

ТЕХНОЛОГИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ. III. ПОСТРОЕНИЕ ГЛУБИННО–СКОРОСТНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Е.В. Рабинович

д-р техн. наук, профессор, e-mail: rabinovich@corp.nstu.ru

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация. В целях построения сейсмических изображений высокого разрешения и точности предлагается оригинальная технология сейсмической локации. Излагается третья часть технологии. Описан новый подход к построению сейсмических изображений, использующий устойчивые и однозначные решения нескольких прямых кинематических задач сейсморазведки вместо решения одной обратной задачи. Он основан на локации источника сейсмического импульса отражения, которую осуществляет сейсмическая цифровая антенная решётка, использующая алгоритм локации со сверхразрешением и виртуальную сетку локации. Точность построения отражающих границ определяется заданными параметрами используемых алгоритмов селекции и локации, а также узлов сетки локации. Технология сейсмической локации обладает рядом теоретических и практических преимуществ по сравнению с известными технологиями построения сейсмических изображений.

Ключевые слова: некорректность, неоднозначность, неустойчивость решений обратной задачи сейсморазведки, согласованная локация, глубинно-скоростная модель.

Введение

В основе современных технологий построения сейсмических изображений лежат решения прямой и, в первую очередь, обратной кинематических задач сейсморазведки. Эти решения реализуются в рамках геометрической сейсмологии продольных отражённых волн, которая использует кинематические параметры временных полей сейсмических волн (форма лучей и изохрон отражения) для оценки геометрических и скоростных параметров этой среды. Такой подход представляет собой предельный случай, когда в волновом уравнении длина волны стремится к нулю, что схематизирует процесс распространения волны, выделяя движение энергии сейсмического импульса (СИ) как целого [1].

Прямая задача (ПЗ) заключается в нахождении времён прихода волн на сейсмоприёмники, если заданы глубинно-скоростная модель среды, вид траектории распространения фронта волны, положение приёмников и источника, известен момент возбуждения сейсмических колебаний. В большинстве случаев решение ПЗ сводится к явному решению системы уравнений параметрической оптимизации.

Решения ПЗ однозначны и, в рамках допустимых погрешностей, устойчивы.

Обратная задача (ОЗ) заключается в нахождении геометрических параметров границ глубинных слоев, если заданы вид траекторий распространения, скорость и времена прихода волн на сейсмоприёмники.

Решение ОЗ возможно лишь в рамках априорных предположений относительно строения и свойств исследуемой среды.

Современные способы решения ОЗ используют слоистую модель среды.

Решить ОЗ – означает так подобрать модель среды и оценки её параметров, чтобы результат решения ПЗ совпадал с полученными временами прихода импульсов отражения от границ глубинных слоёв среды. В действительности исходные времена прихода СИ известны не точно, а с погрешностью. Поэтому в качестве критерия для решения ОЗ используется не наилучшее, а приемлемое по точности совпадение с наблюдаемыми временами [2].

В ОЗ, в отличие от ПЗ, нарушено хотя бы одно из условий корректности решения: условия существования, единственности и устойчивости решения. Поэтому даже приближенное решение ОЗ возможно лишь в рамках априорных предположений относительно строения и свойств исследуемой среды.

Известно множество алгоритмов приближенного решения ОЗ. Однако опыт их применения показывает, что при одних и тех же наблюдениях результаты решения могут заметно отличаться друг от друга, что является следствием отсутствия единственности и/или структурной неустойчивости решения ОЗ [3].

При работах по широко распространённому в настоящее время методу сейсморазведки – методу общей срединной точки (ОСТ) – для каждой ОСТ после спрямления годографов и выравнивания временных сдвигов сейсмотрассы суммируются и нормируются, образуя одну сейсмотрассу ОСТ. Такой способ получения сейсмотрасс ОСТ имеет явный недостаток, сопровождающий любое осреднение временных рядов – подавление высоких частот спектра сейсмотрасс, что снижает разрешающую способность метода. Для исправления ситуации увеличивают кратность суммирования – количество (от десятков до нескольких сотен) повторных наблюдений в каждой ОСТ. Что существенно увеличивает стоимость полевых сейсморазведочных работ.

Результаты интерпретации представляются в виде временного разреза ОСТ – набора сейсмограмм ОСТ профиля.

Для горизонтально-слоистой модели среды временной разрез ОСТ соответствует реальному глубинному разрезу. Однако уже при одной наклонной границе для получения правильного изображения отражающих границ временной разрез ОСТ подвергается дополнительной обработке – миграции.

Миграция полей сейсмических волн заключается в продолжении волнового поля, полученного на поверхности наблюдения, в направлении, обратном распространению волн.

Современные исследования глубинного строения среды используют разнообразные сложные вычислительные процедуры сейсмической миграции, которые выполняются во временной или глубинной области. Но все они базируются, в основном, на простейшей горизонтально-слоистой модели среды и осреднённых параметрах её характеристик.

В более сложных ситуациях результаты построения мигрированной глубинно-скоростной модели среды базируются на субъективных предположениях.

Наличие предполагаемых параметров модели влечёт обычную проблему некорректности решения. В результате выполнение миграционных процедур сопряжено с неоднозначностью и поэтому может приводить к ошибкам в оценке параметров глубинно-скоростной модели среды.

Перечисленные причины уменьшают возможность построения качественного сейсмического изображения, ограничивая получение адекватной информации о строении геологической среды.

Таким образом, неустойчивость решений ОЗ, наличие неопределённости в вычислении формы годографов целевых волн, неоднозначность решений миграционных процедур, ограничения метода ОСТ стимулируют поиск других подходов к надёжному и качественному построению сейсмических изображений глубинных слоев геологической среды.

Представленная статья является третьей в цикле статей, который знакомит читателей с оригинальной технологией сейсмической локации, предназначенной для построения сейсмических изображений высокого разрешения и точности.

Существует ли возможность построения качественных сейсмических изображений без использования решения ОЗ?

Рассмотрим два умоглядных эксперимента, предположив слоистую модель среды.

Эксперимент 1.

Предположим, что пробурена вертикальная колонковая скважина в заданной точке профиля наблюдения предполагаемого месторождения углеводородного сырья. Пройдены все слои осадочных отложений. Анализируя изменение физических свойств полученных кернов, можно с некоторой погрешностью определить координаты (удаление, глубина) пересечения вертикали с границами глубинных слоёв.

Пробурирав необходимое количество вертикальных скважин вдоль профиля наблюдения, получим наборы точек, расположенных на границах глубинных слоёв.

Очевидно, что линия каждой границы является функцией глубины от удаления. Координаты точек полученных наборов могут быть использованы для полиномиальной аппроксимации по методу наименьших квадратов линий границ слоев.

Совокупность графиков вычисленных полиномов представит изображение глубинного разреза предполагаемого месторождения.

Эксперимент 2.

Предположим, что вдоль профиля предполагаемого месторождения углеводородного сырья произведено сейсморазведочное наблюдение по методу отражённых волн в идеальных во всех отношениях условиях. Рассмотрим схему слоёв глубинного разреза исследуемой среды с неопределёнными пока геометрическими параметрами границ. Пусть на этой схеме из заданной точки профиля наблюдения опущена вертикаль, пересекающая все слои осадочных отложений. Согласно принципам геометрической сеймики, при падении упругой волны на любую точку границы слоёв (в частности, точку пересечения с заданной вертикалью) в ней возбуждается вторичная отражённая сейсмическая волна.

Профиль отражённой волны, характеризующий изменение в пространстве ам-

плитуды упругой деформаций среды, имеет форму сейсмического импульса [4, 5]. Не нарушая общности рассуждений, можно считать, что гипоцентр импульса отражения расположен в точке пересечения заданной вертикали и границы.

Зафиксировав моменты отражений на заданной вертикали, в каждом из слоёв, от нижних границ которых произошли отражения, можно выделить две области. Назовём их приграничной и внутренней областями слоя.

В приграничной области слоя, размер которой определяется длительностью импульса отражения, амплитуда деформации среды уменьшается в направлении от границы. Максимум амплитуды имеет координаты гипоцентра импульса. В точках внутренней области слоя деформации среды не наблюдается.

Предположим, что имеется средство измерения амплитуды упругой деформации в глубине среды. Сканируя этим средством заданную вертикаль, можно выявить приграничные области слоёв, измерить максимальные значения амплитуд упругой деформации и локализовать гипоцентры импульсов отражения.

Иначе говоря, можно обнаружить гипоцентры импульсов отражения и определить их координаты, которые будем считать координатами дискретных источников сейсмических импульсов отражения (ИСИО).

Выполнив сканирование вертикалей вдоль профиля наблюдения, получим набор дискретных ИСИО, расположенных на границах глубинных слоёв.

Координаты ИСИО могут быть использованы для полиномиальной аппроксимации по методу наименьших квадратов линий отражающих границ слоёв. Полученные линии границ слоёв образуют глубинно-скоростную модель среды, привязанную в пространстве к профилю наблюдения.

Как и в эксперименте 1, по полученной аппроксимации можно построить изображение глубинно-скоростной модели предполагаемого месторождения.

Таким образом, действуя способами, предложенными в экспериментах 1 и 2, можно достаточно точно построить изображение глубинно-скоростной модели исследуемой среды без решения ОЗ.

В представленной статье даётся конструктивный ответ на вопрос, поставленный в начале данного раздела. Описана технология построения качественных сейсмических изображений – глубинных разрезов, основанная на решении набора ПЗ вместо решения одной ОЗ. Такой подход позволяет теоретически и практически исключить большинство приведённых выше недостатков.

Использование при разработке технологии сейсмической локации успешно развитых в радиолокации сверхразрешающих подходов к решению ПЗ обеспечило высокоточную локацию ИСИО.

1. Теоретические материалы

Для построения качественного сейсмического изображения необходимо иметь информацию о глубине залегания, числе и мощности слоёв геологической среды, об углах наклона, кривизне и других структурных формах отражающих границ.

Такая информация содержится во множестве координат ИСИО, расположенных на границах слоёв глубинно-скоростной модели среды. Эти координаты обеспечивают аппроксимацию формы границ слоёв геологической среды, а также выявление

структурных особенностей и нарушений однородности слоёв.

В [6] предлагается оригинальная идея локационной технологии построения сейсмических изображений. Там для локации (определения координат расположения) ИСИО применён алгоритм со сверхразрешением (см. вторую статью цикла), реализованный на базе сейсмической цифровой антенной решётки (ЦАР).

В данной статье описан иной алгоритм сейсмической локации со сверхразрешением, использующий виртуальную сетку локации, на которой выполняются однозначные и структурно устойчивые решения ПЗ.

Роль сейсмической ЦАР выполняет линейная многоканальная сейсморегирующая станция. Конфигурация системы наблюдения определяет диаграмму направленности сейсмической ЦАР, а её фокусировка осуществляется с помощью виртуальной сетки локации. Сетка локации «виртуально накладывается» на исследуемый участок глубинно-скоростной модели среды, динамически адаптируясь для поиска оптимального решения.

Построенная по предложенной технологии серия годографов волн, отражённых от границ слоёв геологической среды, является основой для локации ИСИО, базирующейся на идее сверхразрешения. Полученная в результате локации информация обеспечивает аппроксимацию формы границ слоёв геологической среды, а также выявление структурных особенностей и нарушений однородности слоёв.

Сейсмическая ЦАР использует все сейсмоприёмники системы наблюдения для повышения достоверности аппроксимации каждого слоя среды в двух встречных направлениях. Окончательно линия границы формируется усреднением полученных результатов.

В статье рассматривается стационарная встречная группированная система наблюдений с двумя фланговыми расстановками по краям и четырьмя симметричными в середине. Система наблюдения на приблизительно 5 км профиля содержит 6 пунктов взрыва (ПВ) и 97 пунктов приёма (ПП).

Задача локации ИСИО, расположенного на границе очередного слоя, сводится к нахождению координат точки касания линии, описывающей нижнюю отражающую границу слоя, и изохроны отражения (далее – изохроны). Предполагается, что линия границы такова, что имеет единственную точку касания с одной изохроной.

Изохрона представляет собой кривую чётного порядка, симметричную относительно середины отрезка, соединяющего её фокусы. В любом слое среды изохрона задаётся одной парой ПВ – ПП базы наблюдения. Координаты этих пунктов определяют фокусы изохроны в первом слое среды. Фокусами изохроны в более глубоком слое являются точки пересечения уже известной линии нижней отражающей границы предшествующего слоя падающим и отражённым лучами.

В рамках базовой глубинно-скоростной модели среды модель изохроны представляет собой эллипс, каноническое уравнение которого имеет два параметра. Это большая ось и фокусное расстояние эллипса, определяемые кинематическими параметрами слоя: неизвестной скоростью и известным временем распространения волны от одного фокуса до другого.

Сетку локации образуют вертикально расположенные дикритические узлы («пучки»), в которых сходятся прямые линии, представляющие заданное множество касательных к изохроне. Узлы сетки располагаются на касательных с заданным ша-

гом вокруг центрального узла. Они определяют удаление и глубину залегания касательных, наклонённых к горизонтали и друг к другу под определёнными углами.

На рисунке 1 изображена упрощённая схема системы наблюдения и сетки локации. Показаны вертикаль (цвет циан), на которой лежат «пучки» (синий цвет), линии первой и второй границ (чёрный цвет), узлы сетки и некоторые лучевые траектории (зелёный и красный цвет)¹.

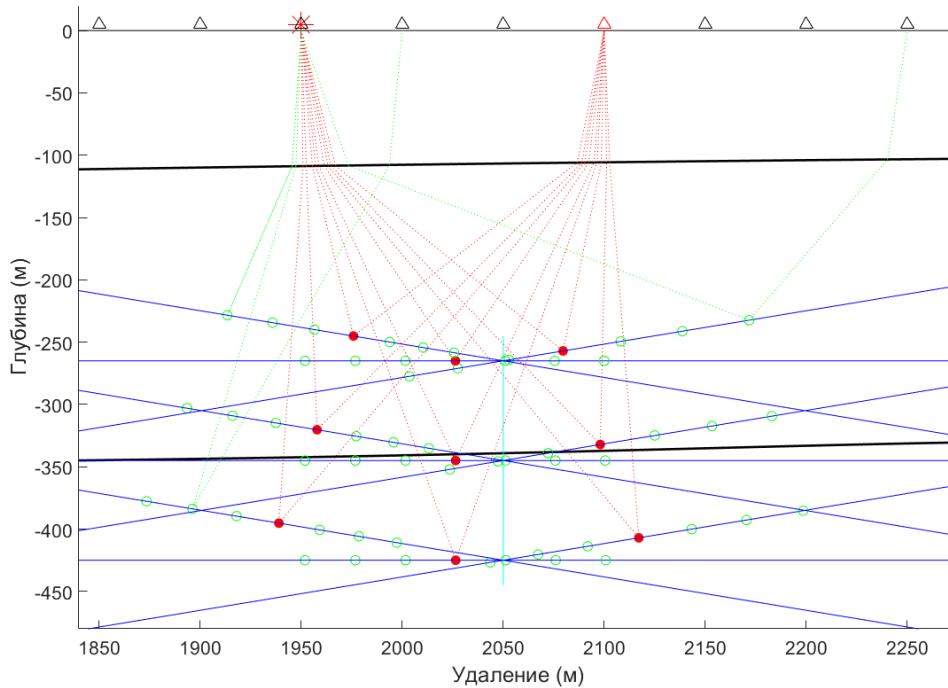


Рис. 1. Фрагмент схемы системы наблюдения с сеткой локации

Решение задачи локации ИСИО в каждом слое геологической среды обеспечивает оригинальный алгоритм со сверхразрешением, который будем называть алгоритмом селекции и обозначать «S-алгоритм». Он предназначен для построения и анализа локационного рельефа, который задаётся на множестве касательных изохроны.

Для оценки основных кинематических параметров очередного слоя используются решения ПЗ совместно для всех сейсмоприёмников системы наблюдения. Решения ПЗ находит алгоритм локации, названный «L-алгоритм», являющийся модификацией алгоритма [7].

L-алгоритм вычисляет скорость распространения в очередном слое среды продольной отражённой волны, её путь от ПВ до ПП колебаний и координаты всех точек отражения и преломления на этом пути. Координаты точек отражения от нижней границы очередного слоя являются искомыми координатами точки касания изо-

¹Цветные иллюстрации доступны на сайте журнала <http://msm.omsu.ru>

хроны. В технологии сейсмической локации эти точки трактуются как координаты ИСИО очередного слоя геологической среды.

Входными данными для L-алгоритма являются координаты ПВ и ПП, время прихода отражённой волны на ПП и уравнения всех отражающих границ. Уравнения границ слоёв, лежащих выше очередного, уже известны. Неизвестным является только уравнение нижней отражающей границы в очередном слое. Оно задаётся совместным использованием сетки локации, L- и S-алгоритмов.

Перед проведением локации ИСИО выполняются оценки пластовой скорости распространения волны в очередном слое и его мощности. Оценка мощности нужна для исходного позиционирования центрального узла сетки локации.

Дискретные изменения положения и размера шага виртуальной сетки локации задают узлы сетки, в которых формируются «веера» касательных к изохроне. На их основе L-алгоритм находит множество координат точек касания изохроны. S-алгоритм выбирает из этого множества наилучшую точку касания, фиксируя тем самым и наилучшую касательную к изохроне.

Таким образом, задача локации ИСИО, расположенного на границе очередного глубинного слоя, оказывается решённой с погрешностью, заданной положением и текущим шагом виртуальной сетки.

Повторив решение для всех изохрон на интервале наблюдения, получим набор ИСИО. Координаты этих источников могут быть использованы для полиномиальной аппроксимации по методу наименьших квадратов линии очередной отражающей границы. Полученные линии границ всех слоёв образуют глубинно-скоростную модель, привязанную в пространстве к профилю наблюдения.

К сожалению, по объективным причинам вычислительного характера точность полиномиальной аппроксимации функции по методу наименьших квадратов, выполненной на большом интервале, не всегда удовлетворяет самым высоким требованиям.

Существенно повысить точность аппроксимации в такой ситуации можно, разбив большой интервал на малые части и сглаживая последовательность линейных трендов функции, заданных на этих частях интервала.

Применение алгоритмов локации и селекции для совместной обработки нескольких последовательно расположенных изохрон обеспечивает высокое качество построения сейсмических изображений. Назовём «согласованной локацией» ИСИО поиск единого для них тренда линии отражающей границы, заданного на группе последовательно расположенных изохрон.

Для осуществления согласованной локации ИСИО, а также для улучшения разрешающей способности ЦАР по дальности система наблюдений разбивается на группы последовательно расположенных сейсмоприёмников. В результате применения согласованной локации всеми группами может быть существенно повышена точность аппроксимации и достоверность представления линии отражающей границы.

Размер группы задаётся числом изохрон, необходимым для локации достаточно малого участка отражающей границы, который можно приблизительно считать линейным. Число групп обеспечивает равномерное разбиение числа сейсмоприёмников системы наблюдения. Группа предназначена для итеративно проводимой со-

гласованной локации линейного тренда (L-тренда) линии отражающей границы.

Каждый сейсмоприёмник группы соответствует одной изохроне и определяет селекцию (выбор наилучшей) её касательной из множества узлов, заданного сеткой локации. Селекция осуществляется S-алгоритмом при помощи сканирования вектором-гипотезой множества точек касания изохроны. Вектор-гипотеза образован нечётным количеством (в данном случае 7) последовательно расположенных узлов сетки локации.

Рассмотрим итерационную процедуру поиска одного L-тренда отражающей границы очередного глубинного слоя среды, иллюстрирующую работу основных элементов локационной технологии.

Число итераций принято равным трём. В рамках одной итерации трижды производится перемещение центрального узла сетки локации по горизонтали.

Первая итерация поиска L-тренда группы сейсмоприёмников начинается с первой доступной изохроны. Доступной считается та изохрона, для которой существует траектория движения луча от ПВ до ПП, проходящая через все вышележащие границы слоёв. Оценка мощности слоя задаёт исходную глубину расположения центрального узла сетки локации. Его исходное удаление от ПВ равно половине расстояния между ПВ и ПП, соответствующего первой доступной изохроне.

Сейсмическая ЦАР последовательно фокусируется на все касательные изохроны, заданные узлами сетки локации. Фокусировка на касательную означает, что на ней вычисляется точка фокусировки – репер. Координаты каждого репера являются результатом работы L-алгоритма с входными параметрами: координаты ПВ и соответствующего узла вектора-гипотезы, время прихода на него отражённой волны, уравнения вышележащих отражающих границ и касательной.

Выделяется центральный репер, которому соответствует средний (центральный) узел вектора-гипотезы. Центральный репер становится дискретным аргументом дискретной пространственной критериальной функции – локационного рельефа. На рис. 1 центральные реперы изображены красными кружками, а остальные – зелёными окружностями.

Значения критериальной функции вычисляются как взвешенная сумма двух кинематических и одного корреляционного критериев.

Кинематические критерии зависят от траектории движения от ПВ до ПП падающего и отражённого лучей, а также времени хода сейсмической волны вдоль них. Вычисление критериев обеспечивает применение L-алгоритма ко всем сфокусированным на касательную сейсмоприёмникам вектора-гипотезы.

Для каждого сейсмоприёмника вектора-гипотезы с номером $i = j - n, \dots, j + n$ вычисляется разность $\Delta T_i = T_i - T_{i,real}$ между полученным L-алгоритмом временем T_i и временем $T_{i,real}$, зарегистрированным по сейсмотрассе. На основе разностей времён прихода волны на все сейсмоприёмники ЦАР вычисляются два функционала η_1, η_2 , позволяющие рассчитать значения кинематических критериев для каждого центрального репера. Первый функционал характеризует величину, обратную пиковому значению, второй – величину, обратную разбросу значений разностей времён:

$$D_{i,1} = 2e^{abs(\Delta T_i)}, D_{i,2} = (\Delta T_i)^2, \eta_1 = 1/\text{mean}(D_{i,1}), \eta_2 = 1/\text{mean}(D_{i,2}).$$

Корреляционный критерий для каждого центрального репера представляет собой

когерентную оценку Semblance [8], которая зависит от формы

$$\eta_S = \frac{\sum_{t=1}^{T_{imp}} (\sum_{j-n}^{j+n} x_i(t + \tau))^2}{\sum_{t=1}^{T_{imp}} \sum_{j-n}^{j+n} (x_i(t + \tau))^2},$$

где j – номер центрального сейсмоприёмника вектора-гипотезы в системе наблюдения, n – число элементов вектора-гипотезы, x_i – i -ая сеймотрасса, τ – временной сдвиг, целое число T_{imp} – длительность импульса.

Для всех горизонтальных сдвигов сетки локации строятся локационные рельефы, анализ которых обеспечивает выбор наилучшей точки касания изохроны. Координаты центрального репера, имеющего максимальное значение среди всех локационных рельефов, определяют этот выбор. На рис. 2 разными цветами изображены локационные рельефы трёх сдвигов, состоящие из 15 точек, соответствующих трём глубинам и пяти касательным.

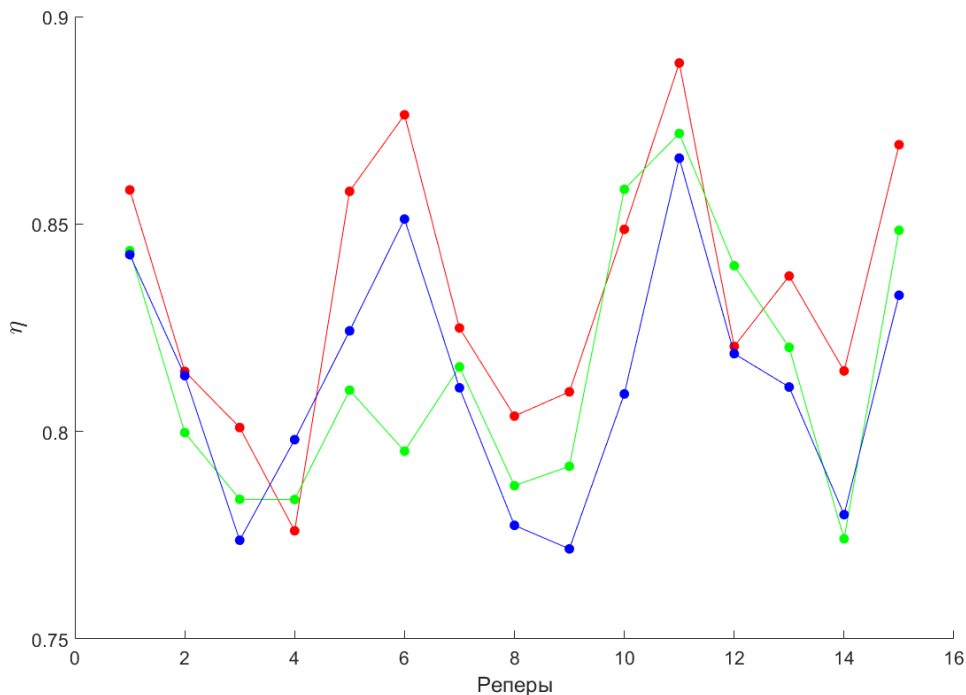


Рис. 2. Пример локационных рельефов

Поиск продолжается до выбора точек касания всех изохрон группы сейсмоприёмников.

Через выбранные точки касания изохрон группы строится полином первой степени. С помощью L-алгоритма, использующего этот полином в качестве участка отражающей границы, находится согласованный (расположенный на одной линии) набор точек касания всех изохрон группы.

На этом заканчивается текущая итерация.

Переход на следующую итерацию поиска L-тренда выполняется с целью уточнения глубины его залегания. Для этого шаг по глубине сетки локации уменьшается вдвое, центральный узел сетки размещается в средней точке найденного набора.

На всех итерациях производится фокусировка сейсмической ЦАР, строятся локационные рельефы, производится локация согласованного набора точек касания изохрон группы.

На основе всех наборов точек касания, полученных на итерациях, строится аппроксимация окончательного L-тренда группы. На рис. 3 изображены центральные реперы (кружки), L-тренды и согласованный набор точек касания изохрон группы (кресты) трёх итераций. Первая итерация изображается красным цветом, вторая – синим, третья – зелёным. Окончательный L-тренд изображён цветом магента, граница – чёрным. Квадратами показано соответствие концов отрезков аппроксимации и аппроксимируемой функции.

Далее производится аналогичная обработка следующих групп датчиков.

Последовательность L-трендов всех групп сейсмоприёмников системы наблюдения, подвергнутая сглаживанию, образует полную линию отражающей границы очередного слоя. На рис. 3 изображён участок отражающей границы (чёрный цвет) с нанесёнными на неё L-трендами двух направлений обработки (синий и красный) и сглаженной линии (зелёный).

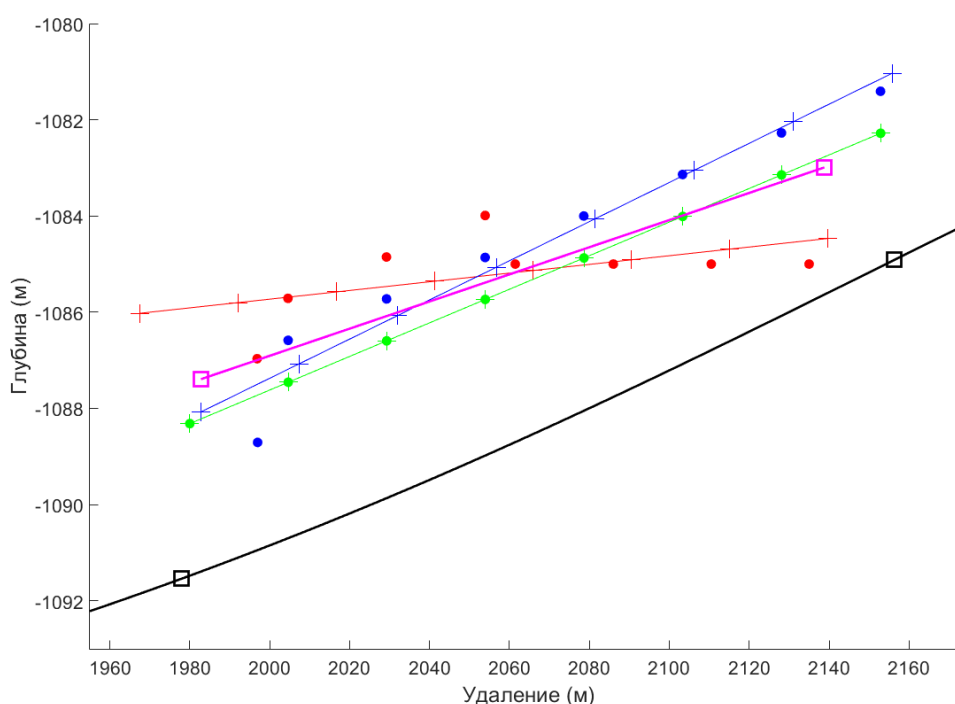


Рис. 3. Пример построения L-тренда

Совокупность линий отражающих границ образует сейсмическое изображение глубинно-скоростной модели исследуемой среды (рис. 5).

Таким образом, технология, основанная на согласованной локации ИСИО по наблюдаемым данным временного поля отражённых волн, обеспечивает корректное и устойчивое построение сейсмических изображений.

2. Результаты практической реализации

2.1. Оценка горизонтальных изменений пластовой скорости

Без знания скоростей распространения сейсмических волн невозможна ни геометрическая, ни динамическая интерпретация сейсморазведочных данных, равно как и их геологическое истолкование. Данные о скоростях распространения упругих волн в реальных средах используются при решении многих геологических и геофизических задач, так как известны зависимости скорости от геологических факторов и связи скорости с другими физическими свойствами исследуемой среды [9].

Поэтому в сейсморазведке разработаны разнообразные средства оценки различных видов скоростных параметров изучаемой среды. В частности, для пластовой скорости в горизонтально-неоднородном слое, при отсутствии нелинейных горизонтальных изменений скорости в покрывающей толще, удовлетворительным приближением является формула Дикса. Однако наличие неучтённых горизонтальных скоростных неоднородностей приводит к значительным погрешностям в оценке кинематики отражённых волн.

Упомянутый выше вариант L-алгоритма при локации каждого ИСИО в очередном слое вычисляет скорость распространения импульса отражения от ПВ к ПП через все вышележащие пласты модели исследуемой среды.

Полученная совокупность значений характеризует горизонтальные изменения пластовой скорости вдоль нижней отражающей границы. Медиана полученных значений принимается за оценку пластовой скорости. Нелинейные изменения пластовой скорости вызваны горизонтальными нарушениями структурных форм отражающих границ покрывающей толщи.

Таким образом, в состав локационной технологии входит средство оценки горизонтальных скоростных неоднородностей вдоль нижней отражающей границы каждого исследуемого слоя глубинной модели среды.

2.2. Устранение кратных отражений

По сравнению с методом ОСТ, локационная технология требует меньшего числа пунктов возбуждения колебаний (6 ПВ и 97 ПП на ~ 5 км профиля) и одинарной кратности наблюдения для обработки профиля одного размера. Это может существенно снизить стоимость полевых сейсморазведочных работ и уменьшить объем данных при обработке наблюдений.

Кроме того, подавление кратных отражённых волн от криволинейных границ в локационной технологии достигается без нарушения частотных свойств сейсмограмм. В рамках подхода, основанного на использовании годографов отражённых волн по сейсмограммам ОСТ, решение этой задачи затруднительно.

На рис. 4 изображён фрагмент сейсмограммы МОВ, состоящий из 24 сейсморасс, на котором чёрным цветом нанесены оси синфазности волн, отражённых от первой и второй границ. Пунктиром синего цвета нанесена ось синфазности волны

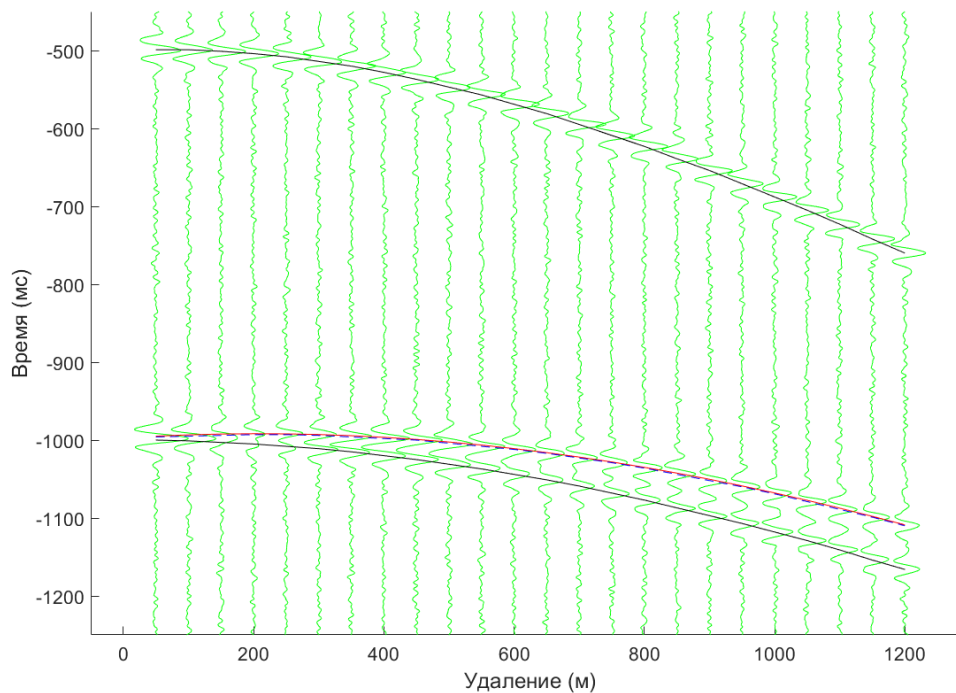


Рис. 4. Фрагмент сейсмограммы, содержащий ось синфазности кратного отражения

двукратно, отражённой от первой границы. Красным цветом изображена проверочная ось синфазности.

2.3. Выявление горизонтальных нарушений структурных форм отражающих границ

Непростой, но актуальной задачей построения сейсмических изображений является выявление горизонтальных нарушений структурных форм отражающих границ слоёв.

В состав локационной технологии входит средство решения таких задач, основанное на согласованной локации сейсмических ИСИО. Пример выявления антиклинальных горизонтальных нарушений структурных форм отражающих границ слоёв демонстрирует изображение на рис. 5.

2.4. Построение глубинно-скоростной модели геологической среды

На рис. 6 приведён модельный пример работы локационной технологии построения сейсмических изображений. Предполагается, что все процедуры предварительной обработки сейсмограмм выполнены, а времена прихода сейсмических импульсов отражения на ПП известны с точностью до 1 мс.

Обрабатывалась зашумлённая синтетическая сейсмограмма с осями синфазности волн, отражённых от четырёх границ, и осью синфазности двукратно отражённой от первой границы волны. Последняя ось частично перекрывалась с осью второй волны.

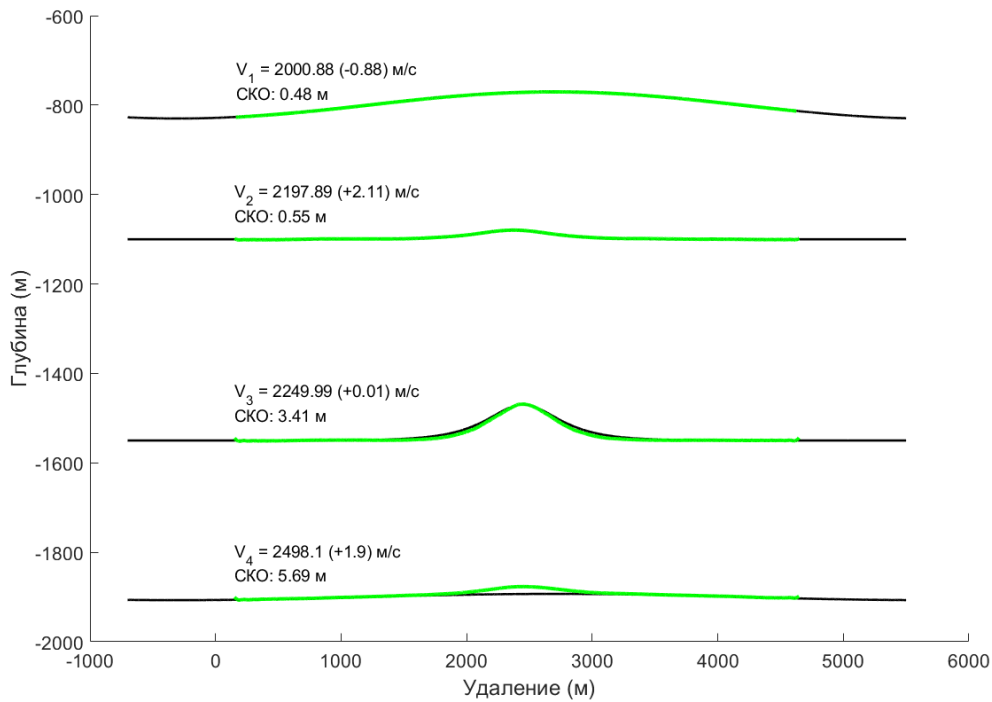


Рис. 5. Глубинная модель и её аппроксимация (зелёные линии)

По результатам вычисления аппроксимирующего полинома отражающей границы были оценены времена прихода на сейсмоприёмники базы наблюдения порождённых этой границей кратных отражённых волн. По полученным временам на исходную сейсмограмму были нанесены проверочные оси синфазностикратно отражённых волн. После обнаружения на исходной сейсмограмме оси синфазности, близкой к проверочной оси, ось синфазности двукратно отражённой волны была выявлена и массив времён её прихода на ПП исключён из обработки. Тем самым глубинно-скоростная модель среды была освобождена от ложных границ.

Произведена оценка точности аппроксимации линий отражающих границ. Точность аппроксимации с помощью полученных линий границ (зелёный цвет) оценивается среднеквадратическим отклонением (СКО) от истинных (чёрный цвет). Оценки точности аппроксимации и пластовых скоростей, приведённые на рис. 5, показывают вполне удовлетворительный результат построения сейсмического изображения заданной среды (глубинно-скоростной модели) и определения её кинематических параметров.

Третья граница в районе 1500 м профиля наблюдения имеет сильное антиклинальное нарушение формы, которое передаётся и на вторую границу.

На рис. 6 изображены подробности аппроксимации антиклинального нарушения структурной формы третьей отражающей границы. Изображён участок отражающей границы (чёрный цвет) с нанесёнными на неё L-трендами двух направлений обработки (синий и красный) и сглаженной линии (зелёный).

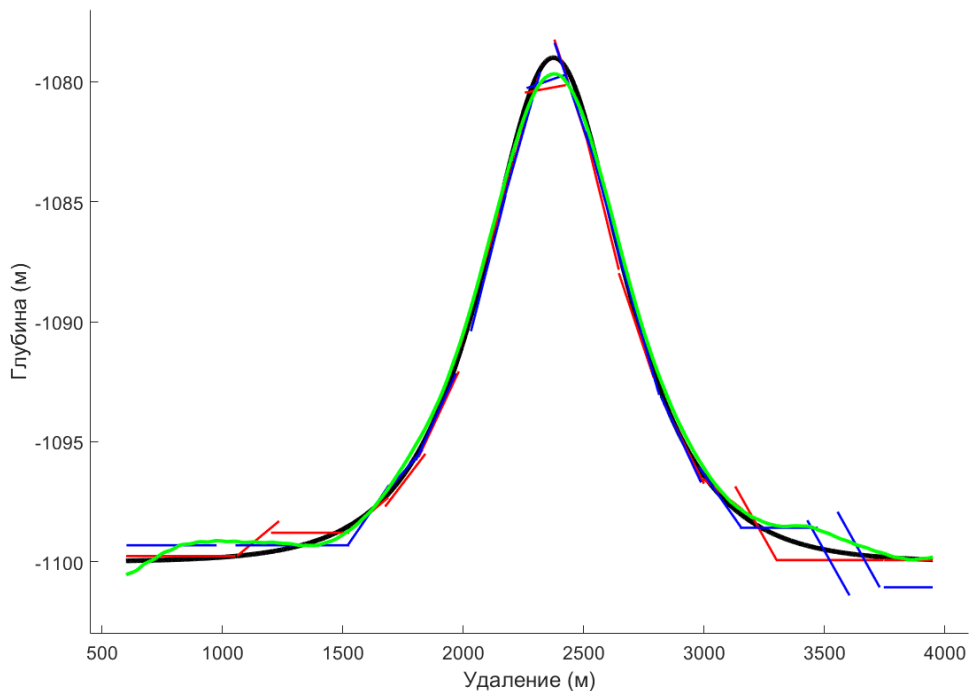


Рис. 6. Пример построения (антиклинального) участка границы

На четвертой границе в районе 1900 м имеется заметное отклонение при восстановлении границы. Эта погрешность объясняется усиливающимся от границы к границе негативным влиянием горизонтальных нарушений в покрывающей толще на решения ПЗ в нижележащих слоях. Учет и устранение такого влияния представляет предмет дальнейшего исследования.

3. Заключение

В статье изложен новый подход к построению сейсмических изображений на основе устойчивых и однозначных решений ПЗ вместо решения одной ОЗ. Он основан на локации ИСИО, которую осуществляет сейсмическая ЦАР, использующая алгоритм локации со сверхразрешением и виртуальную сетку локации.

Для аппроксимации отражающих границ глубинно-скоростной модели геологической среды осуществляется сглаживание последовательности малых линейных участков линии границы, полученных согласованной локацией нескольких близко расположенных ИСИО.

Точность построения отражающих границ определяется заданными параметрами используемых L- и S-алгоритмов и сетки локации.

Технология сейсмической локации обладает рядом теоретических и практических преимуществ по сравнению с известными технологиями построения сейсмических изображений.

Развитие технологии сейсмической локации предполагает вибрационную модификацию технологии, использование сложных глубинно-скоростных моделей строения геологической среды и выявление разнообразных их нарушений.

Благодарность

Выражаю благодарность А.С. Туркину за помощь в подготовке материала статей и оформление рисунков.

Литература

1. Пузырев Н.Н. Интерпретация данных сейсморазведки методом отражённых волн. М. : Гостоптехиздат, 1959. 452 с.
2. Глоговский В.М., Лангман С.Л. Свойства решения обратной кинематической задачи сейсморазведки // Технологии сейсморазведки. Новосибирск. ИНГГ им. А.А. Трофимука СО РАН. 2009. Т. 1. С. 10–17.
3. Глоговский В.М., Мешбей В.И., Цейтлин М.И., Лангман С.Л. Кинематико-динамическое преобразование сейсмической записи для определения скоростного и глубинного строения среды // Сборник докладов второго научного семинара стран-членов СЭВ по нефтяной геофизике. Т. 1. Сейсморазведка. М., 1982. С. 327–331.
4. Рабинович Е.В., Туркин А.С., Новаковский Ю.Л. Наземная локация микросейсмических сигналов для мониторинга гидравлического разрыва пласта // Доклады ТУСУР. 2012. № 1 (25). Ч. 1. С. 104–112.
5. Рабинович Е.В., Ганчин К.С., Пупышев И.М., Шефель Г.С. Модель сейсмического импульса, возникающего при гидравлическом разрыве пласта // Математические структуры и моделирование. 2014. № 4(32). С. 107–113.
6. Rabinovich E.V., Shefel G.S., Jukov A.V. Location Technology for Construction of Seismic Images // Proceedings of 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering Proceedings APEIE-2018. Novosibirsk, 2018. V. 1. Part 4. P. 519–523.
7. Оболенцева И.Р. Численные способы решения прямых пространственных задач геометрической сейсмологии для многослойных сред с границами произвольной формы // Геология и геофизика. 1974. № 9. С. 113–128.
8. Taner T., Koehler F. Velocity spectra-digital computer derivation and application of velocity function // Geoph. 1969. V. 3, 4. P. 859–881.
9. Урупов А.К. Изучение скоростей в сейсморазведке. М. : Недра, 1966. 224 с.

**SEISMIC LOCATION TECHNOLOGY. CONSTRUCTION OF A DEPTH-VELOCITY
SEISMIC MODEL OF THE GEOLOGICAL MEDIUM**

E.V. Rabinovich

Dr.Sc. (Techn.), Professor, e-mail: rabinovich@corp.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract. An original technology for construction of seismic images of high-resolution and accuracy is proposed. In given article the third part of technology is stated. A new approach to the construction of seismic images is presented here, using stable and unambiguous solutions to several direct kinematic problems of seismic exploration instead of solving one inverse problem. It is based on the location of the seismic reflection impulse source, which is carried out by a seismic digital antenna array using a super-resolution location algorithm and a virtual location grid. The accuracy of constructing reflective boundaries is determined by the specified parameters of the selection and location algorithms used, as well as the nodes of the location grid. The seismic location technology has a number of theoretical and practical advantages over known seismic imaging technologies.

Keywords: Incorrectness, ambiguity, instability of solutions to the inverse seismic problem, matched location, depth-velocity model.

Дата поступления в редакцию: 17.05.2023