Научная статья

УДК 550.8.05
DOI 10.25205/1818-7900-2025-23-1-19-32

Разработка программного модуля быстрого прослеживания границ в сейсмическом кубе с использованием алгоритма волновой трассировки

Александр Александрович Власов[1,2]
Никита Сергеевич Романов[1]

[1]Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

[2]Институт автоматики и электрометрии СО РАН
Новосибирск, Россия

a.vlasov7@g.nsu.ru
n.romanov1@g.nsu.ru

Аннотация

Для оценки месторождений полезных ископаемых и определения потенциальных зон для бурения по данным сейсморазведки необходимо построить согласованную сейсмостратиграфическую модель. Построение такой модели производится в несколько этапов: полевые работы, первичная обработка данных, расчет трансформированных сигналов и интерпретация. Согласованность результатов интерпретации достигается за счет соблюдения основных стратиграфических принципов. В работе рассмотрены два подхода автоматизации определения отражающих горизонтов в сейсмических кубах с учетом априорной информации на основе алгоритма волновой трассировки. Отличительной особенностью предложенного решения является: скорость работы, малая доля последовательного исполнения, устойчивость решения, учет ограничений, выставленных пользователем, соблюдение двух стратиграфических принципов (первичной горизонтальности и суперпозиции). В тестовом сейсмическом кубе размером 27951 трасс, с размерностью 200 измерений с двумя заданными пользователем границами, выполнено прослеживание горизонтов за 12 секунд с использованием двойного объема оперативной памяти от размера обрабатываемых данных. Разработанный подход не решает задачу выделения разломов, но способен учитывать их наличие за счет существующей возможности задания фиксированных границ, прослеженных пользователем в качестве аргумента функции.

Ключевые слова

сейсморазведка, отражающие горизонты, стратиграфические границы, функция взаимной корреляции, автоматизация процесса, алгоритм волновой трассировки

Для цитирования

Власов А. А., Романов Н. С. Разработка программного модуля быстрого прослеживания границ в сейсмическом кубе с использованием алгоритма волновой трассировки // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2025. Т. 23, № 1. С. 19–32. DOI 10.25205/1818-7900-2025-23-1-19-32

© Власов А. А., Романов Н. С., 2025

Development of a Software Module for Fast Tracing of Horizons in a Seismic Cube Ua Lee Algorithm

Alexander A. Vlasov[1,2], Nikita S. Romanov[1]

[1]Novosibirsk State University,
Novosibirsk, Russian Federation

[2]Institute of Automation and Electrometry SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

a.vlasov7@g.nsu.ru
n.romanov1@g.nsu.ru

Abstract

For the assessment of mineral deposits and the identification of potential drilling zones using seismic data, it is necessary to build a consistent seismic stratigraphic model. The construction of such a model is carried out in several stages: fieldwork, initial data processing, calculation of transformed signals, and interpretation. Consistency in the interpretation results is achieved by adhering to fundamental stratigraphic principles. This work considers two approaches to automating the identification of reflection horizons in seismic cubes, considering prior information based on Lee algorithm. A distinctive feature of the proposed solution is its speed, low proportion of sequential execution, solution stability, consideration of constraints set by the user, and adherence to two stratigraphic principles (original horizontality and superposition). In a test seismic cube with 27951 traces, comprising 200 measurements with two user-defined horizons, the tracing of horizons was completed in 12 seconds using double the amount of RAM compared to the size of the processed data. The developed approach does not solve the problem of fault detection but can take their presence into account due to the ability to set fixed borders tracked by the user as function argument.

Keywords

Seismic exploration, reflection horizons, stratigraphic boundaries, mutual correlation function, process automation, Lee algorithm

For citation

Vlasov A. A., Romanov N. S. Development of a software module for fast tracing of horizons in a seismic cube using Lee algorithm *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2025, vol. 23, no. 1, pp. 19–32 (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7900-2025-23-1-19-32

Введение

Анализ сейсмических данных позволяет обнаружить перспективные зоны для бурения в процессе разведки залежей углеводородов. Такой подход основан на отражении сейсмических волн от границ слоев с разными акустическими свойствами (отражающих горизонтов). Изучая время прохождения через слои и амплитуду отраженных волн, можно получить информацию о составе и структуре земной коры до 20 км в глубину. Данный метод получил название – сейсмостратиграфия [1]. Можно выделить три этапа проведения сейсмостратиграфического исследования [2]:

1) полевые работы – установка датчиков и источников акустических волн, регистрация сейсмических сигналов;

2) первичная обработка данных – фильтрация шумов, выравнивание амплитуд, коррекция временных задержек и расчет набора трансформированных сигналов;

3) интерпретация – стратиграфическая привязка, корреляция отражающих горизонтов, построение глубинно-скоростных моделей (ГСМ) и т. д.

В рамках данной работы рассматривается автоматизация этапа интерпретации, а именно определение отражающих горизонтов в трехмерном сейсмическом кубе.

В текущих реалиях вручную интерпретация не ведется. Существует ряд автоматических и полуавтоматических проприетарных инструментов, автоматизирующих некоторые шаги интерпретации, например HorizonCube – инструмент от компании dGB Earth Sciences [3]. Тем

не менее доля необходимого ручного труда и редактирования, необходимого для построения модели, согласно стратиграфическим принципам, остается обязанностью эксперта и занимает существенную часть времени. Интерпретация трехмерных сейсмических данных может занимать много времени и давать недетерминированные результаты, так как обработка данных выполняется в условиях большой неопределенности, ввиду чего два эксперта, работая независимо, неизменно получат существенно различающиеся результаты. Машинное обучение не так давно вошло в данную область и уже способно автоматизировать часть рутинных задач эксперта (например, выделение разломов, построение ГСМ), хотя и имеет ряд своих проблем: необходимость большого количества данных для обучения моделей; проблема объяснимости полученного решения; уникальность каждого отдельно взятого геологического объекта, что неизменно может приводить к получению несогласованных моделей [4; 5].

На стадии интерпретации важно добиться согласованности полученной модели, чтобы снизить риски, связанные с инвестициями в будущий проект, путем более достоверной оценки условий освоения месторождения и объема извлекаемых полезных ископаемых [6]. Согласованность достигается за счет учета как можно большего числа стратиграфических принципов. Стратиграфия – это наука, которая фокусируется на исследовании структуры осадочных образований, их возраста и условий формирования [7]. Любые исследования в области стратиграфии подчиняются 5 основным принципам (правилам осадконакопления) [8; 9]:

- принцип первичной горизонтальности (англ. original horizontality) – слои осадочных горных пород изначально осаждаются в виде горизонтальных слоев;
- принцип суперпозиции (англ. superposition) – в ненарушенной стратиграфической последовательности осадочные слои располагаются в порядке от самых старых внизу к самым молодым вверху;
- принцип включений (англ. inclusions) – если один геологический объект (например, минерал или фрагмент породы) содержится внутри другого объекта, то включение старше, чем сама порода, в которой оно находится;
- принцип пересечения (англ. cross-cutting relationship) – геологический объект, который пересекает или нарушает другой объект (например, разлом или инъекционная порода), является более молодым, чем тот объект, который он пересекает;
- принцип преемственности фаунистических сообществ (англ. faunal succession) – существует последовательность, в которой организмы развивались по отношению к геологическому времени, а значит, наличие определенных ископаемых может помочь установить возраст этих слоев.

Задача интерпретации относится к типу обратных задач, ввиду чего существует некоторое множество возможных решений [10; 11]. В ходе анализа специалист оценивает сигналы рядом стоящих трасс, имеющих похожие сигналы. Одна и та же порода будет иметь одинаковые по амплитуде сигналы, но также одинаковые сигналы могут иметь и разные модели (объекты исследования). Эксперт в области интерпретации сейсмических данных учитывает все стратиграфические принципы, свое субъективное мнение и накопленный опыт при построении модели, чтобы получить как можно более правдоподобное решение и более точно определить модель, по которой построен геологический объект. Разработанные алгоритмы, представленные в данной работе, автоматизируют процесс построения согласованной сейсмостратиграфической модели, учитывая некоторые из этих правил. Существует ряд сложностей устройства геологических объектов, частично вытекающих из описанных принципов – наличие нарушений сплошности горных пород, так называемых разломов и прочие факторы неоднородности [5]. Описанный подход соблюдает принцип первичной горизонтальности и принцип суперпозиции, но не берет во внимание остальные правила и не решает задачу детектирования разломов, хотя эта проблема является открытой и важной для решения практических задач истолкования сейсмических сигналов. Принцип преемственности фаунистических сообществ не поддается автоматизации ввиду отсутствия необходимой информации. Несмотря на такие ограничения

со стороны алгоритмов, пользователь способен передать обнаруженные им разломы (опорные границы) в виде аргументов функции обработки. Такая априорная информация будет учтена и модель будет построена в соответствии с заданными пользователем ограничениями, что приведет к исключению множества недостоверных решений с точки зрения эксперта (интерпретатора).

В основе разработанного подхода лежат использование корреляционного планшета (аналог планшета Жековского, только вместо каротажных данных – сейсмические) и алгоритмы стратиграфической корреляции разрезов скважин (выделение наиболее похожих областей двух сигналов), основанные на вычислении квадрата расстояния между двумя функциями, в качестве функции метрики [12]. Данный подход хорошо показал себя на двумерных данных, но чаще всего при построении сейсмостратиграфических моделей необходимо строить трехмерные модели, ввиду чего появляется больше данных и трудностей интерпретации.

В рамках данной работы предполагается разработка алгоритма, который позволяет на основании априорной информации производить автокорреляцию трехмерных сейсмических трасс и выделять отражающие горизонты подповерхностного слоя. Для определения степени похожести пары близлежащих трасс рассматриваются их относительные сдвиги по времени, благодаря чему можно получить матрицу похожести точек одной трассы на другую и, при помощи волнового алгоритма трассировки, найти значения корреляции между этой парой трасс. Полученный результат должен быть детерминирован и легко объясним. Как было указано ранее, предложенный подход не подразумевает решения проблемы детектирования разломов.

Цель работы – автоматизировать процесс прослеживания (взаимозаменяемый термин – трассировки) отражающих горизонтов в трехмерных сейсмических данных на основе априорной информации и ограничений, выставленных пользователем, соблюдая два стратиграфических принципа (первичной горизонтальности и суперпозиции), применяя корреляционный планшет, волновой алгоритм и алгоритм динамической трансформации временной шкалы (DTW) в ходе попарной корреляции сейсмических трасс.

Для достижения данной цели были пройдены следующие этапы:

1. Разработка функции взаимной корреляции, учитывающей априорно заданные отражающие горизонты и указанные принципы стратиграфии, используя алгоритм DTW.
2. Разработка алгоритма волновой трассировки для поиска пути в матрице корреляции.
3. Разработка функции построения графа корреляции в сейсмическом кубе, где вершины – трассы, а ребра – отображения из одной трассы в другую.
4. Реализация построения остовного дерева с оставлением ребер между максимально похожими друг на друга трассами.
5. Внедрение разработанных алгоритмов в программный комплекс W-SEIS для визуализации результатов и отладки.

1. Метод построения корреляционной модели

Автокорреляция пары трасс (скважин) осуществляется путем сравнения двух сейсмических кривых: для любой пары значений сейсмических трасс, $xi \in x$ и $yj \in y$, вычисляется специальная двумерная функция, характеризующая степень различия пары сигналов. Их похожесть рассматривается в особых «окнах», установленных в каждом из этих сигналов, где размер окна задается параметром – r_idx (размер окна равен $2*r_idx + 1$). В качестве функции оценки похожести пары сейсмических сигналов была выбрана функция свертки: $fij=i,j = -r_idxr_idxxiyj$, где xi, $i \in [0, h1)$, $yj \in [0, h2)$, $h1$ и $h2$ – глубины залегания сигнала первой трассы и второй. Преимущество указанной функции в том, что она может быть быстро вычислена на процессоре с помощью векторных инструкций. В конце производится нормализация значения с сохранением знака: $res = sgn(f)*fn$. Чем больше значение, тем более похожи участки сигналов.

Расчет функции свертки (*res*) имеет смысл только для пар похожих по форме отрезков сейсмической кривой, и близлежащие трассы, как правило, имеют очень похожие формы сигналов с некоторым временным смещением, а значит, применять формулу *res* на паре соседних трасс можно, если рассчитывать *res* в ограниченном диапазоне индексов (окне). Размер этого окна задается параметром *max_shift*. На расстоянии, не превышающим *max_shift* между индексами *i* и *j*, производится расчет функции *res*.

Таким образом, производится перебор всех значений *xi* и *yj* в заданном интервале, получаем для них значения различия. Имеем матрицу, где каждому сигналу первой трассы противопоставлен сигнал второй трассы и для каждой такой пары рассчитана мера различия. Такая матрица похожа на планшет Жековского, только вместо каротажных данных – сейсмические [13]. Также в терминологии DTW, в англоязычных статьях распространено название cost matrix [14; 15]. Далее эта матрица будет называться *корреляционный планшет*. Такое представление позволяет рассмотреть прямые, соединяющие сигналы двух трасс на разных глубинах и оценить похожесть сигналов. На рис. 1 представлен пример вычисленного корреляционного планшета для пары сейсмических трасс разного размера с прослеженной корреляционной линией.

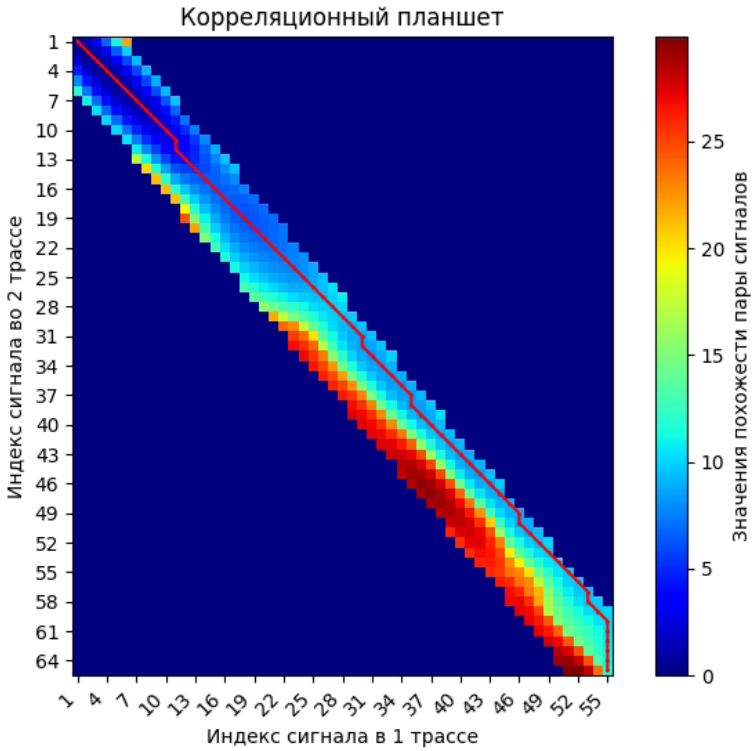

Рис. 1. Корреляционный планшет с прослеженной корреляционной линией. Чем меньше значения, тем более похожи два сигнала
Fig. 1. Correlation tablet with traced correlation line. The smaller the values, the more similar the two signals are

Далее необходимо получить корреляционную модель. Корреляционная модель – это набор точек матрицы (пары координат *x* и *y*), образующих кривую, соединяющую два угла корреляционного планшета. В нашем случае не допускается возможность пересечения границ подповерхностных слоев – соблюдаются два правила осадконакопления (принцип первичной горизонтальности и принцип суперпозиции). Точки кривой выбираются таким образом, чтобы различия между сравниваемыми скважинами были минимальны. Задача сводится к нахожде-

нию кратчайшего пути, для чего используется волновой алгоритм Ли [16]. Результатом работы алгоритма является кривая, точки которой представляют оптимальное отображение точек одной глубины первой сейсмической кривой к точкам второй. По таким отображениям производится совмещение пары скважин и трассировка стратиграфических границ.

Алгоритм Ли чувствителен к отрицательным значениям во взвешенном графе, поэтому прежде чем его применить, необходимо произвести нормализацию значений в корреляционном планшете. Пусть *max_val* – максимальное значение похожести среди всех положительных значений в матрице; минимальное положительное число, если положительных значений нет. Нормализуем все значения матрицы: *cur_val[i][j] = max_val - cur_val[i][j] + 1ϵ-100*. Таким образом, получаем, что минимальные значения матрицы отражают наибольшую похожесть пары сигналов; отрицательные сигналы отсутствуют, что дает возможность использовать волновой алгоритм; поиск минимального пути покажет отображения одной трассы на другую.

На рис. 2 изображено соответствие сигналов пары сейсмических кривых в более простом для восприятия человеком пространстве.

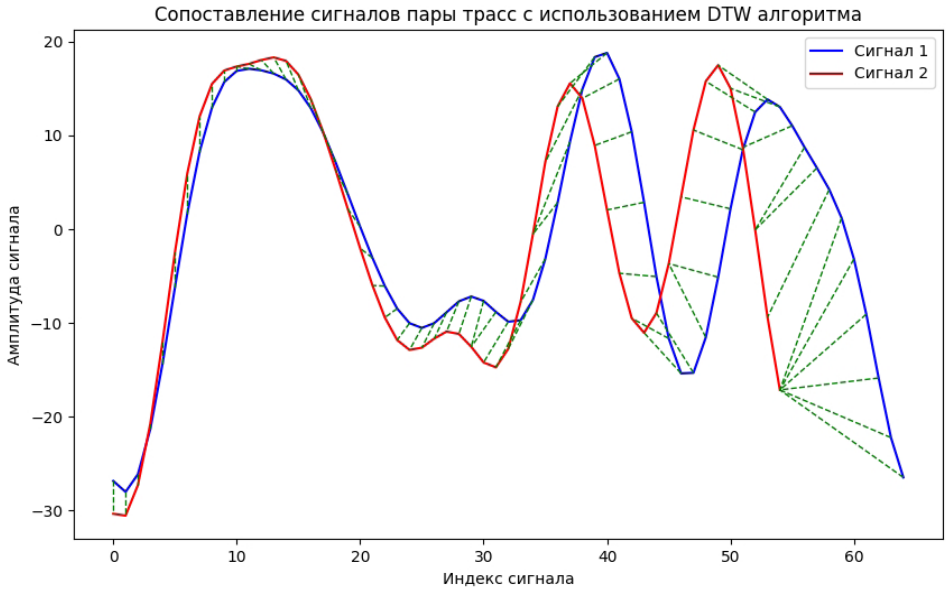

Рис. 2. Сопоставление сигналов пары трасс разной длины
с использованием алгоритма трансформации временной шкалы
Fig. 2. Comparison of signals of pair seismic traces with different size
using the DTW algorithm

Теперь можно получить величину различия двух сейсмических кривых следующим образом: *diff = min_pathpath_length - max_val,* где *min_path* – длина наименьшего пути, а *path_length* – число точек в кратчайшем пути.

Корреляционная модель, полученная вышеописанным методом, неустойчива. Всегда будет существовать некоторый набор кривых, разных по форме, но очень близких по значениям меры различия [11]. Если внести даже несущественные корректировки во входные параметры алгоритма, результат прослеживания может получиться совершенно другой, и эксперт может быть с ним не согласен. Поэтому в разработанные алгоритмы была добавлена возможность ручной фиксации отражающих горизонтов путем передачи соответствующего параметра. Этот параметр заставляет волновой алгоритм Ли проходить через некоторые точки (ручное задание весов), даже если они не считаются оптимальными.

Временная сложность описанного алгоритма равна *O((M2*(2*r_idx-1)+M2)*((n-1)*m+(m-1)*n))*, где M – максимальный размер сейсмической кривой (число сигналов), *n* –

число трасс вдоль оси *x*, *m* – число трасс вдоль оси *y*. Первый множитель описывает процесс автокорреляции пары трасс и состоит из времени, затрачиваемого на расчет операции свертки для каждой пары сигналов двух трасс (в худшем случае – когда $max_shift \geq M$) и второго слагаемого – поиск пути при помощи волнового алгоритма. Второй множитель появился ввиду того, что операция автокорреляции выполняется столько раз, сколько пар сейсмических кривых будет подвергнуто корреляции.

Пространственная сложность: $O(N*M+((n-1)*m+(m-1)*n)*2M)$, где $N*M$ – сигналы для всех трасс, $(n-1)*m+(m-1)*n$ – число ребер (пар сейсмических трасс), 2M – отображение каждого сигнала первой трассы на каждый сигнал второй и обратно.

2. Метод прослеживания отражающих горизонтов

Описанный ранее метод применяется попарно на всех трассах, находящихся не далее одного индекса. В итоге получаем граф, где каждая вершина представляет собой одну сейсмическую кривую и связана ребрами с соседями. Ребро хранит информацию о похожести (*diff*) и все отображения точек одного сигнала на второй и обратно.

Для прослеживания стратиграфических границ необходимо обойти все вершины полученного графа и назначить всем глубинам свой индекс границы так, чтобы получилось много непрерывных плоскостей. В текущей реализации на расположение индексов границ в одной трассе влияет от 2 до 4 ее соседей, соответственно, столько же и ребер. Выбор того ребра, по которому будет определяться конечное множество плоскостей, должно исходить из соображений выбора пары наиболее похожих друг на друга сейсмических сигналов. И чтобы осуществить такой обход, исходный граф приводится к виду минимального остовного дерева, т. е. выбирается минимальное числа ребер с минимальным возможным весом так, чтобы можно было обойти все вершины графа. Для этого применяется алгоритм Прима [17]. Опорная точка, с которой будет осуществляться обход дерева, задается как параметр алгоритма.

На рис. 3 представлен результат работы алгоритма построения остовного дерева на сейсмическом кубе с размерностью 200 трасс.

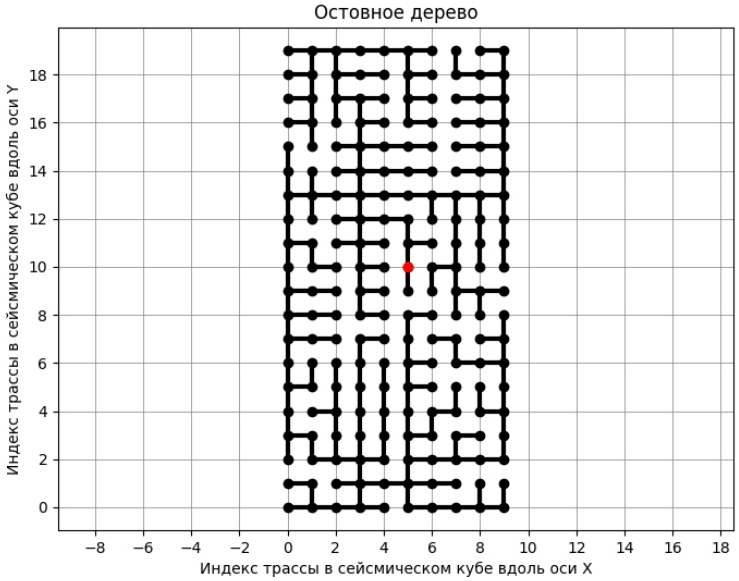

Рис. 3. Остовное дерево в сейсмическом кубе на 200 трасс.
Красным выделена опорная трасса. Глубина дерева – 38
Fig. 3. Spanning tree in a seismic cube with 200 traces.
The reference trace is highlighted in red. The depth of the tree is 38

На сейсмическом кубе, размером 27951, при выбранной в центре опорной трассе, глубина дерева достигает 1102.

Далее осуществляется обход в глубину в полученном минимальном остовном дереве, начиная с заданной в качестве аргумента опорной трассы. Определять отражающие горизонты можно разными способами, но общий принцип один: сигналам опорной трассы назначаются некоторые номера границ, например, минимальные номера обозначают самые молодые границы, а наибольшие – самые древние по времени геологического формирования. Также можно задавать через параметры алгоритма толщину этих границ (количество сигналов, которыми будет обозначена одна граница) и промежутки между парой соседних границ. Далее, на каждом шаге алгоритма, происходит распространение этих номеров границ на соседние трассы (для каждого сигнала каждой трассы известно, куда его необходимо отображать на соседней трассе), основываясь на результатах полученной ранее корреляционной модели.

В результате будет получено множество поверхностей, каждая из которых представляет собой выделенную стратиграфическую границу.

Асимптотическая сложность прослеживания отражающих горизонтов, когда корреляционная модель уже построена: $O(E+VlogV+n*m*M)$, где E и V – количество ребер и вершин в исходной корреляционной модели соответственно; $E+VlogV$ – построение остовного дерева; $n*m*M$ – трассировка отражающих горизонтов, заполнение поверхностей.

3. Внедрение разработанного подхода в программный комплекс интерпретации сейсмических и скважинных данных W-SEIS

Разработанные алгоритмы были интегрированы в программный комплекс интерпретации сейсмических и скважинных данных W-SEIS, а конкретно, в модуль Desmana (модуль, предназначенный для работы с сейсмическими данными) [18]. В качестве тестового сейсмического куба использовался куб размером 27951 (231 * 121) трасс и двумя отражающими горизонтами, прослеженными экспертом.

На рис. 4 изображен пользовательский интерфейс для задания параметров, таких как выбор подхода корреляции, размер диагонали в корреляционном планшете, выбор сейсмического куба, выбор зафиксированных границ, задание глубинных индексов и пр. и запуска разработанного алгоритма. Также ряд параметров для настройки работы алгоритмов был вынесен в отдельный конфигурационный файл, изображенный на рис. 5. Он позволяет задать размер выбранного подмножества трасс из всего куба, опорную трассу, размер границы и отступ между границами для визуализации и радиус фиксации точки.

Осуществлено прослеживание стратиграфических границ на рабочей станции с процессором AMD Ryzen 7 4800H и оперативной памятью 16 Гб с заданными в виде аргументов ограничениями – пара прослеженных пользователем границ, между которыми проводилось исследование; размер диагонали в корреляционном планшете, равный 5 индексам; расстояние между заданными границами в 200 сигналов; опорная точка выбрана в центре сейсмического куба. Такой эксперимент на указанной рабочей станции занимает 12 секунд. На рис. 6 показан результат прослеживания границ при помощи описанного алгоритма в Desmana.

Нетрудно заметить, что изначально поверхность отражающего горизонта прослеживается корректно (если наблюдать изменение из левого края, где была расположена опорная точка, а значит, и точка начала обхода дерева), и это происходит до тех пор, пока производится попарная корреляция тех трасс, которые изображены на рис. 6 (трасс вдоль видимой прямой), но так как в остовном дереве ребра не обязательно будут находиться вдоль одной прямой, решение может пройти существенную часть куба, прежде чем оказаться в соседней трассе этой прямой. В результате этого процесса возникает ошибка, которая сначала выражается в виде смещенных

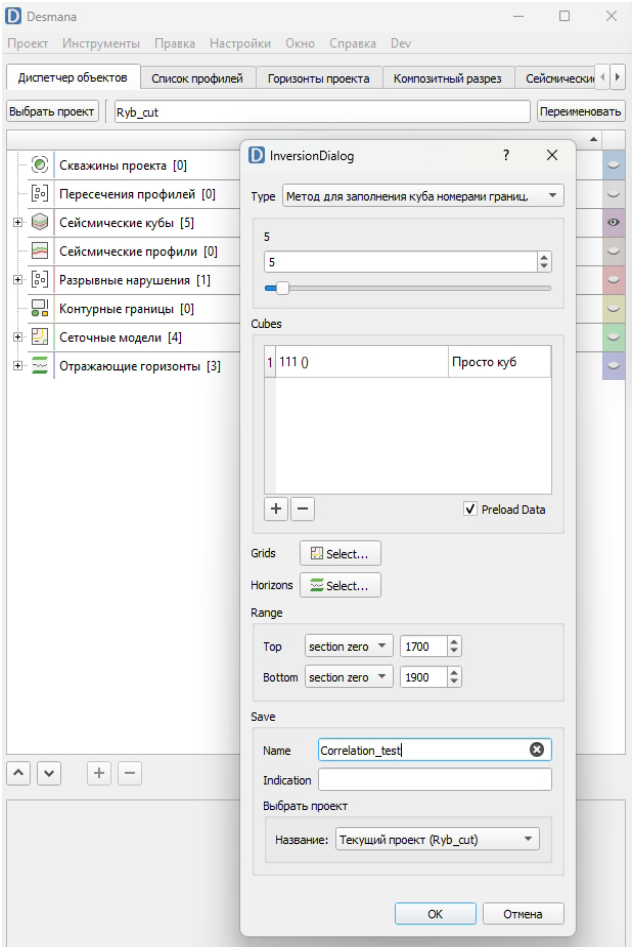

Рис. 4. Тестовый интерфейс для отладки плагина в Desmana
Fig. 4. Test plugin interface for debugging implementation in Desmana

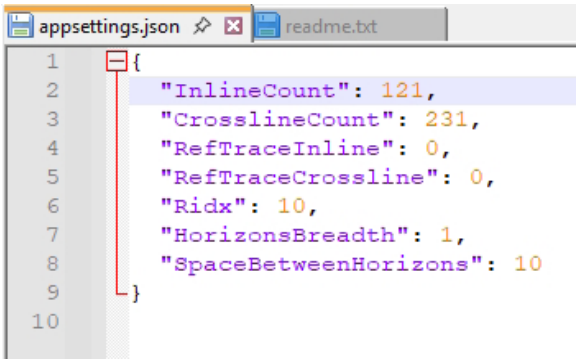

Рис. 5. Параметры, задаваемые через конфигурационный файл: InlineCount – число трасс вдоль оси *x*; CrosslineCount – число трас вдоль оси *y*; RefTraceInline/Crossline – координаты опорной трассы; Ridx – радиус фиксации точки; HorizonsBreadth – размер границы; SpaceBetweenHorizons – количество индексов между парой ближайших границ на опорной трассе
Fig. 5. Arguments set through the configuration file: InlineCount is the number of traces along the *x*-axis; CrosslineCount is the number of traces along the *y*-axis; RefTraceInline/Crossline is coordinates of the reference trace; Ridx is a radius of point fixation; HorizonsBreadth is a size of the borders; SpaceBetweenHorizons is a number of indexes between the pair of nearest borders on the reference trace

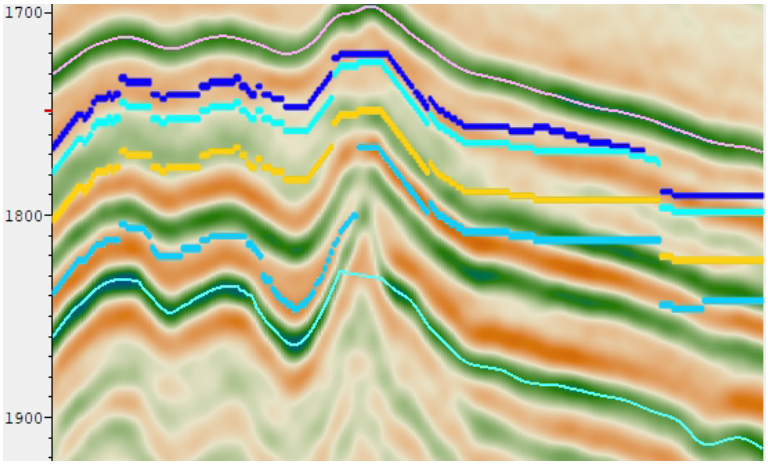

Рис. 6. Визуализация прослеженных поверхностей методом построения остовного дерева, отражающих стратиграфические границы. Самая верхняя и нижняя границы заданы пользователем
Fig. 6. Visualization of traced surfaces using the minimum spanning tree method, reflecting stratigraphic boundaries. The uppermost and lowermost boundaries are defined by the user

индексов отражающих горизонтов, а затем все больше нарастает и вовсе перестает отражать закономерности устройства исследуемого объекта.

Становится ясно, что для достижения устойчивого и согласованного результата необходимо опираться не только на результат корреляции пары соседних трасс, но и на предыдущие результаты корреляции.

Чтобы побороться с этой проблемой, был опробован иной способ прослеживания отражающих горизонтов.

4. Метод прослеживания отражающих горизонтов, основанный на корреляции с опорной трассой

Для поддержания согласованности модели было решено произвести корреляцию опорной трассы со всеми остальными в соответствии с описанным методом построения корреляционной модели. На основании полученной модели уже можно произвести трассировку отражающих горизонтов, без необходимости построения остовного дерева.

Далее, действуя по общему принципу прослеживания границ, назначаем номера границ различным точкам на опорной сейсмической кривой, а дальше обходим каждую вершину графа по ребру, которое исходит из опорной вершины и дает представление об отображении каждой точки опорной прямой на выбранную. Таким образом протягиваются номера границ из опорной трассы на все остальные и снова получаются поверхности отражающих горизонтов.

Алгоритм был опробован на указанной ранее рабочей станции, исполнение заняло 7,5 секунды. Результат работы такого подхода изображен на рис. 7. На рисунке можно заметить, что принцип первичной горизонтальности и принцип суперпозиции не нарушаются и соблюдаются закономерности устройства исследуемого объекта. Такое решение обратной задачи можно считать корректным, если не брать во внимание остальные факторы и ограничения.

Недостатком данного подхода является игнорирование зависимостей каждой выбранной сейсмической трассы с ее соседями, по сути игнорирование априорного знания о гладкости границ, что иногда приводит к резким «скачкам» кривой, отражающей границу.

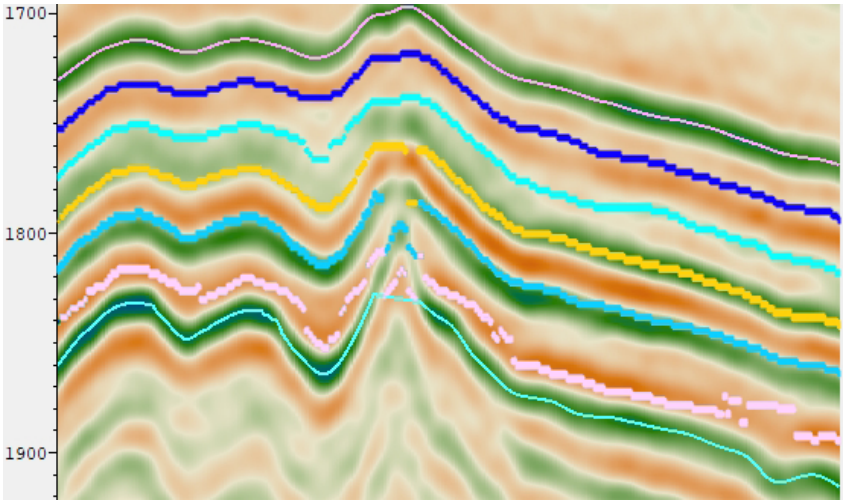

Рис. 7. Визуализация прослеженных поверхностей, отражающих стратиграфические границы, методом корреляции всех трасс с опорной. Самая верхняя и нижняя границы заданы пользователем
Fig. 7. Visualization of traced surfaces reflecting stratigraphic boundaries by correlating all trails with a reference one. The uppermost and lowermost boundaries are defined by the user

Асимптотическая сложность такого подхода значительно меньше в сравнении с попарной корреляцией соседей, так как здесь мы сравниваем только опорную трассу со всеми остальными: $O((M2*(2*r_idx-1)+M2)*(m*n))$.

Выводы

В настоящее время изложенный подход реализован в двух вариантах и интегрирован в программный комплекс W-SEIS, модуль Desmana в виде dll-плагина. Оба алгоритма хорошо распараллеливаются и могут быть эффективно исполнены на многоядерных архитектурах вычислительных устройств, например возможна реализация отдельного специализированного вычислительного модуля на основе FPGA, что позволит еще на один или два порядка ускорить вычисления и решать задачу для пользователя в интерактивном режиме. Второй алгоритм исполняется на 60 % быстрее в сравнении с первым и может быть использован экспертом для получения модели, учитывающей принцип первичной горизонтальности и суперпозиции, сохраняя закономерности устройства исследуемого объекта, но важно понимать, что на выбор решения не влияют соседние сейсмические кривые, а значит, эксперту необходимо будет проверить и существенно дополнить полученную модель, приняв во внимание взаимное влияние соседних трасс для повышения согласованности модели. Первый алгоритм в текущем виде требует доработки и не может быть использован для решения реальных задач ввиду сильно разрастающейся ошибки.

Предложенные подходы опираются на два стратиграфических принципа при составлении модели, ввиду чего данное решение является, скорее, вспомогательным инструментом для эксперта. Полезность второго алгоритма в том, что существует возможность задания фиксированных точек (границ), которые будут учтены при построении модели, что позволяет ускорить работу эксперта, предлагая ему множество возможных решений, которые ему необходимо проанализировать.

Дальнейшее развитие идей, описанных в этой работе, следует направить на разработку третьего алгоритма, который включит в себя две идеи, описанные здесь: учет влияния соседних трасс на общее решение и сверка результатов с предыдущими шагами, выбор опорных то-

чек для борьбы с разрастающейся ошибкой. Также для увеличения согласованности получаемых моделей можно рассматривать влияние трасс-соседей не только вдоль двух координатных осей, но и в некоторых пространственных трансформациях, что могло бы поспособствовать учету принципа включений и принципа пересечений.

Список литературы

1. **Симм Р., Бэкон М.** Амплитуда сейсмических колебаний: руководство для переводчика. Кембридж; Нью-Йорк: Изд-во Кембридж. ун-та, 2014.
2. **Мондол Н. Х.** Сейсморазведка // Petroleum Geoscience. 2010. С. 375–402. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-02332-3_17.
3. **Де Гроот П.** Глобальные методы интерпретации сейсмических данных достигают совершеннолетия // Расширенные тезисы ASEG, декабрь 2013. Т. 2013. № 1. С. 1−4. Doi: https://doi.org/10.1071/aseg2013ab331.
4. **Гэн З., Ву Х., Ши Ю., Фомел С.** Оценка относительного геологического времени с использованием глубокой сверточной нейронной сети, август 2019 г., Doi: https://doi.org/10.1190/segam2019-3214459.1.
5. **Вэй Х.-Л. и др.** Обнаружение сейсмических разломов с использованием сверточных нейронных сетей с потерей фокуса // Компьютеры и науки о земле. 2022. Т. 158. С. 104968, Doi: https://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104968.
6. **Де Гроот П., Хак А., де Брюин Г., Хемстра Н., Бедфорд Дж.** Куб горизонта: пошаговое изменение в интерпретации сейсмических данных // The Leading Edge. 2010. Т. 29, № 9. С. 1048−1055, Doi: https://doi.org/10.1190/1.3485765.
7. **Эдуардо.** Стратиграфия: эволюция концепции. Springer eBooks, 2006, с. 3−19, doi: https://doi.org/10.1007/1-4020-2763-x_1.
8. **Кравиц Дж.** Геоисторическая стрела времени: от стратиграфических принципов Стено к гипотезе Больцмана о прошлом // Journal of Geoscience Education. 2014. Vol. 62, № 4. P. 691−700, doi: https://doi.org/10.5408/13-107.1.
9. **Маклеод Н.** Принципы стратиграфии. Нанкинский университет, 2005.
10. **Лапковский В., Истомин А., Конторович В., Бердов В.** Корреляция каротажных данных скважин как многомерная задача оптимизации // Философия и физика. 2015. Т. 56, № 3, Doi: https://doi.org/10.15372/gig20150309.
11. **Ланда Э., Трейтель С.** Сейсмическая инверсия: что это такое и чем она не является // The Leading Edge. 2016. Т. 35, № 3. С. 277−279, doi: https://doi.org/10.1190/tle35030277.1.
12. **Лапковский В. В.** Непрерывная сейсмостратиграфическая модель как основа структурной интерпретации разрезов МОГТ // Технологии сейсморазведки. 2012. № 4. С. 33−39.
13. **Лапковский В. В., Шмелев Н. Е., Лунев Б. В.** Составное изображение скважины по данным каротажа: технология создания и применения // Нефтегазовая геология, Теория и практика. 2018. Т. 13, № 2, doi: https://doi.org/10.17353/2070-5379/11_2018.
14. Динамическое искривление времени. Поиск информации по музыке и движению, 2007. С. 69−84, 2007, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-540-74048-3_4.
15. **Херрманн М., Чанг Вэй Тан, Уэбб Г. И.** Параметризация функции затрат при динамическом искажении времени применительно к классификации временных рядов // Интеллектуальный анализ данных и обнаружение знаний. 2023. Т. 37, № 5. С. 2024−2045, doi: https://doi.org/10.1007/s10618-023-00926-8.
16. **Ли С. Ю.** Алгоритм для соединения путей и его приложения // IRE Transactions on Electronic Computers. 1961, EC-10 (3). С. 346−365.
17. **Петти С., Рамачандран В.** Алгоритм оптимального минимального остовного дерева // Журнал ACM. 2002. Т. 49, № 1. С. 16−34.

18. **Канаков М. С., Лапковский В. В., Конторович В. А., Канакова К. И., Шорохов Ю. С.** Программное обеспечение для интерпретации данных сейсморазведки и бурения скважин W-SEIS // Российский журнал геофизических технологий. 2022. № 2. С. 77–91, doi: https://doi.org/10.18303/2619-1563-2022-2-77.

References

1. **Simm R., Bacon M.** Seismic amplitude: an interpreter's handbook. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2014.
2. **Mondol N. H.** Seismic Exploration, Petroleum Geoscience, 2010, pp. 375–402, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-02332-3_17.
3. **De Groot P.,** Global Seismic Interpretation Techniques Are Coming of Age. ASEG Extended Abstracts, Dec. 2013, vol. 2013, no. 1, pp. 1–4, doi: https://doi.org/10.1071/aseg2013ab331.
4. **Geng Z., Wu X., Shi Y., Fomel S.,** Relative geologic time estimation using a deep convolutional neural network, Aug. 2019, doi: https://doi.org/10.1190/segam2019-3214459.1.
5. **Wei X.-L.** et al. Seismic fault detection using convolutional neural networks with focal loss. *Computers & Geosciences*, Jan. 2022, vol. 158, p. 104968, doi: https://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104968.
6. **De Groot P., Huck A., de Bruin G., Hemstra N., Bedford J.** The horizon cube: A step change in seismic interpretation! *The Leading Edge*, Sep. 2010, vol. 29, no. 9, pp. 1048–1055, doi: https://doi.org/10.1190/1.3485765.
7. **Eduardo.** Stratigraphy: Evolution of a Concept, Springer eBooks, Aug. 2006, pp. 3–19, doi: https://doi.org/10.1007/1-4020-2763-x_1.
8. **Kravitz G.** The Geohistorical Time Arrow: From Steno's Stratigraphic Principles to Boltzmann's Past Hypothesis. *Journal of Geoscience Education*, 2014, vol. 62, no. 4, pp. 691–700, doi: https://doi.org/10.5408/13-107.1.
9. **MacLeod N.** Principles of stratigraphy. Nanjing University, 2005.
10. **Lapkovsky V, Istomin A., Kontorovich V., Berdov V.** CORRELATION OF WELL LOGS AS A MULTIDIMENSIONAL OPTIMIZATION PROBLEM. *Геология и геофизика*, 2015, vol. 56, no. 3, doi: https://doi.org/10.15372/gig20150309.
11. **Landa E., Treitel S.** Seismic inversion: What it is, and what it is not. *The Leading Edge*, Mar. 2016, vol. 35, no. 3, pp. 277–279, doi: https://doi.org/10.1190/tle35030277.1.
12. **Lapkovsky V. V.** Continuous seismostratigraphic model as the basis for the structural interpretation of MOGT sections // Seismic Exploration Technologies, No. 4, pp. 33–39, Jan. 2012. (in Russ.)
13. **Lapkovsky V. V., Shmelev N. E., Lunev B. V.** Composite well image from log data: technology of creation and application. *Neftegazovaya Geologiya Teoriya I Praktika*, Jan. 2018, vol. 13, no. 2, doi: https://doi.org/10.17353/2070-5379/11_2018.
14. Dynamic Time Warping. Information Retrieval for Music and Motion, pp. 69–84, 2007, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-540-74048-3_4.
15. **Herrmann M., Chang Wei Tan, Webb G. I.** Parameterizing the cost function of dynamic time warping with application to time series classification. *Data Mining and Knowledge Discovery*, Apr. 2023, vol. 37, no. 5, pp. 2024–2045, doi: https://doi.org/10.1007/s10618-023-00926-8.
16. **Lee C. Y.** An Algorithm for Path Connections and Its Applications, IRE Transactions on Electronic Computers, 1961, EC-10 (3), pp. 346–365.
17. **Pettie S., Ramachandran V.** An optimal minimum spanning tree algorithm. *Journal of the ACM*, Jan. 2002, vol. 49, no. 1, pp. 16–34.

18. **Kanakov M. S., Lapkovsky V. V., Kontorovich V. A., Kanakova K. I., Shorohov Y. S.** W-SEIS interpretation software for seismic and well drilling data. *Russian Journal of geophysical technologies*, Dec. 2022, no. 2, pp. 77–91, doi: https://doi.org/10.18303/2619-1563-2022-2-77.

Информация об авторах

Власов Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент Новосибирского государственного университета, инженер Института автоматики и электрометрии СО РАН

Романов Никита Сергеевич, магистрант

Information about the Authors

Alexander A. Vlasov, Ph.D., Associate Professor – Novosibirsk State University, Engineer – Institute of Automation and Electrometry SB RAS

Nikita S. Romanov, Master's Student

Статья поступила в редакцию 19.02.2025;
одобрена после рецензирования 14.03.2025; принята к публикации 14.03.2025

The article was submitted 19.02.2025;
approved after reviewing 14.03.2025; accepted for publication 14.03.2025