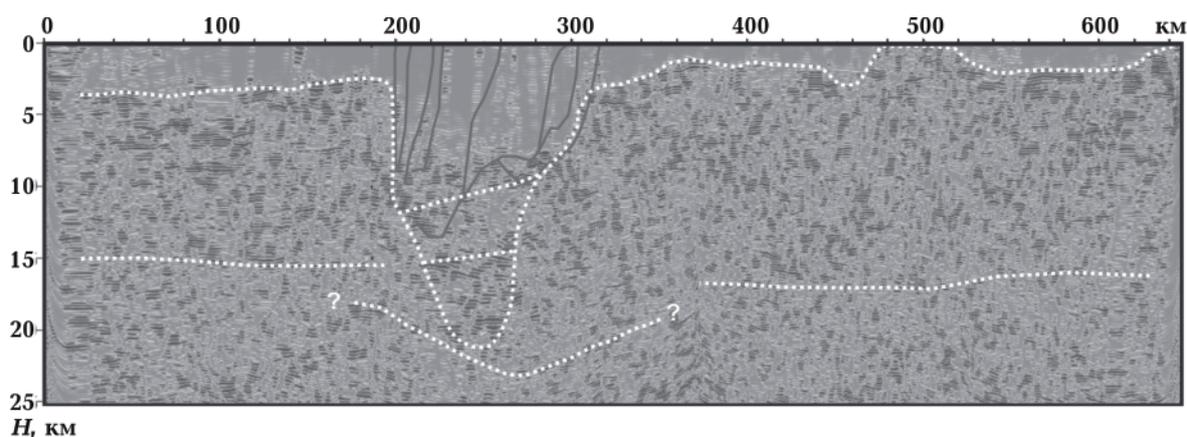


Рис. 11. Сформированное изображение сложного строения кристаллического фундамента по данным профиля ГСЗ, наблюдаемого в районе Карпат с интерпретацией.

Fig. 11. The formed image of the complex structure of the crystalline basement from the data of the DSS profile observed in the Carpathian region with interpretation.

менения конечно-разностной миграции поля отраженных/рефрагированных волн. Полученные в результате миграционные изображения дают важную дополнительную информацию о глубинном строении кристаллического фундамента в районе исследований для улучшения качества интерпретации данных сейсморазведки.

Выводы. В отличие от скоростной модели среды, полученной в результате применения лучевого моделирования, динамическая миграция позволяет изобразить не только форму границ раздела, но и особенности строения толщ между ними, что служит важной дополнительной информацией о геологическом строении исследуемого региона. Для формирования изображения кристаллического фундамента в динамических характеристиках наблюдаемого волнового поля по данным ГСЗ разработана методика на основе применения конечно-разностной миграции поля отраженных/рефрагированных волн, которая предусматривает обработку волнового поля, наблюдаемого в дальней зоне источника системой наблюдения, при которой шаг между приемниками нерегулярный и достигает 2—3 км, а интервал между пунктами взрыва в среднем составляет 50—100 км и с учетом присутствия в скоростной модели среды границы раздела, на которой резко изменяется скорость. Таким образом, разработанный

алгоритм методики формирования изображения кристаллического фундамента по данным ГСЗ состоит из следующих основных шагов: оценка качества и подготовка волновых полей каждого пункта взрыва, подготовка параметров миграции, подготовка двух скоростных моделей (одна для покрывающей толщи, а вторая для толщи кристаллического фундамента), формирование изображения кристаллического фундамента для каждого пункта взрыва с применением конечно-разностной миграции поля отраженных/рефрагированных волн и формирование суммарного изображения кристаллического фундамента вдоль всего профиля. В вычислительном процессе самой миграции используется комбинирование продолжений волнового и временного полей с применением специального вида разностных сеток, что гарантирует максимальное соответствие расчетов реальному распространению сейсмических волн в среде. При этом привлечение продолжения временного поля является главным отличием метода конечно-разностной миграции поля как отраженных, так и отраженных/рефрагированных волн, разработанного в Институте геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины от всех существующих методов миграции.

Необходимым этапом при формировании суммарного изображения кристалли-

ческого фундамента для передачи реальной формы нарушений является сопоставление миграционных изображений этих нарушений, полученных для пунктов взрыва, которые расположены не только с разных сторон от них, но и на разных расстояниях, что продемонстрировано на модельном примере.

Как показано на модельных и реальных примерах, разработанная методика с при-

менением конечно-разностной миграции поля отраженных/рефрагированных волн дает возможность сформировать изображение кристаллического фундамента со всеми деталями его строения, что, в свою очередь, позволяет получить дополнительную информацию о глубинном строении района исследований и улучшить результат дальнейшей интерпретации сейсмических данных.

Список литературы

- Алексеев А. С., Гельчинский Б. Я. О лучевом методе вычислений полей волн в случае неоднородных сред с криволинейными границами раздела. В сб.: Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Ленинград: Изд-во ЛГУ, 1959. Т. 3. С. 11—37.
- Верпаховская А. О. Кинематическая миграция поля преломленных волн при формировании изображения среды по данным ГСЗ. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 6. С. 153—164. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i6.2014.111054>.
- Верпаховская А. О. Формирование изображения сложных структурных деталей строения преломляющей границы. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 5. С. 150—160. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i5.2012.116671>.
- Верпаховская А. О., Пилипенко В. Н., Будкевич В. Б. 3D конечно-разностная миграция поля преломленных волн. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 3. С. 50—65. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i3.2015.111102>.
- Верпаховская А. О., Пилипенко В. Н., Пилипенко Е. В. Формирование изображения глубинного геологического строения по данным сейсморазведки МОВ и МПВ. *Геофиз. журн.* 2017. Т. 39. № 6. С. 106—121. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i6.2017.116375>.
- Годунов С. К., Рябенский В. С. Разностные схемы. Москва: Наука, 1977. 440 с.
- Кашубин С. Н., Петров О. В., Артемьева И. М., Морозов А. Ф., Вяткина Д. В., Гольшева Ю. С., Кашубина Т. В., Мильштейн Е. Д., Рыбалка А. В., Эринчек Ю. М., Саккулина Т. С., Крупнова Н. А. Глубинное строение земной коры и верхней мантии поднятия Менделеева по профилю ГСЗ Арктика-2012. *Региональная геология и металлогения.* 2016. № 65. С. 16—35.
- Павленкова Н. И. Метод глубинного сейсмического зондирования, основные этапы развития, достижения и проблемы. *Физика Земли.* 1999. № 7-8. С. 3—29.
- Павленкова Н. И., Пилипенко В. Н., Островский А. А. Особенности сейсмических изображений структуры земной коры по данным ОГТ и ГСЗ (на примере района Балтийского моря). *Физика Земли.* 2003. № 6. С. 102—112.
- Павленкова Н. И., Пилипенко В. Н., Роман В. А. Методика составления скоростных разрезов земной коры. Киев: Наук. думка, 1972. 214 с.
- Пилипенко В. Н., Верпаховская А. О. Исследование особенностей миграционных преобразований поля преломленных волн с использованием 2D и 3D конечно-разностного моделирования сейсмограмм. *Геофиз. журн.* 2008. Т. 30. № 1. С. 84—96.
- Пилипенко В. Н., Верпаховская А. О. Особенности миграционного преобразования поля рефрагированных волн. *Геофиз. журн.* 2003. Т. 25. № 1. С. 42—55.
- Пилипенко В. Н., Верпаховская А. О., Будкевич В. Б. Трехмерная временная миграция по сейсмограммам пункта взрыва. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 1. С. 43—56. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i1.2016.107721>.

- Пилипенко В. Н., Верпаховская А. О., Гизе П., Павленкова Н. И. Формирование изображения среды по волновым полям ГСЗ по профилю CINCA-95 (Чили). *Геофизика*. 2006. № 6. С. 16—20.
- 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.
- Пилипенко В. Н., Макрис Я., Тибо Х., Верпаховская А. О. Возможности применения миграции рефрагированных волн. *Физика Земли*. 2003. № 6. С. 94—101.
- Пилипенко В. Н., Павленкова Н. И., Луосто У., Верпаховская А. Формирование изображения среды по сейсмограммам глубинного сейсмического зондирования. *Физика Земли*. 1999. № 7-8. С. 164—176.
- Пилипенко В. Н., Соколовская Т. П. Формирование изображений преломляющих границ конечно — разностным методом. *Геофиз. журн.* 1990. Т. 12. № 5. С. 48—54.
- Сакулина Т. С., Кашубин С. Н., Павленкова Г. А. Глубинные сейсмические зондирования по профилю 1-АР в Баренцевом море: методика и результаты. *Физика Земли*. 2016. № 4. С. 107—124. <https://doi.org/10.7868/S0002333716040086>.
- Самарский А. А., Гулин А. В. Устойчивость разностных схем. Москва: Наука, 1973, 416 с.
- Соллогуб В. Б., Чекунов А. В., Павленкова Н. И. Еволюція земної кори України і суміжних регіонів за даними сейсмічних досліджень. *Вісник АН УРСР*. 1969. № 4.
- Старостенко В. И., Стифенсон Р. А. Проект GEORIFT: Глубинное строение и эволюция Днепровско-Донецкой впадины и вала Карпинского. В кн.: Строение и динамика литосферы Восточной Европы. Под ред. А. Ф. Морозова, Н. Ф. Межеловского, Н. И. Павленковой Москва: Геокарт, Геос, 2006. С. 291—342.
- Телегин А. Н., Тихонова И. М., Саккулина Т. С. Обработка сейсмических записей преломленных волн на основе миграции. *Докл. РАН*. 2003. Т. 390. № 1. С. 106—108.
- Bery, A. (2013). High Resolution in Seismic Refraction Tomography for Environmental Study. *International Journal of Geosciences*, 4(4), 792—796.
- Claerbout, J. F. (1985). *Imaging the Earth's interior*. Oxford: Blackwell, 398 p.
- Červený, V., Molotkov, I. A., & Pšenčík, I. (1977). *Ray method in seismology*. Univerzita Karlova, Praha. 214 p.
- De Franco, R. D. (2005). Multi-refractor imaging with stacked refraction convolution section. *Geophysical Prospecting*, 53, 335—348. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2005.00478.x>.
- Grad, M., Gryn, D., Guterch, A., Janik, T., Keller, R., Lang, R., Lyngsie, S. B., Omelchenko, V., Starostenko, V. I., Stephenson, R. A., Stovba, S. M., Thybo, H., Tolkunov, A. DOBREFraction'99 Working Group. (2003). «DOBREFraction'99» — velocity model of the crust and upper mantle beneath the Donbas Foldbelt (East Ukraine). *Tectonophysics*, 371, 81—110. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00211-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00211-7).
- Hu, Z., Guan, L., Gu, L., Wang, L., Wu, D., Dong, Y., & Zhao, Q. (2004). The wide angle seismic wave field analysis and imaging method below the high velocity shield layers. *Chinese Journal of Geophysics*, 47(1), 102—109. <https://doi.org/10.1002/cjg2.459>.
- Jones, I. F. (2014). Tutorial: migration imaging conditions. *First break*, 32(12), 45—55. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2014017>.
- McMechan, G. A., & Fuis, G. S. (1987). Ray equation migration of the wide-angle reflections from South Alaska. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(1), 407—420. <https://doi.org/10.1029/JB092iB01p00407>.
- Pavlenkova, N. I., Pilipenko, V. N., Verpakhovskaja, A. O., Pavlenkova, G. A., & Filonenko, V. P. (2009). Crustal structure in Chile and Okhotsk Sea regions. *Tectonophysics*, 472(1-4), 28—38. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.08.018>.
- Pilipenko, V. N., Verpakhovskaja, A. O., Giese, P., & Pavlenkova, N. I. (2004). Migration of wide angle reflections and refractions. *Proceeding of ESC XXIX General Assambly, Potsdam, Germany, Sep. 12-17, 2004* (P. 127).
- Pilipenko, V. M., Verpakhovska, O. O., Starostenko, V. I., & Pavlenkova, N. I. (2011). Wave

- images of the crustal structure from refractions and wide-angle reflections migration along the DOBRE profile (Dnieper-Donets paleorift). *Tectonophysics*, 508, 96—105. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.11.009>.
- Starostenko, V., Janik, T., Stephenson, R., Gryn, D., Tolkunov, A., Czuba, W., Sroda, P., Lysynchuk, D., Omelchenko, V., Grad, M., Kolomiyets, K., Thybo, H., & Legostaeva, O. (2012). Integrated seismic studies of the crust and upper mantle at the southern margin of the East European Craton (Azov Sea-Crimea-Black Sea area), DOBRE-2 & DOBRE'99 transect. *The 15th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and their margins, Seismix 2012, Programme and Abstracts: Beijing (China) September 16-20, 2012* (P. 85).
- Verpakhovska, A., Pylypenko, V., Yegorova, T., & Murovskaya, A. (2018). Seismic image of the crust on the PANCAKE profile across the Ukrainian Carpathians from the migration method. *Journal of Geodynamics*, 121, 76—87. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.07.006>.
- Zelt, C. A., Sain, K., Naumenko, J. V., & Sawyer, D. S. (2003). Assessment of crustal velocity models using seismic refraction and reflection tomography. *Geophysical Journal International*, 153, 609—626. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01919.x>.
- Zhou, H., Li, L., Bjorklund, T., & Thornton, M. (2010). A comparative analysis of deformable layer tomography and cell tomography along the LARSE lines in southern California. *Geophysical Journal International*, 180, 1200—1222. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04472.x>.

Technique for the imaging crystalline basement according to the DSS data

O. O. Verpakhovska, 2021

S. I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

The method of deep seismic sounding (DSS), the observation systems in which are characterized by an irregular arrangement of both sources and receivers along the profile, a significant step between receivers, as well as maximum source-receiver distances exceeding several hundred kilometers, makes it possible to obtain an image of the crystalline basement using seismic migration fields of reflected/refracted waves. The main part of the existing migration methods, the use of which makes it possible to form an image of the deep structure of the study area in the dynamic characteristics of the recorded wave field, is focused on processing seismic data obtained by the method of reflected waves with multiple overlap observation systems (MOV—CDP). And, as a rule, these migration methods are designed for a smooth change in speed with depth. At the same time, at the boundary of the crystalline basement, the speed changes very sharply, which must be taken into account when processing data using migration.

The proposed method for constructing an image of the crystalline basement is based on the use of finite-difference migration of the field of reflected/refracted waves, which was developed at the Institute of Geophysics named after S. I. Subbotin National Academy of Sciences of Ukraine. This migration method is designed to isolate supercritically reflected and refracted waves recorded from the basement in the far zone of the source and takes into account the full trajectory of waves passing through a two-layer medium, at the boundary of which there is a significant jump in velocity. Thus, the migration of the field of reflected/refracted waves makes it possible to obtain a correct image of the structure of the refractive layer of the crystalline basement.

The article describes in detail the algorithm of the technique for constructing an image of the crystalline basement using finite-difference migration of the field of reflected/refracted waves and its difference from similar methods of migration. The advantages

and disadvantages of the proposed method are shown when solving problems of regional seismic research. Explained and illustrated the features of constructing the image of violations on the border of the foundation. The effectiveness of the technique is demonstrated on a model example and real seismic data observed by the DSS method on the territory of Ukraine.

Key words: regional seismic exploration, DSS, finite-difference migration, continuation of the time field, continuation of the wave field, refracted waves, crystalline basement.

References

- Alekseev, A. S., & Gelchinskiy, B. Ya. (1959.) On the ray method for calculating wave fields in the case of inhomogeneous media with curvilinear interfaces. In Problems of the dynamic theory of seismic wave propagation (Vol. 3, pp. 11—37). Leningrad: Leningrad State University Publishing House (in Russian).
- Verpakhovskaya, A. O. (2014). Kinematic migration of the field of refracted waves while the image of environment is being formed according to DSS data. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 36(6), 153—164. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i6.2014.111054> (in Russian).
- Verpakhovskaya, A. O. (2012). Formation an image of complex parts of the structure of the refractive boundary. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 34(5), 150—160. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i5.2012.116671> (in Russian).
- Verpakhovskaya, A. O., Pilipenko, V. N., & Budkevich, V. B. (2015). 3D finite-difference migration of the field of refracted waves. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 37(3), 50—65. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i3.2015.111102> (in Russian).
- Verpakhovskaya, A. O., Pilipenko, V. N., & Pilipenko, E. V. (2017). Formation geological depth image according to refraction and reflection marine seismic data. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 39(6), 106—121. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i6.2017.116375> (in Russian).
- Godunov, S. K., & Ryabenkiy, V. S. (1977). *Difference schemes*. Moscow: Nauka, 440 p. (in Russian).
- Kashubin, S. N., Petrov, O. V., Artemyeva, I. M., Morozov, A. F., Vyatkina, D. V., Golyshcheva, Yu. S., Kashubina, T. V., Milshtein, E. D., Rybalka, A. V., Erinchek, Yu. M., Sakulina, T. S., Krupnova, N. A. (2016). Deep structure of the Earth's crust and upper mantle of the Mendeleev Rise along the DSS Arctic-2012 profile. *Regional'naya geologiya i metallogeniya*, (65), 16—35 (in Russian).
- Pavlenkova, N. I. (1999). Deep seismic sounding method, main stages of development, achievements and problems. *Fizika Zemli*, (7-8), 3—29 (in Russian).
- Pavlenkova, N. I., Pilipenko, V. N., & Ostrovsky, A. A. (2003). Seismic images of the crustal structure from common depth point and deep seismic sounding data with an example of the Baltic Sea region. *Fizika Zemli*, (6), 102—112 (in Russian).
- Pavlenkova, N. I., Pilipenko, V. N., & Ostrovskiy, A. A. (2003). Features of seismic images of the structure of the earth's crust according to CDP and DSS data (on the example of the Baltic Sea region). *Fizika Zemli*, (6), 102—112 (in Russian).
- Pavlenkova, N. I. Pilipenko, V. N., & Roman, V. A. (1972). *Methodology for compiling high-speed sections of the earth's crust*. Kiev: Naukova Dumka, 214 p. (in Russian).
- Pilipenko, V. N., & Verpakhovskaya, A. O. (2003). Features of the migration transformation of the field of refracted waves. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 25(1), 42—55 (in Russian).
- Pilipenko, V. N., Verpakhovskaya, A. O., & Budkevich, V. B. (2016). Three-dimensional temporal migration according to initial data of areal seismic exploration. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 38(1), 43—56. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i1.2016.107721> (in Russian).
- Pilipenko, V. N., Verpakhovskaya, A. O., Gize, P., & Pavlenkova, N. I. (2006). Formation of the image of the medium by the wave fields of the DSS along the CINCA-95 profile (Chile). *Geofizika*, (6), 16—20 (in Russian).
- Pilipenko, V. N., Verpakhovskaya, A. O., Kekukh, D. A., & Pilipenko, E. V. (2011). Continuation of the time field in a three-dimensional inhomogeneous medium in the procedures of processing and interpreting of seismic data. *Geoinformatika*, (4), 32—43 (in Russian).

- Pilipenko, V. N., Makris, J., Thibault, H., & Verpakhovskaya, A. O. (2003). Possible applications of the refraction migration in studies of the crustal structure. *Fizika Zemli*, (6), 94—101 (in Russian).
- Pilipenko, V. N., Pavlenkova, N. I., Luosto, U., & Verpakhovskaya, A. (1999). Formation of the image of the environment from the seismograms of deep seismic sounding. *Fizika Zemli*, (7-8), 164—176 (in Russian).
- Pilipenko, V. N., & Sokolovskaya, T. P. (1990). Formation of images of refractive boundaries by the finite-difference method. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 12(5), 48—54 (in Russian).
- Sakulina, T. S., Kashubin, S. N., & Pavlenkova, G. A. (2016). Deep seismic sounding on the 1-AP profile in the Barents Sea: methods and results. *Fizika Zemli*, (4), 107—124. <https://doi.org/10.7868/S0002333716040086> (in Russian).
- Samarskiy, A. A., Gulin, A. V. (1973). *Stability of difference schemes*. Moscow: Nauka, 416 p. (in Russian).
- Sollogub, V. B., Chekunov, A. V., & Pavlenkova, N. I. (1969). Evolution of the earth's crust of Ukraine and adjacent regions according to seismic surveys. *Visnyk AN USSR*, (4) (in Ukrainian).
- Starostenko, V. I., & Stephenson, R.A. (2006). GEORIFT project: Deep structure and evolution of the Dnieper-Donetsk depression and the Karpinsky shaft. In A. F. Morozova, N. F. Mezhelovsky, N. I. Pavlenkova (Eds.), *The structure and dynamics of the lithosphere of Eastern Europe* (pp. 291—342). Moscow: Geokart, Geos (in Russian).
- Telegin, A. N., Tikhonova, I. M., & Sakulina, T. S. (2003). Processing of seismic records of refracted waves based on migration. *Doklady RAN*, 390(1), 106—108 (in Russian).
- Bery, A. (2013). High Resolution in Seismic Refraction Tomography for Environmental Study. *International Journal of Geosciences*, 4(4), 792—796.
- Claerbout, J. F. (1985). *Imaging the Earth's interior*. Oxford: Blackwell, 398 p.
- Červený, V., Molotkov, I. A., & Pšenčík, I. (1977). *Ray method in seismology*. Univerzita Karlova, Praha. 214 p.
- De Franco, R. D. (2005). Multi-refractor imaging with stacked refraction convolution section. *Geophysical Prospecting*, 53, 335—348. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2005.00478.x>.
- Grad, M., Gryn, D., Guterch, A., Janik, T., Keller, R., Lang, R., Lyngsie, S. B., Omelchenko, V., Starostenko, V. I., Stephenson, R. A., Stovba, S. M., Thybo, H., Tolkunov, A. DOBREFraction'99 Working Group. (2003). «DOBREFraction'99» — velocity model of the crust and upper mantle beneath the Donbas Foldbelt (East Ukraine). *Tectonophysics*, 371, 81—110. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00211-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00211-7).
- Hu, Z., Guan, L., Gu, L., Wang, L., Wu, D., Dong, Y., & Zhao, Q. (2004). The wide angle seismic wave field analysis and imaging method below the high velocity shield layers. *Chinese Journal of Geophysics*, 47(1), 102—109. <https://doi.org/10.1002/cjg2.459>.
- Jones, I. F. (2014). Tutorial: migration imaging conditions. *First break*, 32(12), 45—55. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2014017>.
- McMechan, G. A., & Fuis, G. S. (1987). Ray equation migration of the wide-angle reflections from South Alaska. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(1), 407—420. <https://doi.org/10.1029/JB092iB01p00407>.
- Pavlenkova, N. I., Pilipenko, V. N., Verpakhovskaya, A. O., Pavlenkova, G. A., & Filonenko, V. P. (2009). Crustal structure in Chile and Okhotsk Sea regions. *Tectonophysics*, 472(1-4), 28—38. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.08.018>.
- Pilipenko, V. N., Verpakhovskaya, A. O., Giese, P., & Pavlenkova, N. I. (2004). Migration of wide angle reflections and refractions. *Proceeding of ESC XXIX General Assambly, Potsdam, Germany, Sep. 12—17, 2004* (P. 127).
- Pilipenko, V. M., Verpakhovskaya, O. O., Starostenko, V. I., & Pavlenkova, N. I. (2011). Wave images of the crustal structure from refractions and wide-angle reflections migration along the DOBRE profile (Dnieper-Donets paleorift). *Tectonophysics*, 508, 96—105. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.11.009>.
- Starostenko, V., Janik, T., Stephenson, R., Gryn, D., Tolkunov, A., Czuba, W., Sroda, P., Lysynchuk, D., Omelchenko, V., Grad, M., Kolomiyets, K., Thybo, H., & Legostaeva, O. (2012). Integrated seismic studies of the crust

- and upper mantle at the southern margin of the East European Craton (Azov Sea-Crimea-Black Sea area), DOBRE-2 & DOBRE'99 transect. *The 15th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and their margins, Seismix 2012, Programme and Abstracts: Beijing (China) September 16-20, 2012* (P. 85).
- Verpakhovska, A., Pylypenko, V., Yegorova, T., & Murovskaya, A. (2018). Seismic image of the crust on the PANCAKE profile across the Ukrainian Carpathians from the migration method. *Journal of Geodynamics*, 121, 76—87. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.07.006>.
- Zelt, C. A., Sain, K., Naumenko, J. V., & Sawyer, D. S. (2003). Assessment of crustal velocity models using seismic refraction and reflection tomography. *Geophysical Journal International*, 153, 609—626. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01919.x>.
- Zhou, H., Li, L., Bjorklund, T., & Thornton, M. (2010). A comparative analysis of deformable layer tomography and cell tomography along the LARSE lines in southern California. *Geophysical Journal International*, 180, 1200—1222. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04472.x>.

Методика зображення кристалічного фундаменту за даними ГСЗ

О. О. Верпахівська, 2021

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Метод глибинного сейсмічного зондування (ГСЗ) має системи спостережень з нерегулярним розташуванням уздовж профілю як джерел сейсмічних коливань, так і їх приймачів, значним кроком між приймачами, а також максимальними відстанями джерело—приймач, що перевищують кілька сотень кілометрів. За даними ГСЗ отримують зображення кристалічного фундаменту із застосуванням сейсмічної динамічної міграції поля відбитих/рефрагованих хвиль. Основна частина існуючих методів міграції, використання яких дає змогу сформуванню зображення глибинної будови району досліджень в динамічних характеристиках зареєстрованого хвильового поля, орієнтована на обробку сейсмічних даних, отриманих методом відбитих хвиль із системами спостережень багаторазовими перекриттями (МОВ—ОГТ). Як правило, ці методи міграції розраховані на плавну зміну швидкості з глибиною. Водночас на межі кристалічного фундаменту швидкість змінюється дуже різко, що необхідно враховувати при обробці даних із застосуванням міграції.

Запропонована методика побудови зображення кристалічного фундаменту заснована на застосуванні скінченно-різницевої міграції поля відбитих/рефрагованих хвиль, яка розроблена в Інституті геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України. Цей метод динамічної міграції розрахований на виділення закритичних відбитих і рефрагованих хвиль, зареєстрованих від товщі фундаменту в дальній зоні джерела, і враховує повну траєкторію проходження хвилями двошарового середовища, на межі якого відбувається значний стрибок швидкості. Таким чином, міграція поля відбитих/рефрагованих хвиль дає змогу отримати коректне зображення будови заломної товщі кристалічного фундаменту.

У статті детально описано алгоритм методики побудови зображення кристалічного фундаменту із застосуванням скінченно-різницевої міграції поля відбитих/рефрагованих хвиль та його відмінність від подібних методів міграції. Показано переваги та недоліки запропонованої методики при вирішенні завдань регіональних сейсмічних досліджень. Пояснено і проілюстровано особливості побудови зображення порушень на межі фундаменту. Ефективність методики демонструється на модельному прикладі і реальних сейсмічних даних, спостережених методом ГСЗ на території України.

Ключові слова: регіональна сейсморозвідка, ДСЗ, скінченно-різницева міграція, продовження часового поля, продовження хвильового поля, рефраговані хвилі, кристалічний фундамент.