

Сейсмическая локационная технология компьютерного моделирования конфигурации границ раздела пластов среды^{*}

Е.В. РАБИНОВИЧ

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный техни-
ческий университет (НГТУ НЭТИ)

rabinovich@corp.nstu.ru

Основные современные методы построения глубинно-скоростных моделей геологической среды основаны на различных решениях обратной кинематической задачи сейсморазведки. К сожалению, решения обратных задач некорректны. Известно множество алгоритмов приближенного решения обратных задач. Опыт их применения и сравнения результатов показывает отсутствие единственности и наличие структурной неустойчивости решений обратных задач.

Представленная статья знакомит читателей с развитием оригинальной технологии сейсмической локации, предназначенной для компьютерного построения сейсмических изображений высокого разрешения и точности. Предлагаемая технология обеспечивает надежное и качественное построение компьютерной глубинно-скоростной модели геологической среды без использования решений обратных задач. Для устранения ограничений, свойственных традиционным подходам к построению сейсмических изображений, в этой технологии применяются идеи радиолокационных методов.

Технология последовательно выполняет три этапа построения компьютерных моделей качественных сейсмических изображений: качественная первичная обработка полевых материалов, полученных по методу отраженных волн, и получение компьютерного изображения ее результатов; 2) построение с высоким разрешением и высокой точностью модели изображения серии годографов отраженных волн; 3) компьютерное моделирование конфигурации границ раздела пластов среды, привязанной в пространстве к профилю наблюдения.

Идея надежного и качественного построения компьютерного изображения границы раздела двух пластов модели геологической среды заключается в нахождении линии, проходящей через оптимально выбранный набор точек отражения волны. Технология сейсмической локации использует алгоритмические средства, обеспечивающие оптимальное обнаружение и оценку координат наилучшей точки отражения, проходя через которую волна распространяется за минимальное время.

Привязку в пространстве к профилю наблюдения обеспечивает виртуальная сетка локации. Точность привязки достигается за счет использования стохастической операции перемещения и уточнения параметров сетки.

^{*} Статья получена 25 февраля 2025 г.

Ключевые слова: некорректность решений обратной кинематической задачи сейсморазведки, глубинно-скоростная модель, обнаружение, сейсмический импульс, мгновенная фаза, ось синфазности волны, сейсмическая цифровая антенная решетка, сверхразрешение, локационный рельеф, серия годографов волн, оптимизационный алгоритм локации, виртуальная сетка

ВВЕДЕНИЕ

Для представления геологических моделей в сейсморазведке используются построение специальных изображений – глубинных разрезов, кубов данных и т. п. Высокое качество таких изображений осадочной толщи является основным требованием заказчиков исследований [1, 2].

Построение таких моделей основано на решениях прямой и/или обратной кинематической задачи сейсморазведки. Эти решения обычно базируются на геометрической сейсмике продольных отраженных волн. При этом для оценки геометрических и скоростных параметров среды используются кинематические параметры временных полей сейсмических волн. Такой подход позволяет упростить волновое уравнение, в котором длина волны устремляется к нулю, а распространение волны заменяется движением сейсмического импульса (СИ), представляющего профиль волны, характеризующий изменение в пространстве амплитуды упругой деформации среды [3].

Если заданы скоростные и геометрические параметры прямой кинематической задачи (ПЗ), то ее решение заключается в определении времени прихода волн от источника колебаний на сейсмоприемники. В большинстве случаев решение ПЗ сводится к явному решению системы уравнений параметрической оптимизации, которые однозначны и в рамках допустимых погрешностей структурно устойчивы. Основные современные методы построения глубинно-скоростных моделей среды основаны на решении обратной кинематической задачи сейсморазведки (ОЗ) [4, 5], в том числе с использованием принципов искусственного интеллекта [6]. Такое решение может быть найдено, если заданы траектории распространения, скорость и времена прихода волн на приемники, а также характеристики кривизны и шероховатости этих границ.

Обратные задачи некорректны, в них нарушено хотя бы одно из условий корректности решения – это условие существования, единственности и устойчивости решения. Поэтому даже для приближенного решения ОЗ необходимы априорные предположения относительно строения и свойств исследуемой геологической среды.

Для того чтобы решить ОЗ, необходимо так подобрать модель среды и оценки ее параметров, чтобы полученное время прихода волн, отраженных от границ глубинных пластов среды, совпадало с результатом решения ПЗ.

К сожалению, время прихода сейсмических волн измеряется с различными погрешностями. Поэтому для решения ОЗ используется не наилучшее, а приемлемое по точности совпадение с наблюдаемым временем [7].

Известно множество алгоритмов приближенного решения ОЗ. Опыт их применения и сравнения результатов показывает отсутствие единственности и наличие структурной неустойчивости решений ОЗ. Это часто проявляется в заметном отличии их результатов при проведении одних и тех же наблюдений [8].

Из сказанного следует, что неустойчивость решений ОЗ приводит к недостаточному качеству построения сейсмических изображений и ограничивает получение адекватной информации о модели глубинного строения среды.

Таким образом, некорректность решений ОЗ, а также другие ограничения современных технологий построения сейсмических изображений стимулирует поиск других подходов к надежному и качественному построению глубинно-скоростной модели пластов геологической среды.

1. ТЕХНОЛОГИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ

В качестве такого подхода автор использует технологию сейсмической локации (далее технология), предложенную им с соавторами в [9–13]. Применение этой технологии позволяет не просто строить сейсмические изображения, существенно снижая факторы, связанные с некорректностью решений ОЗ, но и осуществляет построение компьютерной глубинно-скоростной модели геологической среды.

Достоинством компьютерного моделирования является свободная от субъективных решений автоматическая обработка данных. Другим достоинством является возможность достижения адекватных параметров полученной модели при случайных или намеренных изменениях входных данных.

Технология включает три основных этапа обработки каждого СИ отражения: обнаружение импульса, выявление профиля и кинематических параметров связанной с ним целевой волны, возбужденной в геологической среде, а также измерение пространственных координат точки отражения.

Первый этап начинается с качественной нестандартной первичной обработки полевых материалов, полученных по методу отраженных волн (МОВ). Его результатом является компьютерное изображение сейсмограммы, сохранившее частотные свойства исходных полевых данных.

Второй этап посвящен построению на этой сейсмограмме с высоким разрешением и точностью модели серии годографов отраженных волн.

На третьем этапе работа технологии заканчивается компьютерным построением математической модели конфигурации границ раздела пластов геологической среды и изображением полученной модели.

В целом, технология, обрабатывая все точки отражений в совокупности, оперирует сначала во временной, а потом в пространственной области.

Технология использует идеи радиолокационных методов для устранения ограничений, свойственных традиционным подходам к построению сейсмических изображений.

На первом этапе обработки для оптимального приема и обнаружения отраженных СИ в условиях шумов и помех в технологии используются классические радиотехнические подходы. Качественное обнаружение на полевых сейсмотрассах СИ, возбужденных именно источником колебаний, обеспечивает алгоритм квадратурного корреляционного обнаружения [14], настроенный на образцовый импульс, модель которого предложена автором [9].

Алгоритм одновременно с обнаружением выполняет фильтрацию полевых сейсмических данных, согласованную с формой образцового импульса.

Он обеспечивает обработку с максимальным отношением сигнал/шум, что равнозначно подавлению случайного шума во входном сигнале. При фиксированном уровне некоррелированного шума максимум взаимной корреляционной функции достигается при совпадении форм образцового СИ и импульса из входного сигнала. Существенным преимуществом такой фильтрации является также то, что она не искажает частотный спектр входного сигнала.

Когда отраженные СИ обнаружены, то в рамках априорных предположений о свойствах среды проводится локация их мгновенных фаз, что обеспечивает лучшее прослеживание и корреляцию на полевых сейсмограммах интенсивных и протяженных осей синфазности целевых волн. Также выполняется локация глубинных гипоцентров источников СИ, в которых прикладывается основная сейсмическая энергия отражения. Каждый такой гипоцентр лежит на подошве пласта геологической среды и определяет корректное время события отражения СИ, оцениваемое вне зависимости от фазы, в которой импульс зарегистрирован на сейсмограмме. Тем самым локация гипоцентров способствует повышению разрешающей способности изображения полевой сейсмограммы.

На втором этапе обработки по осям синфазности, автоматически прослеженным на полевой сейсмограмме, формируют серию годографов целевых отраженных волн. Годограф – это график зависимости времени распространения волн от расстояния между пунктом источника колебаний и каждым пунктом приема волн сейсмической расстановки.

В настоящей статье в рамках принятой глубинно-скоростной модели среды принята и используется гиперболическая аппроксимация годографа волны, отраженной от плоской границы.

В технологии изображение временной модели конфигурации границ раздела пластов среды представляется в виде серии гипербол. Значения параметров гипербол серии обеспечивают основные исходные данные для последующей обработки результатов полевых сейсморазведочных работ.

Качество обработки результатов напрямую зависит от точности построения изображения серии гипербол и его разрешающей способности.

Точность построения определяется минимальной погрешностью вычисления параметров гипербол, выбранных из заданного множества оптимизационным алгоритмом в качестве наилучших. Заданное множество составляют все возможные гиперболы, размещаемые в узкой области сейсмограммы, содержащей ось синфазности целевой отраженной волны.

Под разрешающей способностью сейсмического изображения отражений на сейсмограмме понимается максимальное число надежно выявленных на ней годографов.

Для установления формы годографа целевой волны и автоматического выявления максимального числа годографов в рамках технологии разработан и используется алгоритм вычисления годографов (АВГ). Базирующийся на радиолокационных методах сверхразрешения [15–17] АВГ обеспечивает высокое разрешение и высокую точность построения серии годографов отраженных волн за счет выбора наилучших гипербол, приближающих данные, полученные из сейсмограмм [11, 13].

Название упомянутых методов локации призвано подчеркнуть возможность сверхразрешающей оценки направлений приема сигналов (пеленгов источников импульсов отражения) при разnose последних по угловым координатам, меньшим релеевского интервала разрешения [15].

В радиолокации для получения эффекта сверхразрешения используют цифровые антенные решетки, которые за счет использования набора согласованно работающих элементов решетки добиваются существенного сужения диаграммы направленности решетки. Такое сужение позволяет улучшить оценку направления приема сигналов. При этом диаграмма направленности решетки позволяет увеличить отношение мощности полезного сигнала к средней мощности шума за счет взвешенного суммирования принятых сигналов элементами решетки.

При помощи сканирования множества пеленгов находится максимум пеленгационного рельефа и его координаты, которые дают оптимальную оценку пеленга источника импульса отражения [16]. Сверхразрешение пеленгов основано на определении пеленгационного рельефа посредством вычисления пространственной критериальной функции, заданной на множестве оценок пеленгов.

В сейморазведке роль цифровой антенной решетки, обеспечивающей высокое разрешение, выполняет многоканальная цифровая сейсморегистрирующая станция [10]. Сейсмическая цифровая антенная решетка обеспечивает высокое выходное отношение сигнал / шум, что позволяет на фоне шумов и помех выделить, а также проследить даже малозаметные на сейсмограмме оси синфазности, которые при другой обработке были бы пропущены.

Тем самым вместе с обеспеченной АВГ оптимизацией достигается детальное выявление глубинной структуры геологической среды и фиксируется местоположение даже близкорасположенных отражающих границ раздела пластов.

Локационный рельеф описывается сейсмической критериальной функцией, заданной на множестве гипербола. Координаты максимума рельефа определяет АВГ выбором параметров гипербола, которая и представляет наилучший годограф отраженной волны.

Локационный рельеф по сравнению с радиолокационным обладает достоинством более точной оценки параметров искомых гипербола. Для его вычисления используются более близкие (локальные) статистические связи сигналов, принятых различными элементами сейсмической цифровой антенной решетки, в узких областях сейсмограммы, содержащих годограф волн, в то время как для вычисления радиолокационного рельефа используется интегральная корреляция полных данных [17]. На этом заканчивается обработка полевых материалов во временной области. Третий этап технологии заключается в компьютерном моделировании и конфигурации границ раздела глубинных пластов геологической среды, привязанной в пространстве к профилю наблюдения.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИОННОГО РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ, ИСПОЛЬЗУЕМАЯ В ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ

Теоретические основы [12] и практические способы надежного и качественного построения компьютерной глубинно-скоростной модели среды на базе замены решения ОЗ на набор оптимизационных решений ПЗ кратко представлены в этом разделе.

Возможность такой замены следует из того, что решение ОЗ заключается в нахождении геометрических параметров границ глубинных пластов, если заданы вид траекторий распространения, скорость и времена прихода волн на сейсмоприемники. В предложенной технологии скорость и время прихода волн на сейсмоприемники являются вычисляемыми параметрами задачи, а вид траекторий распространения волн вычисляется оптимизационным алгоритмом локации (ОАЛ).

Рассмотрение материала проводится в рамках основного метода сейсморазведки – МОВ, который исследует параметры распространения отраженных от подошв пластов среды сейсмических волн. Распространение волн, включающее точки отражения и преломления волн на всех границах пластов, наблюдается от пунктов источников колебаний до пунктов приема – сейсмоприемников сейсмической цифровой антенной решетки.

Рассмотрение материала ограничено простейшей моделью геометрической сеймики плоских продольных отраженных волн в виде пластов с постоянными скоростями распространения. В этой модели волны распространяются между границами пластов, имея фронты (лучи) в виде прямых линий. Параметры, связанные с динамикой возбуждения волн, в работе полагаются идеальными.

Идея надежного и качественного построения компьютерного изображения границы раздела двух пластов модели геологической среды заключается в нахождении линии, проходящей через оптимально выбранный набор точек отражения волны.

Оптимизационный алгоритм локации обеспечивает оптимизацию каждого решения ПЗ, определяя координаты наилучшей точки отражения, проходя через которую волна распространяется за минимальное время.

Волна распространяется от пункта источника колебаний до заданного пункта приема (сейсмоприемника – элемента сейсмической антенной решетки), проходя через точки отражения-преломления, лежащие на всех границах разделов пластов. Исходя из полученных времени распространения волны и координат гипоцентров источников отраженных СИ, а также структуры модели среды, ОАЛ находит оптимальную траекторию движения сейсмической волны при отражении от подошвы очередного пласта. Эта траектория фиксируют координаты точки отражения на подошве пластов, которые являются

решением оптимизационной задачи с ограничениями. Ограничения связаны с выбранными изотропными и скоростными свойствами модели среды.

Построение первой глубинной границы не требует оптимизационного решения – оно аналитическое.

В следующем разделе будет разъяснено, каким образом осуществляется построение остальных глубинных границ.

Введем декартову правовинтовую систему координат xuz . Ориентация осей и положение начала координат могут быть выбраны произвольно. За ось x примем, как обычно в задачах сейсморазведки, горизонтальную прямую, проходящую через источник колебаний и точку наблюдения. Ось z направим вертикально вниз и для упрощения выкладок ограничимся этой плоскостью, приняв $y = 0$. Начало координат совмещаем с пунктом источника колебаний.

Пусть заданы координаты пункта источника – точка $O(x_0, z_0)$ и пункта приема $A(x_{m+1}, z_{m+1})$. Пусть волна распространяется на удаление L от точки O до точки A , преломляясь и отражаясь на границах $f_i(x, z) = 0$, ($i = 1, 2, \dots, n$), разделяющих пласты. Функции $f_i(x, z)$ должны иметь непрерывные первые производные.

Пусть функции $f_{i-1}(x, z)$ известны с погрешностью аппроксимации по методу наименьших квадратов полиномом довольно высокой степени.

Поставим задачу нахождения оптимального пути волны, т. е. координат x_k, z_k ($k = 1, 2, \dots, m$) всех точек преломления и отражения.

Время распространения волны от пункта источника колебаний до пункта приема можно записать как сумму времени пробега вдоль каждого из отрезков пути между поверхностями раздела в виде

$$t = \sum_{k=1}^{m+1} \frac{\sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (z_k - z_{k-1})^2}}{v_k}, \quad (1)$$

где v_k – скорости на отрезках пути между точками с индексами k и $k - 1$.

Координаты x_k, z_k связаны между собой зависимостями на границах $f_k(x_k, z_k) = 0$, ($k = 1, 2, \dots, m$), выражающими принадлежность точек (x_k, z_k) поверхностям раздела $f_i(x, z) = 0$, ($i = 1, 2, \dots, n$).

Путь волны можно найти, используя принцип Ферма. Необходимые условия экстремума (в общем случае стационарности) времени $t(x_k)$ представляют собой закон Снеллиуса для m точек (x_k, z_k) . Его выполнение одновременно во всех этих точках пересечения лучами кровли и подошвы каждого пласта равноценно получению решения ПЗ сейсморазведки для фиксированных точек [18].

Пусть имеем систему m уравнений относительно неизвестных координат x_k :

$$\left\{ \begin{array}{l} t = \sum_{k=1}^{m+1} \frac{K_k}{v_k}, K_k = \sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (z_k - z_{k-1})^2}, p_k = -\frac{\partial z_k}{\partial x_k}; n_k = \frac{v_k}{v_{k+1}}, \\ x_k = \frac{x_{k-1}K_{k+1} + x_{k+1}n_kK_k + p_k[(z_k - z_{k-1})K_{k+1} - (z_{k+1} - z_k)n_kK_k]}{n_kK_k + K_{k+1}}. \end{array} \right. \quad (2)$$

Оптимизационное решение для фиксированных пунктов приема по системе уравнений (2) вычисляется итеративно (по k) относительно границ с использованием метода Вегстейна [19]. Схема решения (лучевые диаграммы) для одного пункта приема и одной точки отражения на трех границах приведена на рис. 1. На рисунке глубина (как принято в геофизике) отсчитывается в отрицательных единицах.

Таким образом, решение задачи оптимизации для одной точки наблюдения по каждой границе пластов модели среды сводится к решению системы нелинейных уравнений (2), количество которых равно числу точек отражения-преломления, лежащих на пути распространения волны.

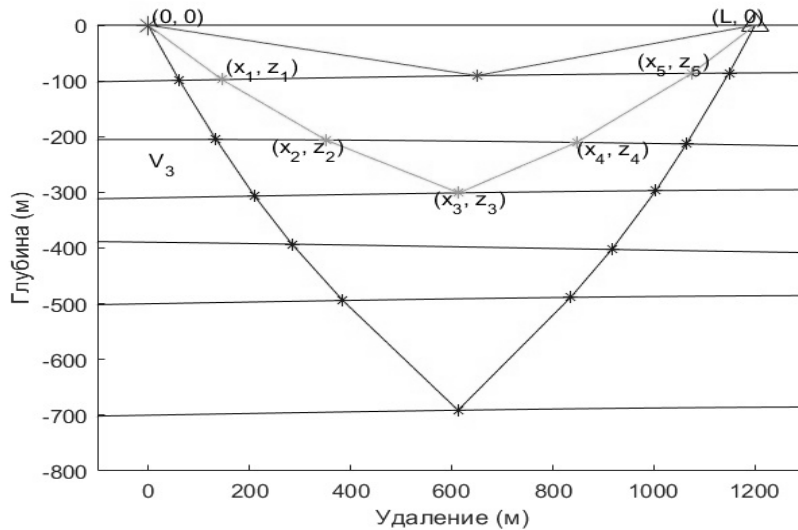


Рис. 1. Лучевые диаграммы построения 1-й, 3-й и 6-й отражающих границ

Fig. 1. Ray diagrams for constructing the 1st, 3d and 6th reflecting boundaries

Пусть первая и вторая границы заданы аппроксимацией по методу наименьших квадратов полиномами восьмой степени: $f_i(x_k, z_k) = \sum_{j=1}^9 B_i(j)x_k^{9-j}$, $i = 1, 2$. Тогда оптимизационную систему уравнений, которую

решает ОАЛ для каждой точки отражения третьей границы (x_k, z_k) , $k = 0 \div 6$, можно представить следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} t = \sum_{k=1}^6 \frac{K_k}{v_k}, \frac{K_0}{v_0} = 0, \quad v_1 = v_6, v_2 = v_5, v_3 = v_4 = \frac{K_3 + K_4}{t - \frac{K_1}{v_1} - \frac{K_2}{v_2} - \frac{K_5}{v_5} - \frac{K_6}{v_6}}; \\ x_1 = \frac{x_0 K_2 + x_2 n_1 K_1 - p_1[(z_1 - z_0)K_2 - (z_2 - z_1)n_1 K_1]}{n_1 K_1 + K_2}, \quad n_1 = \frac{v_1}{v_2}; \\ z_1 = B_1(1)x_1^8 + B_1(2)x_1^7 + B_1(3)x_1^6 + B_1(4)x_1^5 + B_1(5)x_1^4 + B_1(6)x_1^3 + \\ + B_1(7)x_1^2 + B_1(8)x_1 + B_1(9); \\ x_2 = \frac{x_1 K_3 + x_3 n_2 K_2 - p_2[(z_2 - z_1)K_3 - (z_3 - z_2)n_2 K_2]}{n_2 K_2 + K_3}, \quad n_2 = \frac{v_2}{v_3}; \\ z_2 = B_2(1)x_2^8 + B_2(2)x_2^7 + B_2(3)x_2^6 + B_2(4)x_2^5 + B_2(5)x_2^4 + B_2(6)x_2^3 + \\ + B_2(7)x_2^2 + B_2(8)x_2 + B_2(9); \\ x_3 = \frac{x_2 K_4 + x_4 n_3 K_3 - p_3[(z_3 - z_2)K_4 - (z_4 - z_3)n_3 K_3]}{n_3 K_3 + K_4}, \quad n_3 = \frac{v_3}{v_4}; \\ z_3 = h_3 - \operatorname{tg}(\varphi_3)x_3; \\ x_4 = \frac{x_3 K_5 + x_5 n_4 K_4 - p_4[(z_4 - z_3)K_5 - (z_5 - z_4)n_4 K_4]}{n_4 K_4 + K_5}, \quad n_4 = \frac{v_4}{v_5}; \\ z_4 = B_2(1)x_4^8 + B_2(2)x_4^7 + B_2(3)x_4^6 + B_2(4)x_4^5 + B_2(5)x_4^4 + B_2(6)x_4^3 + \\ + B_2(7)x_4^2 + B_2(8)x_4 + B_2(9); \\ x_5 = \frac{x_4 K_6 + x_6 n_5 K_5 - p_5[(z_5 - z_4)K_6 - (z_6 - z_5)n_5 K_5]}{n_5 K_5 + K_6}, \quad n_5 = \frac{v_5}{v_6}; \\ z_5 = B_1(1)x_5^8 + B_1(2)x_5^7 + B_1(3)x_5^6 + B_1(4)x_5^5 + B_1(5)x_5^4 + B_1(6)x_5^3 + \\ + B_1(7)x_5^2 + B_1(8)x_5 + B_1(9); \\ K_k = \sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (z_k - z_{k-1})^2}, \quad x_0 = z_0 = z_6 = 0, \quad x_6 = L, \quad k = 1 \div 6. \end{array} \right. \quad (3)$$

Оценки скоростей распространения упругих волн в реальных средах очень ценны, так как они представляют важнейшие данные для решения многих геологических и геофизических задач [20]. Поэтому представляет интерес

возможность с помощью локационной технологии оценивать горизонтальные скоростные неоднородности вдоль подошвы каждого исследуемого пласта глубинной модели среды. Изменения пластовой скорости вызваны горизонтальными нарушениями структурных форм отражающих границ, которые представляют самостоятельный интерес для анализа модели среды.

В формуле (3) приведено выражение для оценки горизонтальной скорости в третьем пласте относительно одной точки наблюдения. Имея результаты решения систем (2) для всех точек наблюдения, получаем возможность оценки нелинейных горизонтальных изменений пластовой скорости вдоль подошвы всего исследуемого пласта.

3. ВИРТУАЛЬНАЯ СЕТКА И ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ЛОКАЦИИ

В предыдущем разделе описаны математические аспекты работы ОАЛ.

В этом разделе даются разъяснения конструктивных деталей алгоритмического построения модели среды, привязанной в пространстве к профилю наблюдения.

Точка отражения СИ, расположенная на подошве очередного пласта, является точкой касания линии этой границы и изохроны отражения. Предполагается, что линия границы имеет единственную точку касания с изохроной.

Изохрона отражения – в рамках базовой глубинно-скоростной модели среды – представляет собой эллипс, имеющий фокусы, совпадающие в первом пласте среды с пунктом источника колебаний и пунктом приема. В более глубоком пласте фокусами изохроны являются точки пересечения линии подошвы предшествующего пласта падающим и отраженным лучами.

Кинематические параметры пласта – скорость и время распространения волны от одного фокуса изохроны отражения до другого – однозначно определяют ее вид. Значения этих параметров и координаты наилучшей точки отражения (x_k, z_k) в пласте при данных фокусах изохроны определяются ОАЛ.

Набор наилучших точек отражения, последовательно расположенных на очередной по глубине границе, можно соединить кусочно-линейной кривой с относительно короткими линейными отрезками (трендами). Такая кривая может аппроксимировать с допустимой погрешностью, график границы двух пластов в координатах «глубина – удаление».

Виртуальная сетка локации предназначена для уточнения оценки расположения границы за счет виртуального перемещения по глубине и удалению. Целенаправленно изменяя расположение и параметры сетки локации, можно уточнить оценку координат точки отражения, которая изменяется от десятков до единиц метров. Уточнив оценку координат каждой точки, можно уточнить расположение всей границы.

На рис. 2 изображена схема предварительного расположения виртуальной сетки локации вместе с предполагаемой i -й (не первой) линейной границей, окрашенной в черный цвет. Описание использования сетки локации начинается с построения i -й границы.

Расчет параметров для первой границы осуществляется отдельно по аналитическим выражениям, использующим уравнения общих касательных к парам изохрон первой границы.

Предварительно глубина границы раздела i -го и $(i + 1)$ -го пластов, а также скорость волны в i -м пласте v_i оценивается ОАЛ по нескольким сейсмограммам. Для сокращения времени счета и с учетом предварительного характера оценки она выполняется при использовании данных приблизительно одной третьей части сейсмограмм, полученных на профиле наблюдения.

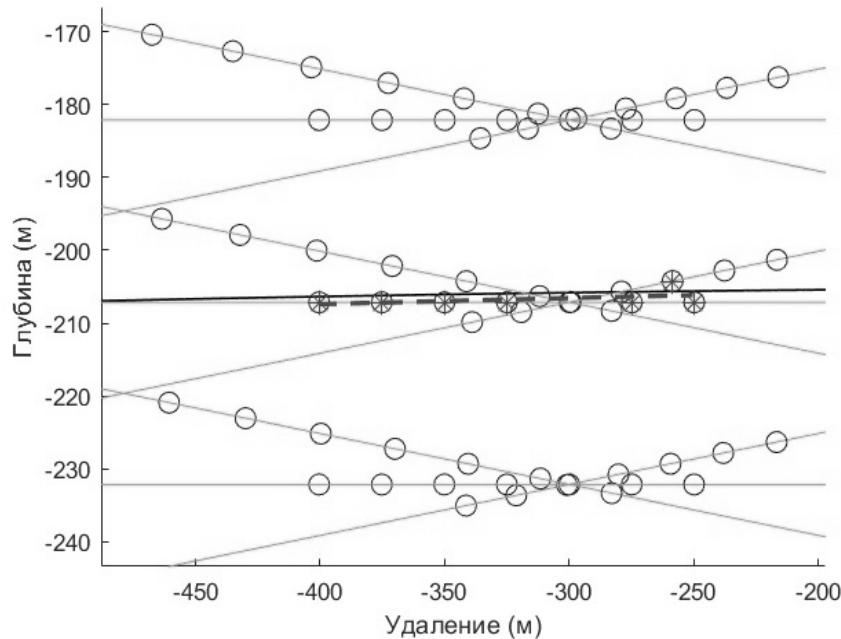


Рис. 2. Схема сетки локации

Fig. 2. The location grid diagram

Для каждой из этих сейсмограмм ОАЛ находит наилучшую начальную границу, которую аппроксимирует полиномом первой степени. Затем с использованием всех найденных таким образом начальных линейных границ строится усредняющая предварительная граница и определяется ее угол наклона.

Сетку локации образуют одинаковые, расположенные вертикально на равном удалении от источника колебаний узлы, в центрах которых сходятся прямые линии, представляющие множество виртуальных касательных к изохроне.

Их наличие предназначено для страховки от пропуска границы виртуальной сеткой в случае использования только одного узла.

Кольцами на схеме изображены полученные ОАЛ наилучшие точки изохрон, лежащие на виртуальных касательных. Кольцами со звездочками внутри показаны лучшие точки отражения от предполагаемой границы, найденные ОАЛ. Отражения от этих точек зарегистрированы соответствующими последовательно расположенными датчиками, образующими группу, состоящую из заданного числа (7), элементов сейсмической цифровой антенной решетки.

Центральный узел виртуальной сетки локации исходно позиционируется на предварительно оцененной глубине. Она задается точкой пересечения усредняющей границы и вертикали, расположенной на половине расстояния L от источника колебаний до первого сейсмоприемника группы. Устанавливаются исходные параметры сетки: это угол наклона предварительной усредняющей

границы (φ_i); расстояние между узлами сетки (40 м); число узлов; угол наклона сетки (0°); угол наклона касательных друг к другу (1°); их число.

После закрепления первой позиции центрального узла сетки начинается целенаправленное изменение расположения и параметров сетки локации для расчета параметров и построения i -й границы.

Через семь точек отражения первой группы проводится аппроксимирующая прямая линия, образующая тренд. Линия изображена на схеме пунктиром (см. рис. 2).

Расчет параметров ведется с первой по последнюю группу, группы располагаются последовательно (возможно, внахлест). По завершении построения вся сейсмическая цифровая антенная решетка будет разбита на группы элементов. Соответствующие тренды образуют кусочно-линейную кривую, которая для получения гладкой линии аппроксимируется по методу наименьших квадратов полиномом высокой степени.

После того как получен полином высокой степени, аппроксимирующий предварительную i -ю границу, выполняются две итерации операции стохастического уточнения ее параметров. Эта операция, повышающая точность измерения линии границы, сходна по смыслу с операцией, на английском языке называемой «dithering», которая заключается в добавлении к входному цифровому сигналу белого шума малой амплитуды. Затем сигнал подвергается стохастической обработке, что позволяет снизить погрешность оценки параметров входного сигнала [21].

Первая «грубая» итерация заключается в N -кратном (N задается) добавлении к предварительной оценке глубины границы белого шума малой амплитуды. На каждом повторении производится N -кратная модификация параметров сетки. Модификация по глубине центрального узла производится прибавлением случайного смещения в диапазоне от $-2,5$ до $2,5$ м. Модификация по остальным параметрам заключается в заданном уменьшении их величины. Каждая модификация заканчивается вычислением тренда путем поиска лучших точек отражения во всех группах. После вычисления всех трендов производится аппроксимация границы по методу наименьших квадратов полиномом высокой степени. Результатом первой итерации являются найденные коэффициенты полинома, описывающего границу.

Вторая «тонкая» итерация заключается в $(3 \times N)$ -кратном добавлении к предварительной оценке глубины границы белого шума малой амплитуды. На каждом повторении производится модификация параметров сетки с трехкратным, по сравнению с первой итерацией, уменьшением величины параметров. Процедура обработки данных на второй итерации операции стохастического уточнения параметров границы повторяет процедуру на первой итерации. Полученный здесь полином представляет окончательную линию i -й границы раздела пластов.

Процедура расчета параметров сетки локации и операция dithering повторяется для построения $(i + 1)$ -й границы и всех более глубоких границ, заканчиваясь на последней обнаруженной границе.

На рис. 3 приведена лучевая диаграмма построения 6-й отражающей границы на фоне схематического изображения сейсмической антенной решетки и остальных менее глубоких границ раздела пластов. Рисунок демонстрирует наличие разных нелинейных границ пластов. Их нелинейность хорошо

заметна при более крупном масштабе изображения. Границы располагаются по глубине нерегулярно и имеют разные углы наклона. В совокупности эти особенности определяют конкретную конфигурацию границ данного фрагмента полевых данных.

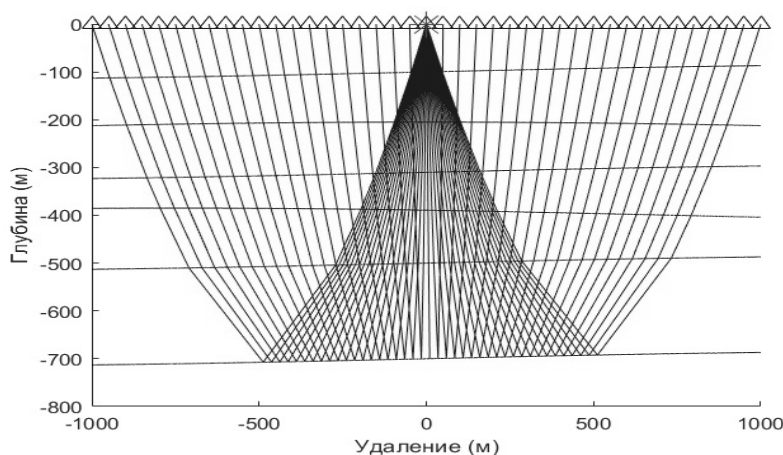


Рис. 3. Лучевая диаграмма построения 6-й отражающей границы

Fig. 3. A ray diagram for constructing the 6th reflecting boundary

Таким образом, процедура расчета, основанная на перемещении виртуальной сетки локации и изменении ее параметров, а также на оценках, выполненных ОАЛ, обеспечивает построение с высокой точностью модели конфигурации глубинных границ раздела пластов среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описано развитие компьютерного подхода [10–13] к надежному и качественному построению глубинно-скоростной модели геологической среды на базе замены решения обратной задачи сейсморазведки на набор оптимизационных решений прямых задач. При этом существенно уменьшаются неоднозначности и ограничения, имеющие место при традиционных способах построения сейсмических изображений, основанных на решении обратной кинематической задачи сейсморазведки.

Также изложена основная идея принципиально новой технологии, которая использует только решения прямой кинематической задачи сейсморазведки.

Цель технологии сейсмической локации заключается в надежном и качественном построении компьютерной глубинно-скоростной модели конфигурации границ раздела пластов геологической среды.

Для достижения этой цели предлагаемая сейсмическая локационная технология применяет идеи следующих радиолокационных методов.

- Квадратурный корреляционный алгоритм для оптимального приема и обнаружения отраженных сейсмических импульсов в условиях шумов и помех.
- Алгоритм одновременно с обнаружением полевых сейсмических данных выполняет их фильтрацию, согласованную с формой образцового

импульса. Существенным преимуществом такой фильтрации является то, что она не искажает частотные составляющие входного сигнала.

- Алгоритм локации годографов со сверхразрешением, работающий на базе сейсмической цифровой антенной решетки, предназначен для повышения точности и разрешающей способности изображения серии годографов волн, отраженных от границ раздела геологических пластов.

- Оптимизационный алгоритм локации обеспечивает высокую точность построения модели конфигурации глубинных границ раздела пластов среды.

Несомненным достоинством компьютерного моделирования является свободная от субъективных решений автоматическая обработка данных.

Областью применения предлагаемой технологии может быть разведка неисследованных районов для выявления потенциальных нефтегазоносных структур, а также для получения информации об уже эксплуатирующихся или подвергнутых гидравлическому разрыву продуктивных пластах.

Применение сейсмической локационной технологии может обеспечить построение более сложных моделей нефтегазовых и иных месторождений. Она может использоваться в условиях взрывной, импульсной и вибрационной сейсморазведки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ампилов Ю.П., Горбачев С.В. Сейсморазведка 4D в России: опыт, проблемы, перспективы // Геология и геофизика. – 2025. – DOI: 10.15372/gig2025112.
2. Determination of weathered layer thickness around the landslide zone using the seismic refraction method / A.I. Hadi, K.S. Brotopuspito, S. Pramumijoyo, H.C. Hardiyatmo // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 830 (1). – P. 012022. – DOI: 10.1088/1755-1315/830/1/012022.
3. Пузырев Н.Н. Интерпретация данных сейсморазведки методом отраженных волн. – М.: Гостоптехиздат, 1959. – 452 с.
4. Многопараметрические обратные задачи теории распространения сейсмических волн / С. Братчиков, К.Г. Гадыльшин, В.И. Костин, Г.В. Решетова, В.А. Чеверда // BalticPetroModel-2022. Петрофизическое моделирование осадочных пород: VI Балтийская научно-практическая конференция, г. Петергоф, 19–21 сентября, 2022 г. – Тверь, 2022. – С. 37–41.
5. Воскресенский М.Н. Инженерные сейсмические изыскания в различных грунтовых условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 5-1. – С. 56–69. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_56.
6. Аппроксимационный нейросетевой метод решения многомерных обратных задач геофизики / М.И. Шимелевич, Е.А. Оборнев, И.Е. Оборнев, Е.А. Родионов // Физика Земли. – 2017. – № 4. – С. 100–109. – DOI: 10.7868/S0002333717040093.
7. Глоговский В.М., Лангман С.Л. Свойства решения обратной кинематической задачи сейсморазведки // Технологии сейсморазведки. – 2009. – № 1. – С. 10–17.
8. Кинематико-динамическое преобразование сейсмической записи для определения скоростного и глубинного строения среды / В.М. Глоговский, В.И. Мешбей, М.И. Цейтлин, С.Л. Лангман // Сборник докладов Второго научного семинара стран – членов СЭВ по нефтяной геофизике. Т. 1. Сейсморазведка. – М., 1982. – С. 327–331.
9. Rabinovich E.V., Filipenko N.Y., Shefel G.S. Generalized model of seismic pulse // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1015. – P. 052025. – DOI: 10.1088/1742-6596/1015/5/052025.
10. Рабинович Е.В. Технология сейсмической локации. 1. Обнаружение сейсмических импульсов и локация их мгновенных фаз // Математические структуры и моделирование. – 2023. – № 2 (66). – С. 38–48. – DOI: 10.24147/2222-8772.2023.2.38-48.
11. Рабинович Е.В. Технология сейсмической локации. 2. Построение серии годографов волн, отраженных от границ сейсмического разреза // Математические структуры и моделирование. – 2023. – № 2 (66). – С. 49–63. – DOI: 10.24147/2222-8772.2023.2.49-63.

12. Рабинович Е.В. Технология сейсмической локации. 3. Построение глубинно-скоростной сейсмической модели геологической среды // Математические структуры и моделирование. – 2023. – № 2 (66). – С. 64–79. – DOI: 10.24147/2222-8772.2023.2.64-79.
13. Rabinovich E.V. Field seismic information representation location technology // 2024 IEEE 3-rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE), Novosibirsk, Russian Federation, 2024. – IEEE, 2024. – P. 740–745. – DOI: 10.1109/PIERE62470.2024.10804945.
14. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
15. Ратынский М.В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. – М.: Радио и связь, 2003. – 200 с.
16. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г. Методы оценивания параметров источников сигналов и помех, принимаемых антенной решеткой. – Н. Новгород: ННГУ, 2007. – 98 с.
17. Capon J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis // Proceedings of the IEEE. – 1969. – Vol. 57 (8). – P. 1408–1418. – DOI: 10.1109/PROC.1969.7278.
18. Оболенцева И.Р. Численные способы решения прямых пространственных задач геотрической сейсмики для многослойных сред с границами произвольной формы // Геология и геофизика. – 1974. – № 9. – С. 113–128.
19. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. – 3-е изд. – М.: Высшая школа, 2009. – 840 с.
20. Урунов А.К. Изучение скоростей в сейсморазведке. – М.: Недра, 1966. – 224 с.
21. Engelberg S. An introduction to dither // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. – 2012. – Vol. 15 (6). – P. 50–54. – DOI: 10.1109/MIM.2012.6365545.

Рабинович Евгений Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – обработка сигналов, нелинейная динамика. Имеет более 135 печатных работ, в том числе более 10 учебных пособий. E-mail: rabinovich@corp.nstu.ru

Rabinovich Evgeniy V., professor at the Department of Computer Science, Novosibirsk State Technical University, D.Sc. (Eng.). His research interests are currently focused on signal processing and nonlinear dynamics. He has more than 135 publications, including 10 tutorials. E-mail: rabinovich@corp.nstu.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2025-2-123-139

A seismic location technology for computer modeling of the configuration of the interface between the layers of the medium*

E.V. RABINOVICH

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

rabinovich@corp.nstu.ru

Abstract

The main modern construction methods of geological medium depth-velocity models are based on different solutions to the inverse kinematic problem of seismic prospecting. Unfortunately, solutions to the inverse problems are ill-posed. There are many algorithms for approximate solutions to the inverse problems. Its application and results comparison show the nonexistence of uniqueness and existence of structural instability of solutions to the inverse problems.

* Received 25 February 2025.

The article presents an original seismic locating technology designed to computer modeling of seismic images with high-resolution and precision. The technology provides an accurate and consistent design of a computer depth-velocity medium model without inverse problems solutions. To eliminate obstacles inherent to traditional seismic images construction approaches, the technology applies radio locating methods ideas.

The technology consequently solves three construction problems of computer models of qualitative seismic images. It begins with qualitative primary processing of field materials obtained with the reflected waves method, and continues with receiving computer images of the processing results. Next, it builds a high-resolution and precision model of the reflected waves hodograph series image. The technology completes with computer modeling of the configuration of the interface between the layers of the medium, linked in space to the observation profile.

The concept of accurate and high-quality design of a computer image of the interface between two layers of the geological environment model is to find a line passing through an optimally selected set of wave reflection points. The seismic location technology uses algorithmic means providing an optimal location and estimation of the best reflecting point where the propagating wave has a minimal travel time.

The virtual locating grid provides the spatial binding to the observation profile. Precision of the binding is achieved by a stochastic modification operation and the use of grid parameters variation.

Keywords: incorrectness of seismic locating kinematic inverse problem solutions, depth-velocity model, location, seismic pulse, instantaneous phase, wave lineup, seismic digital antenna array, super resolution, locating relief, wave hodograph series, optimization locating algorithm, virtual grid

REFERENCES

1. Ampilov Yu.P., Gorbachev S.V. Seismorazvedka 4D v Rossii: opyt, problemy, perspektivy [4D seismic exploration in Russia: experience, problems and prospects]. *Geologiya i geofizika = Geology and Geophysics*, 2025. DOI: 10.15372/gig2025112.
2. Hadi A.I., Brotopuspito K.S., Pramumijoyo S., Hardiyatmo H.C. Determination of weathered layer thickness around the landslide zone using the seismic refraction method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 830 (1), p. 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/830/1/012022.
3. Puzyrev N.N. *Interpretatsiya dannykh seismorazvedki metodom otrazhennykh voln* [Interpretation of seismic data by reflection waves method]. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1959. 452 p.
4. Bratchikov S., Gadylshin K.G., Kostin V.I., Reshetova G.V., Tcheverda V.A. [Multiparameter full waveform inversion]. *BalticPetroModel-2022. Petrofizicheskoe modelirovanie osadochnykh porod* [BalticPetroModel-2022. Petrophysical modeling of sedimentary rocks]. Proceedings of the VI Baltic Scientific and Practical Conference, Peterhof, September 19–21, 2022, pp. 37–41. (In Russian).
5. Voskresenskiy M.N. Inzhenernye seismicheskie izyskaniya v razlichnykh gruntovykh usloviyakh [Engineering seismic surveys in various soil conditions]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2022, no. 5-1, pp. 56–69.
6. Shimelevich M.I., Osborne E.A., Osborne I.E., Rodionov E.A. Approksimatsionnyi neirosetevoi metod resheniya mnogomernykh obratnykh zadach geofiziki [The neural network approximation method for solving multidimensional nonlinear inverse problems of geophysics]. *Fizika Zemli = Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2017, no. 4, pp. 100–109. DOI: 10.7868/S0002333717040093 (In Russian).
7. Glogovskii V.M., Langman S.L. Svoistva resheniya obratnoi kinematicheskoi zadachi seismorazvedki [Properties of the solution of the inverse kinematic seismic problem]. *Tekhnologii seismorazvedki = Seismic Technologies*, 2009, no. 1, pp. 10–17.
8. Glogovskii V.M., Meshbei V.I., Tseitlin M.I., Langman S.L. [Kinematic-dynamic transformation of seismic recording for determining the velocity and depth structure of the medium]. *Sbornik dokladov Vtorogo nauchnogo seminaru stran – chlenov SEV po neftyanoi geofizike. T. 1. Seismorazvedka* [Collected papers of the second scientific seminar of the CMEA member countries on oil geophysics. Vol. 1. Seismic prospecting]. Moscow, 1982, pp. 327–331. (In Russian).

9. Rabinovich E.V., Filipenko N.Y., Shefel G.S. Generalized model of seismic pulse. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1015, p. 052025. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/5/052025.
10. Rabinovich E.V. Tekhnologiya seismicheskoi lokatsii. 1. Obnaruzhenie seismicheskikh impul'sov i lokatsiya ikh mgnovennykh faz [Seismic location technology. I. The detection of seismic impulses and location of their instantaneous phases]. *Matematicheskie struktury i modelirovanie = Mathematical Structures and Modeling*, 2023, no. 2 (66), pp. 38–48. DOI: 10.24147/2222-8772.2023.2.38-48.
11. Rabinovich E.V. Tekhnologiya seismicheskoi lokatsii. 2. Postroenie serii godografov voln, otrazhennykh ot granits seismicheskogo razreza [Seismic location technology. II. The construction of a series of hodographs reflected from the boundaries of the seismic cross-section of waves]. *Matematicheskie struktury i modelirovanie = Mathematical Structures and Modeling*, 2023, no. 2 (66), pp. 49–63. DOI: 10.24147/2222-8772.2023.2.49-63.
12. Rabinovich E.V. Tekhnologiya seismicheskoi lokatsii. 3. Postroenie serii godografov voln, otrazhennykh ot granits seismicheskogo razreza [Seismic location technology. III. Construction of a depth-velocity seismic model of the geological medium]. *Matematicheskie struktury i modelirovanie = Mathematical Structures and Modeling*, 2023, no. 2 (66), pp. 64–79. DOI: 10.24147/2222-8772.2023.2.49-63.
13. Rabinovich E.V. Field seismic information representation location technology. *2024 IEEE 3-rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE)*, Novosibirsk, Russian Federation, 2024, pp. 740–745. DOI: 10.1109/PIERE62470.2024.10804945.
14. Tikhonov V.I. *Optimal'nyi priem signalov* [Optimum signal reception]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1983. 320 p.
15. Ratynskii M.V. *Adaptatsiya i sverkhrazreshenie v antennoykh reshetkakh* [Adaptation and super-resolution in antenna arrays]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2003. 200 p.
16. Ermolaev V.T., Flaksman A.G. *Metody otsenivaniya parametrov istochnikov signalov i pomekh, prinyaemykh antennoy reshetkoi* [Methods for estimating the parameters of signal sources and interference received by the antenna array]. Nizhny Novgorod, NNGU Publ., 2007. 98 p.
17. Capon J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. *Proceedings of the IEEE*, 1969, vol. 57 (8), pp. 1408–1418. DOI: 10.1109/PROC.1969.7278.
18. Obolentseva I.R. Chislennyye sposoby resheniya pryamykh prostranstvennykh zadach geometricheskoi seismiki dlya mnogoslownykh sred s granitsami proizvol'noi formy [Numerical methods of solution of direct three-dimensional problems of geometrical seismics for multi-layered media with arbitrary shape boundaries]. *Geologiya i geofizika = Geology and Geophysics*, 1974, no. 9, pp. 113–128.
19. Verzhbitskii V.M. *Osnovy chislennykh metodov* [Fundamentals of numerical methods]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2009. 840 p.
20. Urupov A.K. *Izuchenie skorostei v seismorazvedke* [Seismic velocity studies]. Moscow, Nedra Publ., 1966. 224 p.
21. Engelberg S. An introduction to dither. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2012, vol. 15 (6), pp. 50–54. DOI: 10.1109/MIM.2012.6365545.

Для цитирования:

Рабинович Е.В. Сейсмическая локационная технология компьютерного моделирования конфигурации границ раздела пластов среды // Системы анализа и обработки данных. – 2025. – № 2 (98). – С. 123–139. – DOI: 10.17212/2782-2001-2025-2-123-139.

For citation:

Rabinovich E.V. Seismicheskaya lokatsionnaya tekhnologiya komp'yuternogo modelirovaniya konfiguratsii granits razdela plastov sredy [A seismic location technology for computer modeling of the configuration of the interface between the layers of the medium]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2025, no. 2 (98), pp. 123–139. DOI: 10.17212/2782-2001-2025-2-123-139.