



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 189 за 2018 г.



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Васекин Б.В., [Попов С.Б.](#)

Применение метода
Semblance в пассивной
сейсмоакустике при
мониторинге нефтегазовых
месторождений

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Васекин Б.В., Попов С.Б. Применение метода Semblance в пассивной сейсмоакустике при мониторинге нефтегазовых месторождений // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 189. 36 с. doi:[10.20948/prepr-2018-189](https://doi.org/10.20948/prepr-2018-189)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-189>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

Б.В. Васекин, С.Б. Попов

**Применение метода *Semblance* в пассивной
сейсмоакустике при мониторинге
нефтегазовых месторождений**

Москва — 2018

Васекин Б.В., Попов С.Б.

Применение метода *Semblance* в пассивной сейсмоакустике при мониторинге нефтегазовых месторождений

В работе рассмотрена задача выявления и локализации подземных источников акустической эмиссии (АЭ) на основе пассивных сейсмоакустических методов при мониторинге разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений. Рассмотрены особенности применения сейсмической эмиссионной томографии, основанной на когерентной оценке *Semblance*. Описан алгоритм локализации источников АЭ, включая метод трассировки акустических лучей (“bending”). Предложен ряд алгоритмических улучшений, позволяющих существенно сократить время расчетов и повысить точность локализации. Приведены результаты тестовых модельных расчетов, демонстрирующие влияние качества скоростной модели среды и апертуры поверхностной сейсмической антенны на точность локализации. В том числе приводятся и обсуждаются результаты расчетов при большом количестве удаленных источников эмиссии. Делается вывод о перспективности рассмотренного метода для решения задач мониторинга месторождений в реальном времени, в частности шельфовых.

При подготовке работы использовалась вычислительная система МВС—100К в МСЦ РАН.

Ключевые слова: математическое моделирование, нефтегазовые месторождения, эмиссионная томография, трассировка акустических лучей, когерентная оценка, шельф, мониторинг в реальном времени.

Vasekin, Boris V., Popov, Sergey B.

The application of the method of "Semblance" in passive seismic for monitoring oil and gas fields

The paper deals with the identification and localization of underground sources of acoustic emission (AE) on the basis of passive seismic methods for monitoring the development and operation of oil and gas fields. There are considered some peculiarities of application of seismic emission tomography based on coherent assessment of the *Semblance*. The algorithm of localization of AE sources, including the tracing of acoustic rays (“bending”), is described. There is proposed optimization algorithm for the tracing and of the outlined methods to improve the accuracy of the localization. The results of the test of model calculations demonstrate the effect of the quality of the velocity model of the medium and the surface seismic antenna aperture on the localization accuracy. In particular, the results of calculations of the problem of localization of a large number of remote emission sources are presented and discussed. The conclusion is made about the prospects of the considered method for solving the problems of real-time monitoring of deposits, in particular, off-shores.

Key words: mathematical simulation, oil and gas fields, emission tomography, seismic ray tracing, coherent assessment, off-shore deposits, real-time monitoring.

1. Введение

В последнее время в нефтегазовой отрасли большое внимание уделяется развитию пассивных сейсмических методов и их применению на месторождениях полезных ископаемых. Преимуществами использования этих методов являются меньшие, по сравнению с активными методами, затраты на оборудование, экологическая чистота и возможность наблюдения естественных процессов в среде в режиме реального времени.

Метод пассивной акустоэмиссии является мощным средством, позволяющим получить дополнительную информацию о различных процессах, происходящих на месторождении, и может быть применен как для осуществления мониторинга межскважинного пространства в процессе эксплуатации месторождения, так и в процессе разработки для динамического определения положения бурового инструмента (в целях его навигации). В частности, типичные условия разработки на шельфе (такие как амплитуда принятого сигнала, низкий уровень техногенных шумов, физические свойства породы) позволяют применять данный метод в решении актуальных задач разработки шельфовых месторождений.

В настоящее время с целью оптимизации добычи и управления разработкой месторождения создаются «интеллектуальные месторождения», позволяющие в режиме реального времени собирать обрабатывать необходимую для автоматического принятия решений информацию. В этой связи методы пассивного сейсмического мониторинга способны создать основу технологии оперативного контроля околоскважинного пространства.

Существует развитая система методов пассивного сейсмического мониторинга среды, которая позволяет работать с источниками излучения небольшой мощности (существенно меньше микроземлетрясений) (см., например, [1-6]), при которой используются не скважинные, а поверхностные многоканальные системы наблюдений – системы записи сейсмических шумов, в которых число датчиков может достигать нескольких сотен. При использовании таких систем становится возможным отслеживать пространственно-временную динамику изменений пластовых процессов и выявлять неоднородности строения среды: области повышенной трещиноватости, крупномасштабные трещины, производить мониторинг движения бурового инструмента в процессе бурения, отслеживать миграцию флюидов в процессе эксплуатации скважин, выявлять параметры трещин, возникающих при техногенном воздействии на среду, например, при гидроразрыве пласта и т.д.

Заметим, что на континентальной поверхности на спектральные характеристики зарегистрированных сейсмических сигналов оказывают влияние множественные шумовые источники: промышленная деятельность человека, транспорт, погодный фронт и др.

В малонаселенных районах, удалённых от промышленных центров, уровень технологических шумов очевидно ниже. Например, как показывают

многочисленные исследования [3], в районах Северного Ледовитого океана уровень шума существенно ниже, что позволяет в этих районах более эффективно проводить сейсмический мониторинг.

Задача определения положения источника акустического шума является обратной задачей сейсмологии. Алгоритмы решения подобных задач базируются в основном на данных о временах прихода определённых сейсмических фаз, при этом определение времён прихода шумовых сигналов является самостоятельной прямой задачей. В результате решения таких задач определяются значения неизвестных координат источников и их параметров, таких как амплитуда, акустический спектр, тип источника и др.

Среди существующих методов решения подобных задач наиболее развитыми являются методы, основанные на корреляционной обработке многоканальных сейсмических записей, и методы, основанные на расчёте когерентных оценок.

К первому классу методов относится описанный, например, в [4] метод локации, в котором в заданной скоростной модели среды производится варьирование координаты источника, чтобы достигнуть необходимого соответствия вычисленных и записанных на датчиках данных. Использование алгоритмов корреляционной обработки записей позволяет не только локализовать источники шумового излучения, но и оценить направление прихода сигнала, отследить плоские волны. Также корреляционная обработка позволяет оценить корректность работы отдельных датчиков в приёмной группе.

В настоящее время быстродействие является одним из ключевых требований к методам и алгоритмам, решающим задачи локализации. От большинства систем мониторинга месторождения требуется передавать результаты расчётов в режиме реального времени. Существенным недостатком корреляционных методов является большой объём вычислений, который растёт пропорционально квадрату числа датчиков. В больших приёмных группах (от нескольких сотен датчиков) этот недостаток сильно сказывается на общем быстродействии системы. Однако полностью отказываться от возможностей корреляционного анализа нецелесообразно. Анализ можно применять, например, для проверки корректности работы элементов приёмной группы.

Альтернативой методу локации для решения задачи локализации можно считать метод сейсмической эмиссионной томографии, предложенный Танером и Келлером [7], основанный на когерентной оценке *Semblance*. В этом методе рассматривается величина $S(\mathbf{p})$, физический смысл которой состоит в оценке отношения мощности сигнала к мощности сигнала в плоскости приёмников – датчиков:

$$S(\mathbf{p}) = \frac{\sum_{j=1}^T \left[\sum_{i=1}^K x_i(t_j - \tau_i(\mathbf{p})) \right]^2}{\sum_{j=1}^T \left[\sum_{i=1}^K x_i^2(t_j - \tau_i(\mathbf{p})) \right]}. \quad (1)$$

Здесь $x_i(t_j)$ – значение принимаемого сигнала на i -м датчике группы в момент t_j , $\tau_i(\mathbf{p})$ – временная задержка сигнала, излучаемого из точки опроса \mathbf{p} , K – число приёмных каналов, T – число независимых временных отсчётов.

Исследование статистики оценки Semblance [1, 8] показало, что в случае случайной гауссовой некоррелированной между каналами помехи, распределение интенсивности в изображении является равномерным, а среднее и дисперсия описываются формулами:

$$\langle S \rangle = 1 \text{ и } \sigma^2 \approx \frac{2}{T} \left(1 - \frac{1}{K} \right).$$

Наличие локализованного источника излучения приводит к появлению в изображении яркого пятна, положение которого совпадает с положением источника, а яркость пропорциональна мощности излучения. Для слабых сигналов:

$$\langle S \rangle = 1 + K\gamma,$$

где γ – энергетическое отношение сигнал/помеха.

Согласно формуле дисперсии величина флуктуаций когерентной квадратичной меры в точках, отличных от положения источника, уменьшается с увеличением времени накапливания сигнала, т.е. увеличение времени накапливания ведёт к увеличению чувствительности метода. Это позволяет оценить порог детектирования:

$$\delta_{\lambda=0} = 2\sigma \approx 2\sqrt{2/T}.$$

Критерий присутствия источника эмиссионного излучения в среде (с вероятностью 95%) – превышение абсолютным значением S в точке опроса значений для волнового поля, представленного случайной диффузной помехой:

$$|S - 1| \geq \delta_{\lambda=0}.$$

Отсюда следует, что использование оценки Semblance позволяет определить возможное расположение источников акустической эмиссии в рассматриваемой области. В отличие от методов, основанных на корреляционном анализе, рассматриваемый подход с оценкой Semblance требует существенно меньшего количества вычислений. Этот факт играет важную роль при построении системы мониторинга в режиме реального времени.

Если волновое поле является смесью нескольких типов акустических волн (продольные, поперечные и др. – см. Приложение), то при построении

изображения среды в выбранном типе волн остальные типы волн являются помехами: кроме изображений реальных источников выбранного типа, на изображения среды будут наложены ложные расфокусированные и смещённые изображения источников остальных типов волн. Датчики в (1) предполагаются однокомпонентными (одноканальными), а обработка записей ведётся, ориентируясь на скорость продольной волны. Заметим, что при использовании более сложных и дорогих трехкомпонентных датчиков (с соответствующей модификацией (1)), можно достаточно эффективно подавлять помехи, связанные с приходом нескольких типов волн. За счёт проекции данных на направления поляризации соответствующего типа волн в точках приёма удастся оптимально использовать энергию сигнала в полезном типе волн и отфильтровывать волны с другой поляризацией. При анализе объёмных волн с помощью трехкомпонентных датчиков изображения строятся для продольных волн (P) и двух компонент поперечных волн (SH и SV).

Использование оценки Semblance (1) в задаче локализации источников акустической эмиссии (АЭ) используют многие авторы. Например, И.Я. Чеботарева в [1, 2] показала успешное применение данного метода для решения ряда задач мониторинга месторождений, а в [9] данный метод используется для определения очагов землетрясений.

В настоящей работе будут рассмотрены вопросы разрешимости и влияния погрешности входных данных, а также некоторые алгоритмические особенности данного метода при решении прикладных задач. Будет рассмотрен также ряд алгоритмических улучшений, позволяющий существенно сократить время расчётов и эффективно использовать имеющуюся в сейсмических записях информацию.

2. Составляющие алгоритма локализации источников

Рассматриваемый алгоритм локализации, основанный на оценке Semblance, можно условно разделить на несколько составляющих частей – этапов:

- этап трассировки сейсмических сигналов,
- этап обработки сейсмических записей, заключающийся в последовательной обработке записей выделенного временного интервала (временного окна) с целью определения по когерентным составляющим сигнала координат источника АЭ.

Можно также выделить этапы предобработки и постобработки результатов.

2.1. Алгоритм трассировки «bending» и его оптимизация

Перед анализом сейсмических записей необходимо определить временные задержки $\tau_i(\mathbf{p})$ от точки опроса \mathbf{p} до i -го датчика группы – это делает алгоритм «трассировки» сейсмических лучей. Точки опроса при этом принадлежат области сканирования, которая выбрана заранее и, вообще говоря, может быть

произвольной. При необходимости более подробного исследования некоторых областей (например, вблизи траектории скважины), там следует поместить больше точек опроса. Для алгоритма трассировки исходными данными являются скорости распространения сигнала в пласте – должна быть задана так называемая скоростная модель среды.

В настоящей работе при расчетах $\tau_i(\mathbf{p})$ используется алгоритм трассировки «bending» [10]. Алгоритм «bending» может применяться как в случае задания градиентной скоростной модели среды, так и в случае слоистой модели среды. Градиентная модель определяется через соотношения, связывающие скорость распространения сигнала в точке породы с координатой этой точки. Слоистая модель среды определяется на геометрической сетке, в ячейках которой задаются различные параметры среды, тем самым задавая необходимые характеристики на целом слое или ряде слоёв сетки. В этом варианте задания среды точность ограничена размером ячеек сетки.

В алгоритме «bending» последовательно уточняется траектория прохождения луча от выбранной точки опроса до выбранного датчика в соответствии с заданной скоростной моделью среды.

При этом минимизируется функционал времени прохождения сейсмического луча между выбранными точками:

$$F(N) = \sum_{i=1}^N \frac{dl_i}{V_i} \rightarrow \min ,$$

здесь dl_i – участок траектории, V_i – скорость среды на этом участке (определяемая из скоростной модели среды), N – число интервалов в траектории.

Траектория прохождения сейсмического луча от точки опроса до i -го датчика разбивается на $N = 2^n$ интервалов (n – целое число, последовательно принимающее значения 1, 2, ...). Концы интервалов внутри области являются опорными точками. В качестве начального приближения траектории можно выбрать прямой отрезок, соединяющий точку опроса с выбранным датчиком. Этот отрезок разбивается подвижной опорной точкой на два интервала на первой итерации алгоритма трассировки ($n = 1$).

В алгоритме «bending» происходит перемещение каждой подвижной опорной точки в плоскости, параллельной дневной поверхности, и из всех возможных её положений выбирается то, при котором время прохождения сигнала вдоль получившейся ломаной меньше. На рис. 1, показан пример второй итерации ($n = 2$).

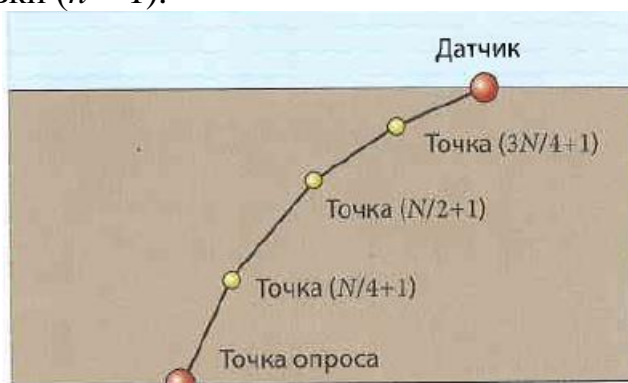


Рис. 1. Вторая итерация алгоритма «bending». Показаны опорные точки.

Далее к получившейся траектории добавляются новые подвижные точки, и процесс последовательно повторяется для всех получившихся точек траектории. Расчёт останавливается, например, когда число интервалов разбиений траектории достигает заданной величины N .

Поиск оптимальной позиции каждой подвижной точки связан с полным перебором её положений в плоскости и выбором из них оптимального (время прохождения луча по этой траектории будет минимальным). Если по каждому направлению число возможных положений подвижной точки равно M , то общее число операций составит порядка:

$$(1 + 3 + 7 + 15 + \dots + (2^n - 1)) \times M^2.$$

При больших значениях n и M расчёт каждой траектории занимает существенное время. Несколько сократить число итераций можно, если для каждых новых подвижных точек проводить поиск в области меньшей, чем для предыдущих, то есть поиск для первой точки проводить по всей плоскости, на второй итерации (три подвижные точки) проводить на четверти плоскости и так далее. В результате такой организации счета получим следующую оценку для общего числа итераций:

$$\left(1 + \frac{3}{4} + \frac{7}{16} + \frac{15}{64} + \dots + \frac{2^n - 1}{2^{2n-2}}\right) \times M^2,$$

что существенно меньше, чем без такой оптимизации.

Заметим, что расчёт временных задержек $\tau_i(\mathbf{p})$ производится значительно реже расчёта самой локализации, и для фиксированной скоростной модели выполняется всего один раз перед мониторингом. Однако в некоторых случаях в процессе мониторинга скоростную модель среды необходимо уточнять (корректировать) для повышения достоверности локализации – в таком случае следует производить перерасчёт временных задержек (делать «перетрассировку»). Ниже в работе приведён пример одного из расчётов, показывающий влияние неточностей в задании скоростной модели на работу алгоритма локализации источников АЭ.

В реальных расчётах число точек опроса, где требуется искать источники, может достигать нескольких миллионов, что требует значительных вычислительных мощностей. При разработке параллельных алгоритмов для решения задачи трассировки сейсмических лучей возникают некоторые трудности: несмотря на то что точки опроса определены, траектория луча между точками заранее неизвестна, поэтому каждый из параллельных процессов вынужден иметь доступ к информации о скорости во всей области расчёта. Поэтому при написании параллельного алгоритма трассировки следует по возможности использовать механизмы с общей памятью.

2.2. Выбор размера окна

На этапе локализации источников шума происходит последовательная обработка части микросейсмических записей текущего временного интервала –

временного окна. Как правило, одновременно обрабатываются данные только одного окна, а результатом расчёта является ответ на вопрос о наличии источника в данной точке опроса в рассматриваемом окне времени.

Актуальной является проблема выбора размера окна. При слишком большом размере временного окна в нем могут оказаться записи многих источников шума. Поскольку вклад каждого отдельного источника в общую энергию сигнала тем меньше, чем больше источников, локализовать сигнал из большого временного окна оказывается затруднительным. Наоборот, выбрав слишком маленькое временное окно, мы рискуем не получить достаточное для выделения источника количество информации, а также получить ложные источники из чисто шумовых данных. При идеальном разбиении исходных данных в одном окне должен содержаться один источник, в этом случае эффективность алгоритмов поиска будет максимальной. В условиях сильной зашумленности ситуация ещё сильнее усугубляется, поскольку шум вносит дополнительную энергию в принимаемый сигнал. Трудность выбора размера окна также связана с тем фактом, что длительность сигнала, испускаемого источником, различна для разных частот. Ниже проблема выбора временного окна рассмотрена подробнее.

2.3. Предобработка сейсмических данных

Перед непосредственным использованием алгоритмов локализации, необходимо провести **предобработку** записанных сейсмических данных. При избыточной дискретизации принимаемого сигнала производится его передискретизация, которая применяется к входным записям для уменьшения числа отчётов в рассматриваемом временном окне и сокращения времени расчёта. В расчётах для фильтрации частот рабочего диапазона используется спектральный фильтр, реализованный с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье. Частотная фильтрация производится только для полезных частот рабочего диапазона $[f_{\min}, f_{\max}]$. Затем происходит нормировка сигналов на датчиках: она производится по среднеквадратичному уровню

сигнала $\tilde{A} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_i^K x_i(t)}$, где $x_i(t)$ – сигнал, принятый i -ым датчиком, K – общее

число датчиков в системе.

Поскольку при вычислениях $S(\rho)$ используются заранее определённые точки опроса, то естественно проводить распараллеливание расчета по данному набору точек. Каждому процессу соответствует определённая часть точек опроса, которую он рассчитывает независимо от остальных.

2.4. Выбор размеров ячеек сетки и расстояний между датчиками

Основные характеристики используемых алгоритмов связаны с характерным масштабом, равным минимальной длине акустической волны, $\lambda = V / f_{\max}$, где V – скорость распространения сигнала в среде, f_{\max} –

максимальная частота принимаемого сигнала. Согласно [12], расстояние между точками опроса должно быть порядка этой величины, а минимальное расстояние между приёмниками должно быть порядка 2λ . Таким образом, при поиске источников с высокой частотой (малой длиной волны) требуется использовать большее количество точек опроса. Кроме того, с величиной λ связана точность локализации – на практике точность локализации 2λ считается приемлемой.

3. Тестовые расчёты на примере единственного источника

В дальнейших тестовых расчётах для задания формы сигнала на каждом источнике используется соотношение

$$x_S(t) = A_S \cdot \sin(2\pi f \cdot t) \cdot \exp(-2\pi\beta f \cdot t).$$

Прошедший через породу сигнал регистрируется на датчике с номером i в виде

$$x_i(t) = \left[\left[\frac{1}{R_i(\mathbf{p})} \cdot x_S(\Delta t) \right]^F \exp(-\alpha R_i(\mathbf{p})) \right]^{-F} + e_i(A, t), \quad (2)$$

где $\Delta t = t - \tau_i(\mathbf{p})$, A_S – начальная амплитуда источника; $R_i(\mathbf{p})$ – расстояние, пройденное от места возникновения сигнала до датчика с номером i , $\tau_i(\mathbf{p})$ – время задержки прихода сигнала от источника АЭ в точке \mathbf{p} до i -го датчика, β – коэффициент затухания сигнала на источнике, $\alpha = \frac{\pi}{Q\lambda}$ – коэффициент затухания сигнала в среде, Q – добротность породы, $\lambda = V / f$ – длина волны, V – скорость распространения сигнала в породе, f – частота источника; $e_i(A, t)$ – функция наложения шума; операторы $[]^F, []^{-F}$ обозначают переход в Фурье пространство и обратно.

3.1. Влияние расположения приёмной антенны относительно источника шума

Результат работы алгоритма локализации зависит от взаимного расположения приёмной антенны и источника сейсмической эмиссии. Для примера рассмотрим следующую двумерную (X,Z) постановку задачи:

- размер области (X,Z) равен 4000 м x 4000 м,
- скорость распространения сигнала в среде, $V = 4000$ м/с,
- поглощение и затухание сигнала в среде отсутствуют ($\alpha = 0$);
- амплитуда источника, $A_S = 1$; частота источника, $f = 12$ Гц;
- коэффициент затухания сигнала на источнике, $\beta = 1,0$;
- отношение сигнал/шум, $SNR = 1/3$.

Пусть приёмная антенная группа состоит из 16 датчиков, равномерно расположенных на поверхности в диапазоне координат по оси OX: 1400 м ÷ 2600 м. Апертура антенны (линейный размер принимающей сигнал

поверхности антенны) в этом случае равна 1200 м. Расстояние между датчиками 75 м.

Используется регулярное распределение точек опроса в области (X,Z): по каждой оси равномерно расположены 50 точек, расстояние между точками равно 80 м.

Рассмотрим результаты расчётов для двух вариантов взаимного расположения источника и приёмной группы:

- источник непосредственно под приёмной группой (см. рис. 2);
- источник сбоку от приёмной группы (см. рис. 3).

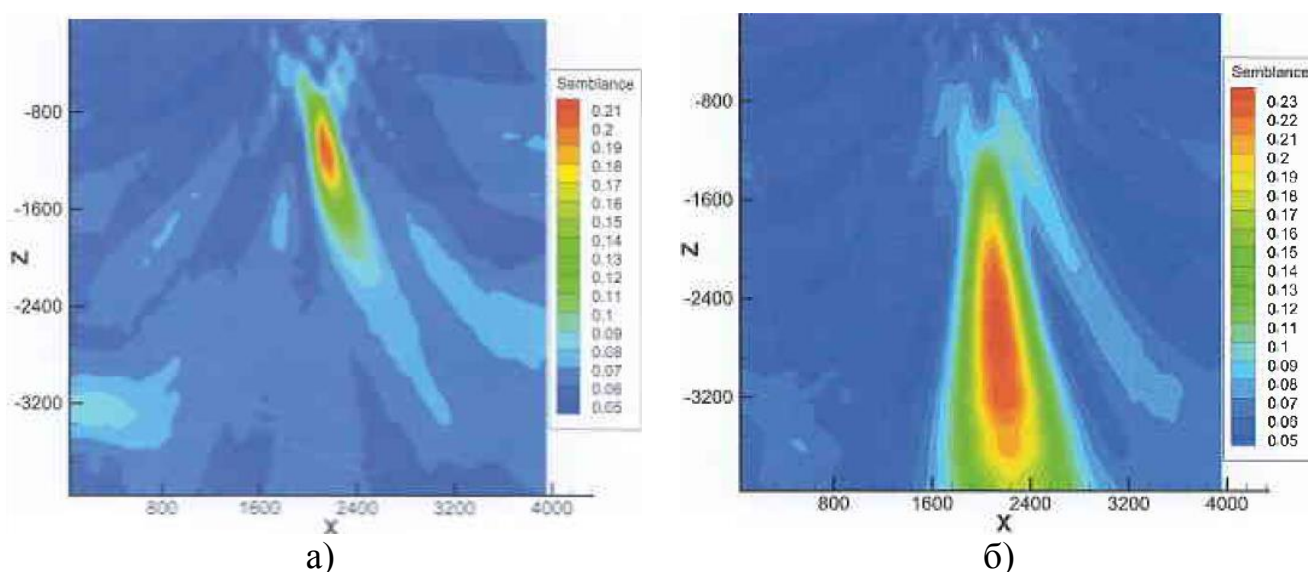


Рис. 2. Распределение $S(\rho)$ при $SNR = 1/3$, X – координата источника 2160 м, глубина источника: (а) 1160 м и (б) 3160 м.

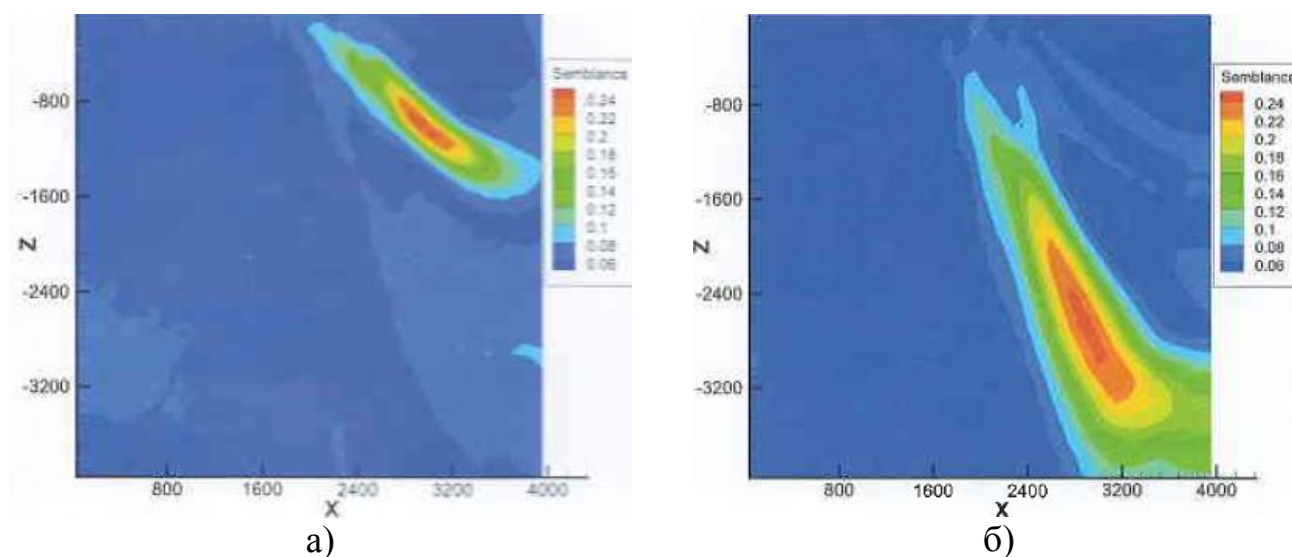


Рис. 3. Распределение $S(\rho)$ при $SNR = 1/3$, X - координата источника 3160 м, глубина источника: (а) 1160 м и (б) 3160 м.

В таблице 1 дано сопоставление координат заданных и найденных источников, приведены полученные при этом погрешности локализации

Таблица 1. Координаты заданных и найденных источников

Координаты заданного источника, м	X,Z	Отношение глубины источника к апертуре антенны	Координаты найденного источника, м	X,Z	Погрешность локализации по осям X,Z, м
Источник под приемной группой					
(2160, 1160)		0,97	(2120, 1080)		(40, 80)
(2160, 3160)		2,63	(2120, 2600)		(40, 560)
Источник в стороне от приемной группы					
(3160, 1160)		0,97	(2920, 1000)		(240, 160)
(3160, 3160)		2,63	(2920, 2680)		(240, 480)

Из таблицы 1 видно, что с ростом глубины расположения источника (и соответствующим ростом отношения глубины к апертуре) снижается точность правильной локализации и увеличивается диапазон разброса при определении погрешности локализации («пятно» оценки $S(\rho)$ на рис. 2 и 3 становится больше с ростом глубины). Этот эффект характерен для обоих рассмотренных случаев, однако при расположении источника под приёмной группой корректность локализации по оси OX оказывается выше, чем когда источник лежит вне группы. Качественно эти результаты совпадают с теоретическими оценками [1-3].

3.2. Влияние погрешности задания входных данных

Для корректной локализации важно иметь точные данные о скоростной модели среды. Отсутствие достоверной скоростной модели среды может привести к ошибкам при расчёте $\tau_i(\rho)$. При анализе влияния погрешности входных данных особое внимание необходимо уделить заданию границ слоёв породы и скоростей распространения волн в слоях.

Рассмотрим следующую 3D постановку задачи поиска уединённого источника. Пусть задана область поиска (X,Y,Z) с линейным размером области по каждому направлению, равным 2000 м, количество точек опроса по каждому направлению равно 50, расстояние между точками опроса равно 40 м. Скоростная модель среды представлена в таблице 2.

Таблица 2. Исходная скоростная модель среды

Координаты слоя, м	Скорость продольной волны, м/с
0 – 500	2000
500 – 1000	3000
1000 – 1500	4000
1500 – 2000	5000

Параметры источника:

- амплитуда источника, $A_s = 1$, частота источника $f = 12$ Гц,
- коэффициент затухания сигнала на источнике, $\beta = 1,2$;

– координаты источника: (1250, 1350, -1850).

Приёмные датчики расположены на дневной поверхности равномерно в виде квадратной решётки (7 x 7 датчиков). Размер рассматриваемого временного окна 2 с. Частота дискретизации 2 мс. На сигнал наложена аддитивная помеха с уровнем $SNR = 1/3$.

Были рассмотрены два варианта задания неточностей в скоростной модели среды.

Вариант 1. Задана неточность в положении границы, а именно, глубина нижней границы третьего слоя увеличена на 150 м (изменена на 10%), – см. таблицу 3.

Вариант 2. Изменена скорость в слоях (скорость во 2-м и 3-ем слое на 10% выше, чем на самом деле), – см. таблицу 4.

Результаты полученных распределений $S(\rho)$ в плоскостях XY и XZ для корректного и некорректного задания скорости в слоях показаны на рис.4 (для неточного задания границ слоя результаты похожи и не приведены).

В таблице 5 дано сравнение заданных и найденных координат источника для обоих вариантов неточностей в скоростной модели среды.

Таблица 3. Неточность задания положения границы слоя

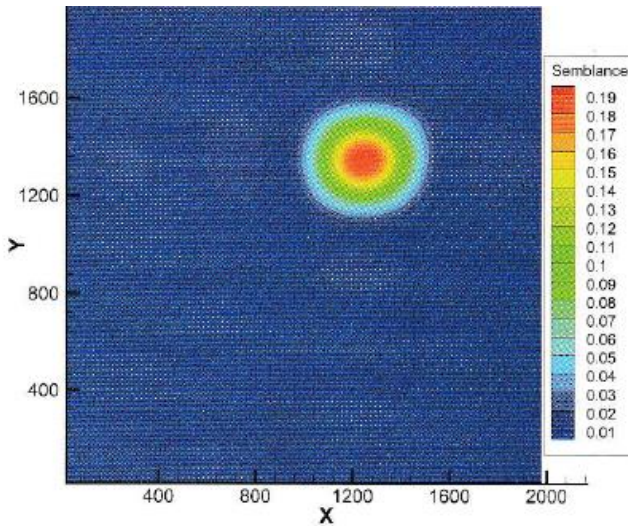
Координаты слоя, м	Скорость продольной волны, м/с
0 – 500	2000
500 – 1000	3000
1000 – 1650	4000
1650 – 2150	5000

Таблица 4. Измененные значения скорости в слоях

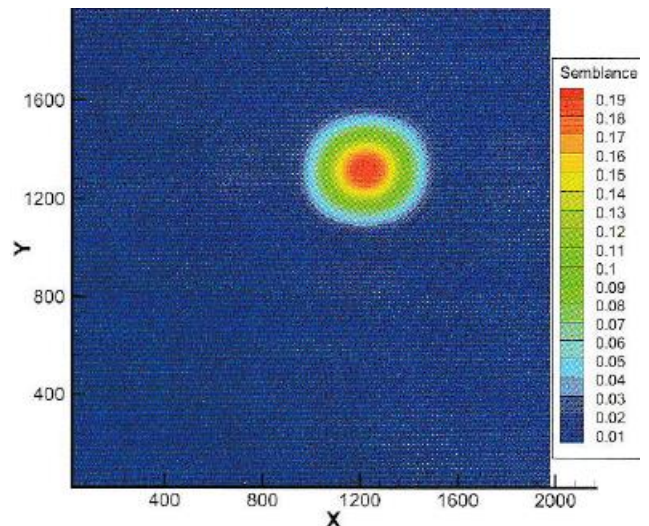
Координаты слоя, м	Скорость продольной волны, м/с
0 – 500	2000
500 – 1000	3300
1000 – 1500	4400
1500 – 2000	5000

Таблица 5. Сравнение найденных и заданных координат источников при неточной скоростной модели среды

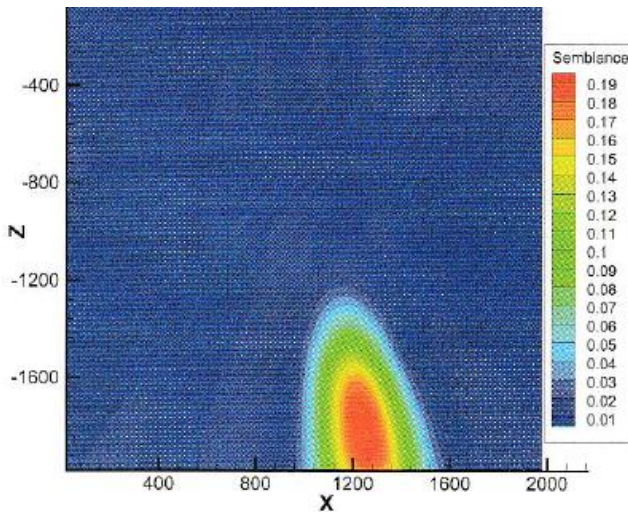
Вариант	Координаты заданного источника, м	Координаты найденного источника, м	Погрешность локализации по осям, м
1. Неточное задание границы слоя	(1260, 1340, -1820)	(1260, 1340, -1780)	(0, 0, 40)
2. Неточное задание скорости в слое	(1260, 1340, -1820)	(1220, 1300, -1780)	(40, 40, 40)



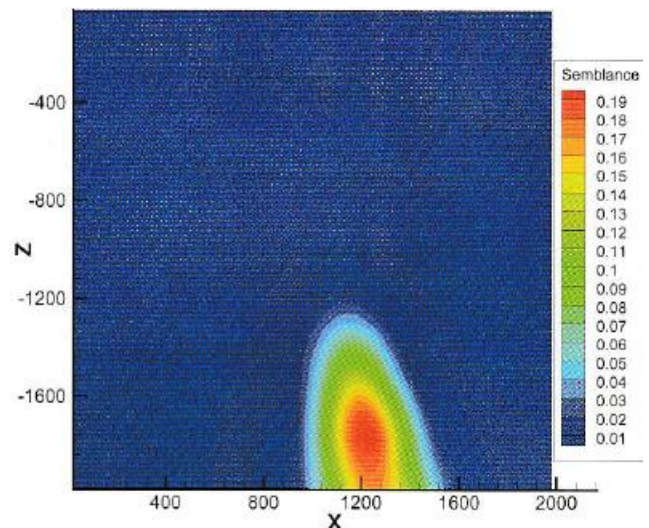
а) Корректная модель, сечение XY



б) Неточная скорость, сечение XY



в) Корректная модель, сечение XZ



г) Неточная скорость, сечение XZ

Рис. 4 Распределение $S(\rho)$ в сечениях XY и XZ для корректного и неточного задания скорости в слоях

Таким образом, погрешности определения горизонта слоя и скорости в среде не оказывают существенного влияния на правильность локализации источника (при ошибках порядка 10%). Это показывает устойчивость рассмотренного алгоритма поиска по отношению к погрешностям входных данных скоростной модели среды.

4. Методы повышения точности локализации

Для повышения точности локализации с помощью когерентной оценки $S(\rho)$ необходимо применять различные методы, связанные с пространственным и временным масштабами задачи. Эти методы рассмотрены ниже.

4.1. Передискретизация

При работе с записями сейсмических шумов возможны ситуации, когда полученный с датчиков сигнал будет иметь избыточное количество дискретных отсчётов. Например, если известно, что максимальная частота исследуемого сигнала 100 Гц, то обрабатывать его с частотой 8 кГц нет необходимости. Поэтому естественным является **предварительный этап**, в котором на основе максимальной частоты спектра полезного сигнала осуществляется **передискретизация сигнала**. Поскольку в оценке (1) присутствует сумма по временным отсчётам, общее время расчёта при такой операции сокращается во столько раз, во сколько раз уменьшится число отсчётов в сигнале.

4.2. Разбиение на подокна

Основой для нахождения источников сейсмического шума являются записанные сейсмические данные. Поскольку данные идут непрерывным потоком во времени, целесообразным является **разбиение их на некоторые временные подокна с целью поиска источников именно в этих окнах**. Очевидно, при большом размере окна в него могут попасть сигналы от нескольких источников, что приведёт к затруднению выделения полезного сигнала. С другой стороны, в окне малого размера возрастает шанс получить мнимые источники из чисто шумовых данных. **Размер окна поиска должен быть согласован с частотой источника**, локализацию которого мы проводим. Как правило, чем больше частота, тем короче испускаемый импульс и тем меньше должно быть рассматриваемое временное окно.

Естественным становится согласованно проводить поиск источников по частотным диапазонам с **разбиением на подокна**. Расчёт каждого временного окна производится следующим образом: все окно сначала делится на длинные по времени подокна (локализуются низкочастотные источники шума), затем окно делится на более короткие подокна (локализуются низкочастотные источники шума). Разделение на частотные диапазоны необходимо для проведения более качественной фильтрации в данном выбранном диапазоне частот.

Можно выбрать следующие «середины» диапазонов поиска (фильтрации): 5 Гц – 10 Гц – 20 Гц – 40 Гц и т.д. При этом размер временного подокна должен уменьшаться ровно в два раза для каждого следующего диапазона. Начальный размер окна выбирается исходя из следующих соображений: в него должно входить $2 \div 3$ периода сигнала на средней частоте диапазона (например, для диапазона 10 Гц – около 0,2–0,3 с, – см. рис. 5).

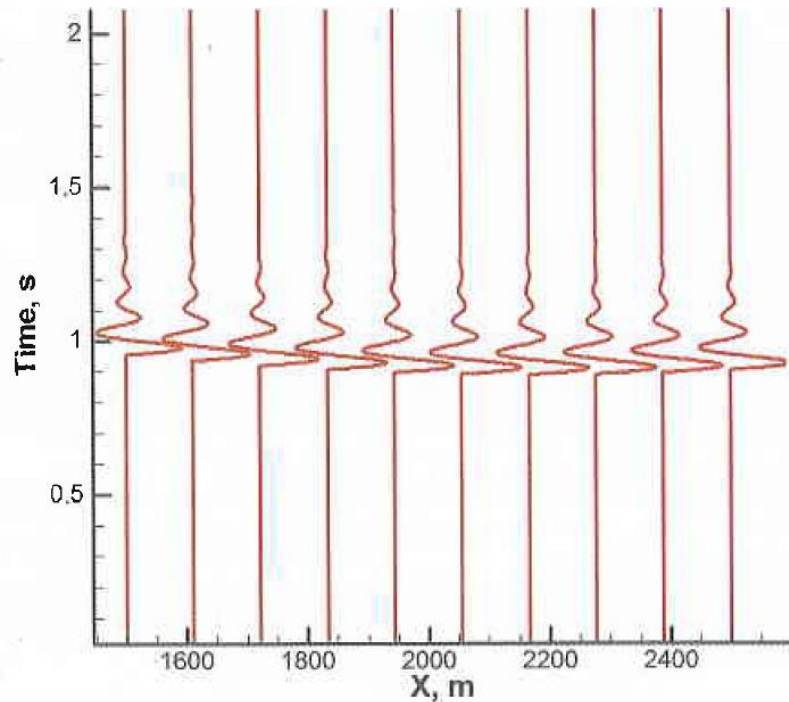


Рис. 5. Общий вид сигнала на датчиках (шум не отображён). Дан пример с характерным размером сигнала по времени 0,3 с.

В настоящей работе для **фильтрации полезного сигнала** применяется спектральный фильтр, основанный на быстром преобразовании Фурье (БПФ). После перевода сигнала в спектральную область для выделения полезных гармоник производится умножение спектра на некоторую передаточную функцию [11]. Затем производится восстановление исходного сигнала с помощью обратного БПФ. Достоинством такого подхода является возможность выбора вида передаточной функции, что, в свою очередь, позволяет получить более качественные результаты фильтрации по сравнению со стандартными линейными и нелинейными фильтрами. Недостатком данного метода фильтрации является скорость его работы, которая ниже, чем у обычных цифровых фильтров. Отметим, что для проведения спектральной фильтрации, использующей БПФ, число отсчётов в подокне должно быть кратно степени 2.

Рассмотрим следующий **пример выбора размера подокна сканирования** в задаче локализации. Пусть частота дискретизации сигнала равна 1 мс, начальное подокно имеет 512 отсчётов (длительность 0,512 с). В нем будут производиться фильтрация и поиск источника в диапазоне $7 \div 14$ Гц. Типичные размеры подокон для частотных диапазонов поиска приведены в таблице 6.

Таблица 6. Соотношение частот фильтрации и размеров подокон

Получаемые полосы частот, Гц	Размер подокна, с	Число отсчётов в подокне
7—14	0,512	512
14—28	0,256	256
28—56	0,128	128
56—112	0,064	64

Дополнительно необходимо контролировать число отсчётов в рассматриваемом временном окне. Отсчётов может оказаться мало (1-2-4-8-16), что плохо скажется на качестве локализации. Поэтому при достижении подокном размера в 32 или 64 отсчёта следует прекратить его дальнейшее разбиение. Выделение когерентных составляющих из таких малых подокон становится уже затруднительным. В приведённом примере разбиения на частоты поиска максимальная «средняя» частота диапазона поиска составляет 80 Гц.

Для иллюстрации качества локализации в зависимости от размера окна сканирования рассмотрим следующую **модельную задачу поиска одного источника**. Пусть размер области по каждому направлению равен 2000 м, скорость распространения продольной волны 2000 м/с, уровень аддитивного некоррелированного гауссова шума равен $SNR = 1/5$. Уровень шума определяется по средней максимальной амплитуде сигнала на датчиках. Частота дискретизации сигнала 1000 Гц.

Параметры источника:

- координаты (1310, 1185, 1430);
- собственная частота источника 10 Гц.

Общий вид сигнала представлен на рис. 5.

Для расчётов использовалась сетка размером 20x20x20 ячеек, точки опроса находились в центрах ячеек сетки, размер шага поиска – 100 м.

В качестве порога детектирования было выбрано значение $5/N$, где N – число датчиков в приёмной группе. Были проведены расчёты и определены источники при поиске по подокнам различной длины (64 – 128 – 256 – 512 мс) (см. табл. 7). Из таблицы 7 видно, что при малом размере под окна находится

Таблица 7. Число найденных источников и размер подокна

Размер подокна, с	Число найденных источников
0,064	43
0,128	18
0,256	3
0,512	1

большое количество ложных источников (1-я и 2-я строки таблицы). С ростом размера окна количество ложных источников уменьшается. Так, только при окне размером 0,512 с локализуется единственный истинный источник АЭ.

При дальнейшем росте размера окна локализация истинного источника не нарушается, но за счёт лишней информации в окне (в виде паразитического шума) снижается уровень Semblance.

Соответствующие значения размера подокна и уровень Semblance представлены в таблице 8.

Таблица 8. Зависимость уровня Semblance от размера подокна

Размер подокна, с	Уровень Semblance истинного источника
0,256	0,9238
0,512	0,8560
1,024	0,7481
2,048	0,5931

4.3. Метод уточнения положения источника

Точность определения положения источника связана с размерами ячеек пространственной сетки, в центрах которых производится опрос (сканирование). Исходя из полученных в расчетах характерных распределений $S(\rho)$ естественно предложить следующий подход по **уточнению положения найденного источника** шума. После предварительной локализации на грубой сетке можно произвести локальное измельчение сетки вблизи найденного положения, и на полученной мелкой сетке провести новое сканирование. Затем можно повторить локальное измельчение сетки вблизи нового найденного положения источника и т.д.

На рис. 6 изображен пример построения локальной сетки для 2D задачи локализации, при котором новая сетка получается путем деления на три каждой стороны ячейки исходной сетки. Найденный после сканирования на грубой сетке источник изображен в виде кружка, реальный источник – в виде звездочки. Также на рисунке показана область уточнения результатов – красный квадрат с более частым расположением в ней точек опроса. В результате проведения уточняющего поиска был найден источник с новыми координатами – изображен в виде треугольника. Видно, что положение уточненного источника оказывается при этом ближе к реальному.

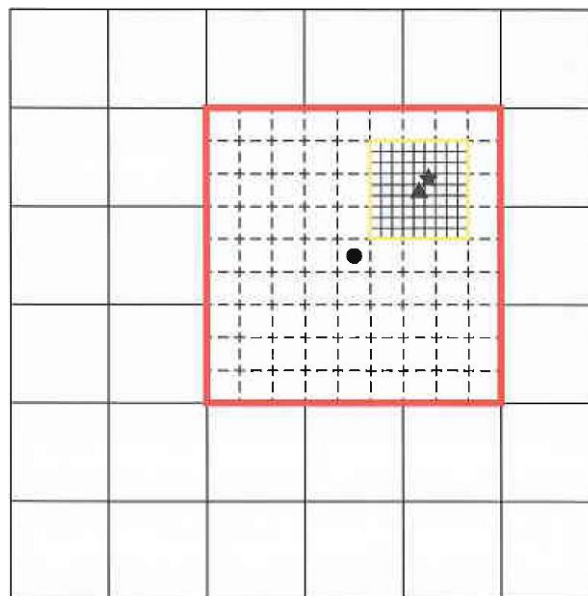


Рис. 6. Расчетная область и ее подобласть, где производится уточняющий поиск источника.

Подобное уточнение можно проводить и далее, используя при этом как основу уже найденный источник и область вокруг него (желтый квадрат на рис. 6). Итерации уточнения можно проводить до тех пор, пока размер уточняющей сетки не станет меньше заданного заранее. Очевидно, при этом точность локализации, связанная с размерами ячеек сетки, увеличивается в три раза по каждой координате, и за несколько итераций такого измельчения мы получим требуемую точность локализации. Однако надо иметь в виду, что остаются физические ограничения по точности локализации, связанные с длиной волны несущей частоты сигнала.

Для иллюстрации работы **алгоритма уточнения положения источника** рассмотрим следующую 3D постановку задачи поиска источника.

Размер области 2000 м по каждому направлению, скорость продольной волны равна 2000 м/с, уровень некоррелированного аддитивного шума $SNR = 0.33$, частота дискретизации сигнала 1000 Гц.

Для расчетов использовалась равномерная сетка размером 10x10x10 ячеек, при этом точки опроса находились в центрах ячеек сетки, размер шага поиска равен 200 м.

В качестве порога детектирования было выбрано значение $5/N$, где N – число датчиков в приемной группе.

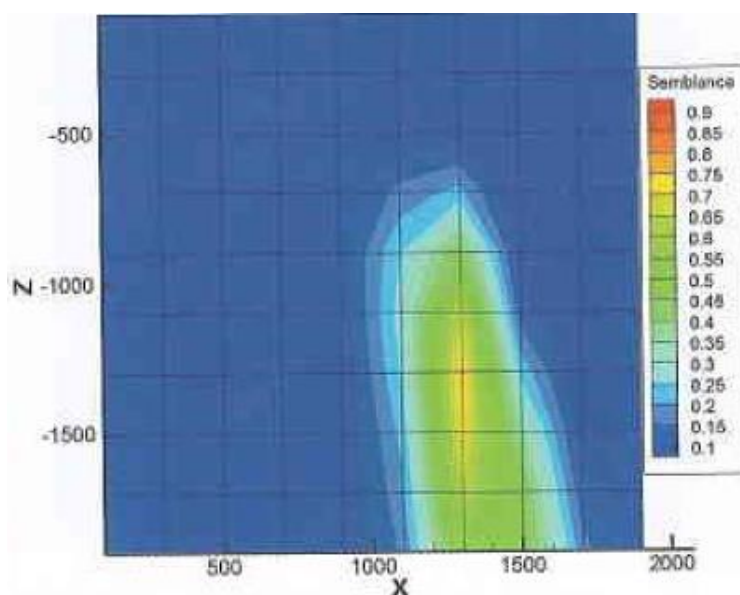
Параметры источника: координаты (1310, 1185, 1430), собственная частота источника 10 Гц.

В табл. 9 показаны результаты на итерациях алгоритма уточнения положения источника.

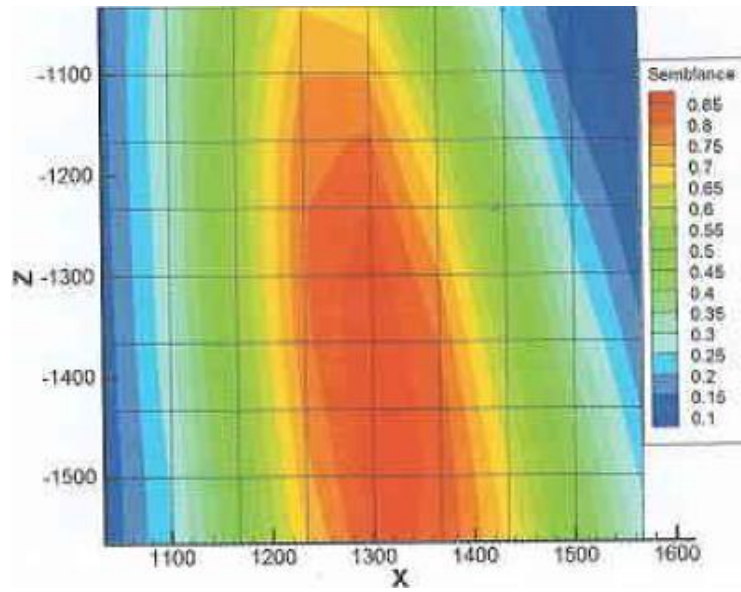
Таблица 9. Итерации работы алгоритма уточнения локализации

Номер итерации	Линейный размер уточняющей сетки, м	Координаты источника, м	Уровень Semblance	Расстояние до истинного источника, м
0	200	1300.00, 1100.00, 1300.00	0.748	156
1	66.66	1300.00, 1166.66, 1366.66	0.897	107
2	22.22	1322.22, 1188.88, 1455.55	0.904	28
3	7.40	1314.81, 1181.48, 1425.92	0.905	8
4	2.47	1312.34, 1183.95, 1435.80	0.906	6
∞	–	1310.00, 1185.00, 1430.00	1.000	0

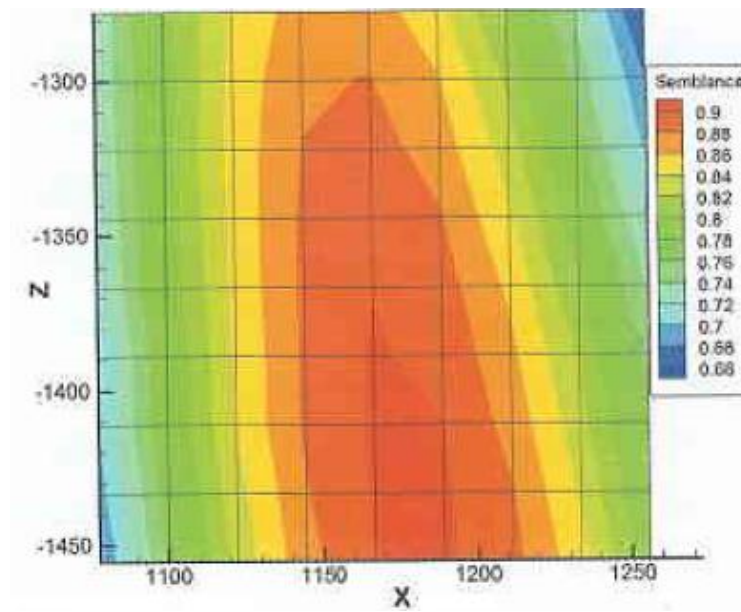
Из табл. 9 видно, что с каждой итерацией алгоритма уточнения положения источника происходит увеличение уровня Semblance. Соответствующие распределения оценки $S(\rho)$ на итерациях уточняющего алгоритма представлены на рис. 7.



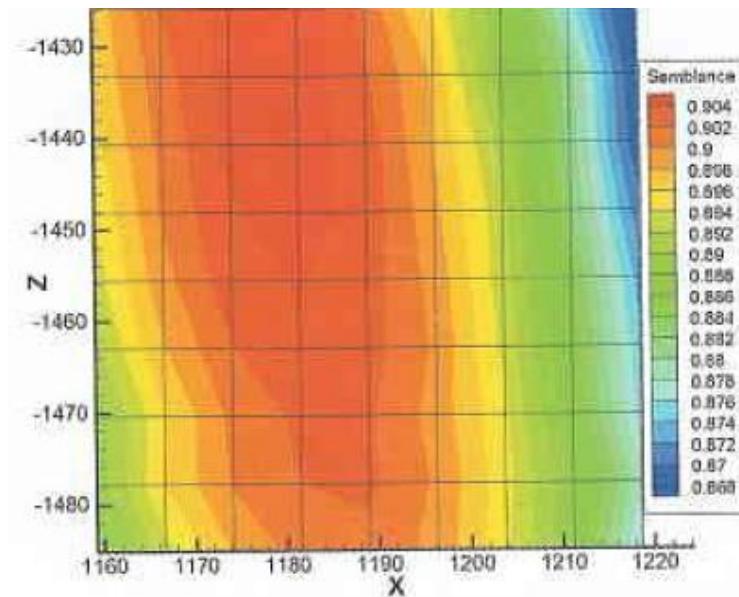
а) Semblance в расчетной области (0-я итерация уточнения)



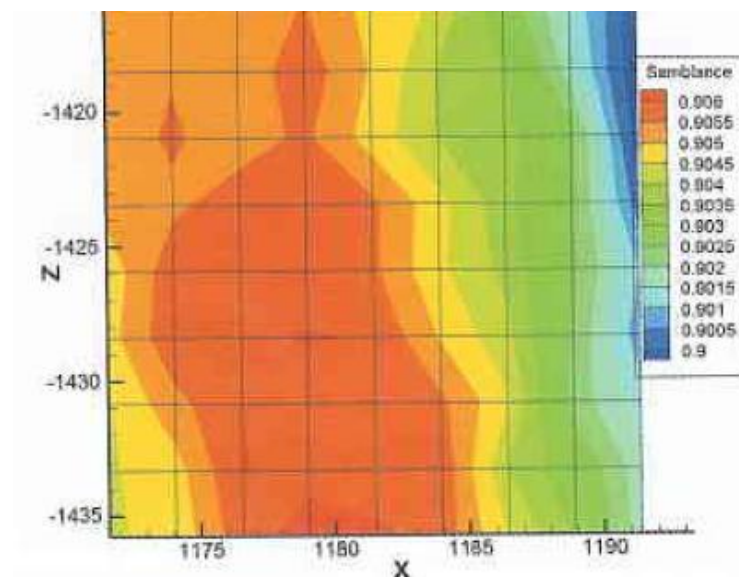
б) 1-я итерация уточнения



в) 2-я итерация уточнения



г) 3-я итерация уточнения



д) 4-я итерация уточнения

Рис. 7. Распределение оценки Semblance в расчетной области (а), а также в уточняющих подобластях на последовательных итерациях алгоритма уточнения локализации источников (б, в, г, д).

Таким образом, применение алгоритма уточнения локализации источников АЭ позволяет существенно повысить точность поиска.

4.4. Метод последовательного исключения

При наличии в подокне сигнала от нескольких источников каждый из них вносит меньший относительный вклад в общую энергию принятого полезного сигнала, поэтому определить координаты каждого из них оказывается затруднительным.

В этом случае функция Semblance может иметь несколько локальных максимумов и низкий уровень (см. рис. 8), на котором представлено распределение оценки Semblance в области размером 4000 м x 4000 м. Причем в рассматриваемом временном подокне сигнал соответствует трем источникам. Для детектирования нескольких источников будем использовать **метод последовательного исключения**, который основан на вычитании среднего по датчикам приведенного сигнала.

Найденный на первой итерации расчет источник становится базовым, затем для него рассчитывается время прохода сигнала до каждого из датчиков t_j , $j = 1, \dots, K$, после чего выбирается максимальное \tilde{t} . В случае когда будет $t_j - \tilde{t} < 0$, необходимо использовать данные, регистрируемые в предыдущем временном окне. Вычисляется усредненный по всем датчикам и скорректированный по времени \tilde{t} сигнал

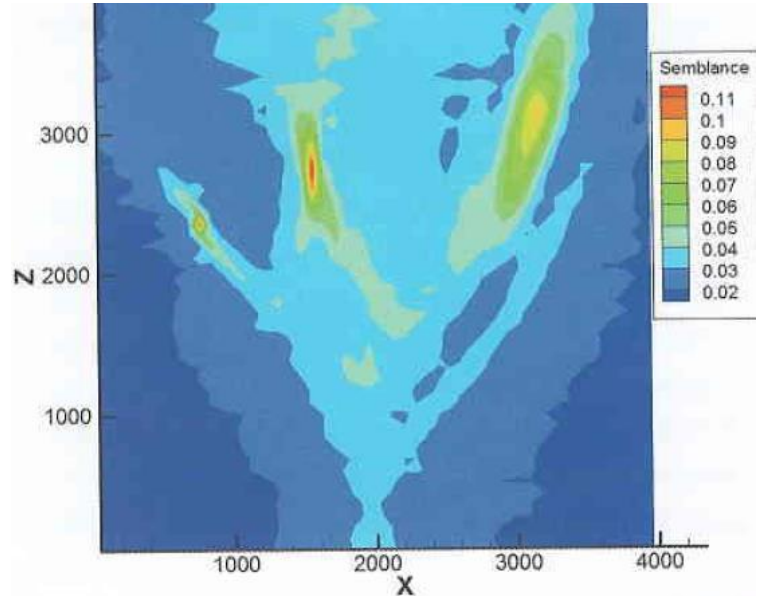
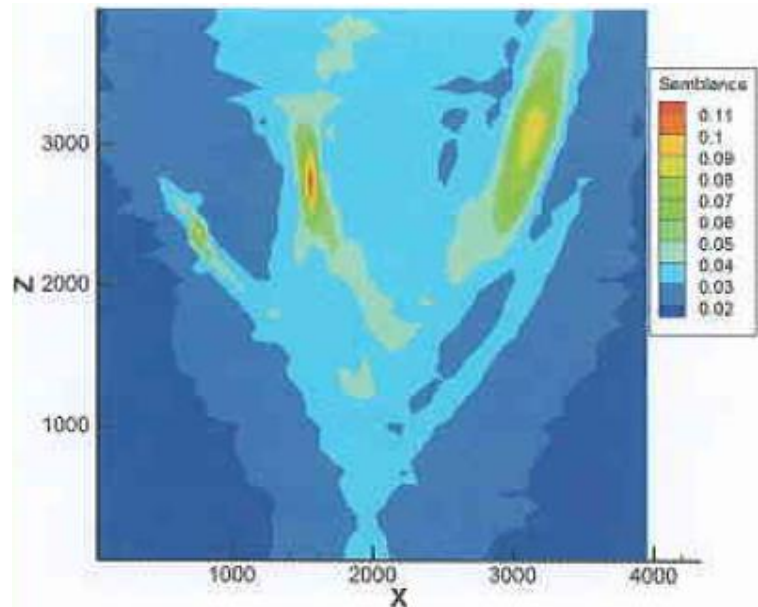


Рис. 8. Распределение величины Semblance в области (X,Z).



а) выделение «центрального» источника

$$\tilde{x}(t) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x_i(t + t_j - \tilde{t}),$$

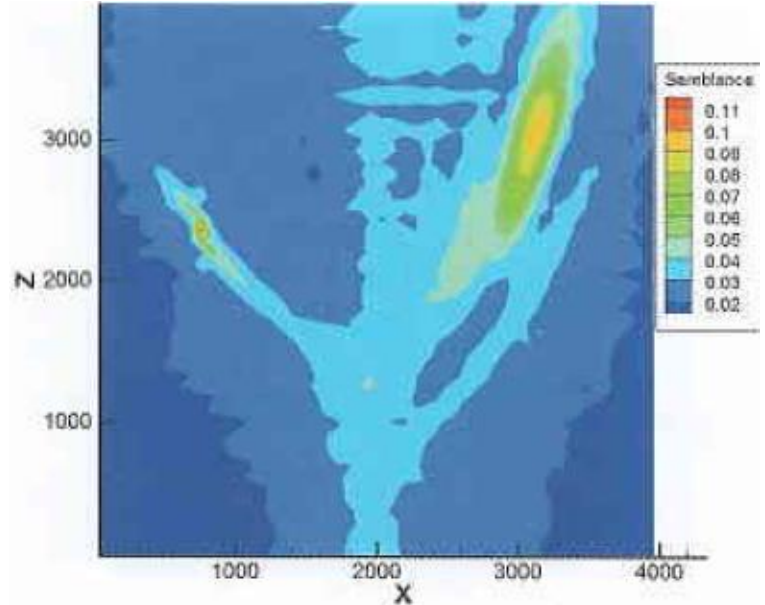
после чего из каждого сигнала на приемнике вычитается усредненный сигнал:

$$x_j(t) = x_j(t) - \tilde{x}(t).$$

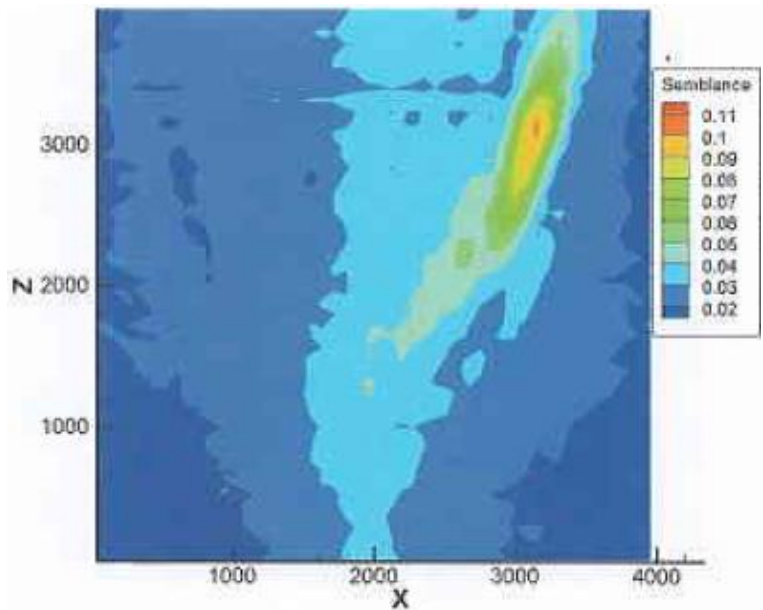
В результате, при новом расчете оценки Semblance область вблизи текущего базового источника будет иметь более низкое значение оценки Semblance при незначительном его изменении в остальной области расчета. Затем процесс повторяется, но уже для нового базового источника.

На рис. 9 показано, как после каждого вычитания усредненного сигнала, область, где располагался базовый источник, уравнивается по значению Semblance с фоновым значением. При этом уровни интенсивности ненайденных источников практически не меняются. Выделяются последовательно:

- а) «центральный»,
- б) «левый» и в) «правый» источники сигнала.



б) выделение «левого» источника



в) выделение «правого» источника

Рис. 9. Распределение оценки Semblance в области на различных итерациях метода последовательного исключения.

5. Расчет модельной задачи с многочисленными источниками

Применим предложенные алгоритмы для решения задач локализации большого числа удаленных от датчиков источников шума. Рассмотрим следующую задачу о локализации:

- область поиска – куб (X,Y,Z) со стороной 4000 м;
- слоистая модель среды, скоростная модель дана в таблице 10;

- регистрирующая система из 10x10 датчиков, расположенных на области размером 1000x1000 м с центром антенны в точке (2000 м, 2000 м, 0);
- шаг дискретизации сигнала 0,002 с, число отсчетов в файле 2000, общее время записи 4 с;
- уровень шума $SNR = 3/10$.

Таблица 10. Скоростная модель среды

Координаты слоя, м	Скорость сигнала в слое, м/с
0 - 600	3000
500 - 2500	3200
2500 - 4000	3500

Первые две секунды сигнала, записанного датчиками с номерами 1 – 10, представлены на рис. 10.

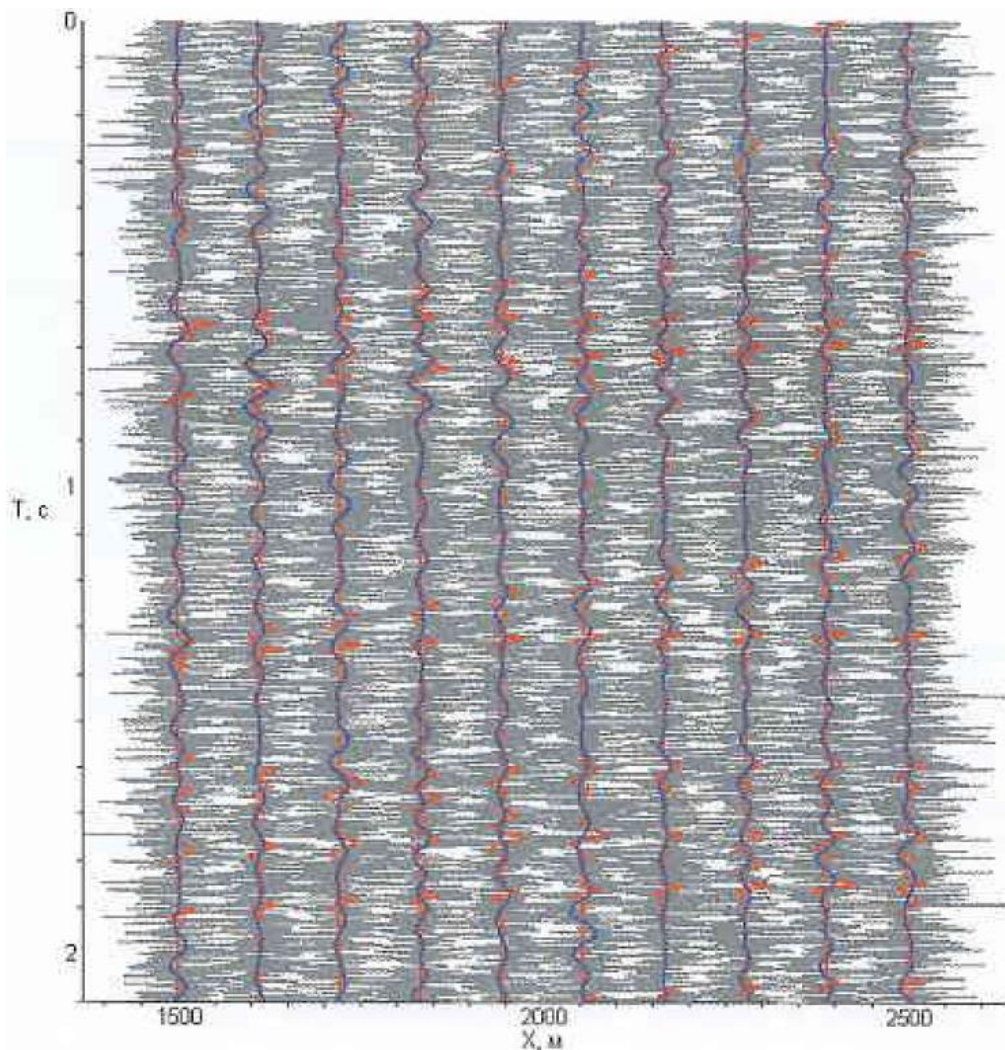


Рис. 10. Сейсмограмма для датчиков с номерами 1 – 10 для времени до 2-ой секунды. Исходный сигнал представлен красным цветом, с шумом – серым цветом, отфильтрованный в диапазоне со средней частотой 10 Гц – синим цветом

В рассматриваемой области случайным образом расположены 30 источников АЭ, возникающих в разные моменты времени. Характерные частоты источников брались из диапазона $10 \div 40$ Гц. Для расчетов значений $S(\rho)$ использовалась равномерная сетка размером $80 \times 80 \times 80$ ячеек, при этом линейный размер ячейки составляет 50 м. Поиск источников проводился в диапазоне частот $7 \div 56$ Гц, который был разбит на три поддиапазона: $7 \div 14$ Гц, $14 \div 28$ Гц, $28 \div 56$ Гц со средними частотами 10 Гц, 20 Гц, 40 Гц.

Для расчетов в диапазоне со средней частотой 10 Гц был выбран размер окна сканирования в 256 отсчетов, или 0,512 с; для диапазонов со средней частотой 20 и 40 Гц – окна размером 0,256 с и 0,128 с соответственно.

На рис. 11 – 13 показаны распределения оценки $S(\rho)$ для некоторых из найденных источников в сечениях XY и YZ (сечение XZ не приведено). При этом выбирались разные частотные диапазоны, наиболее подходящие для соответствующих источников. Крестиком обозначен найденный источник, белыми кружочками – исходные положения реальных источников.

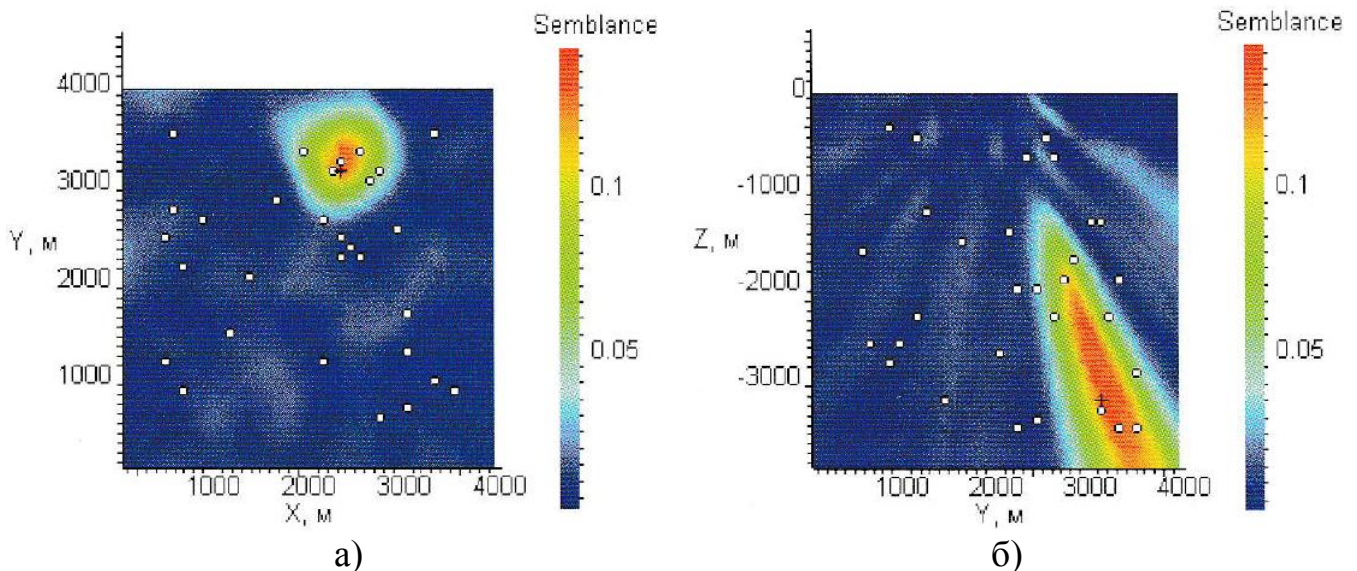


Рис. 11. Сечения функции Semblance плоскостями (а) XY и (б) YZ, проходящими через найденный источник с координатами (2250, 3150, 3350) для частотного диапазона $7 \div 17$ Гц.

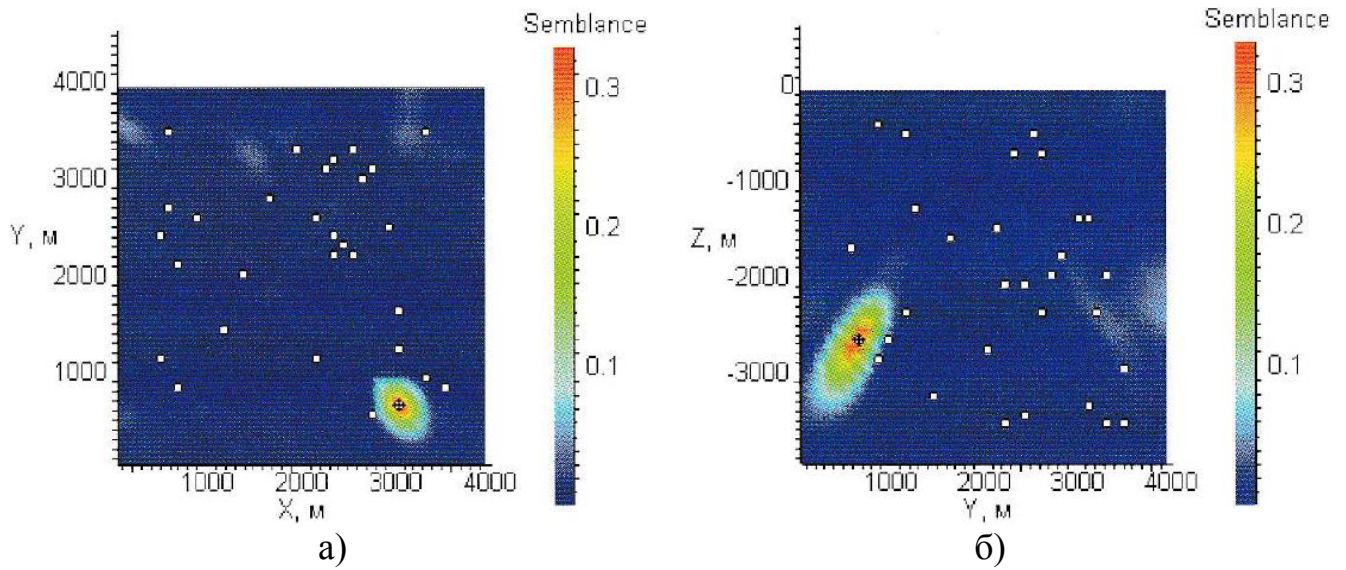


Рис. 12. Сечения функции Semblance плоскостями (а) XY и (б) YZ, проходящими через найденный источник с координатами (3050, 650, 2650) для частотного диапазона $14 \div 28$ Гц.

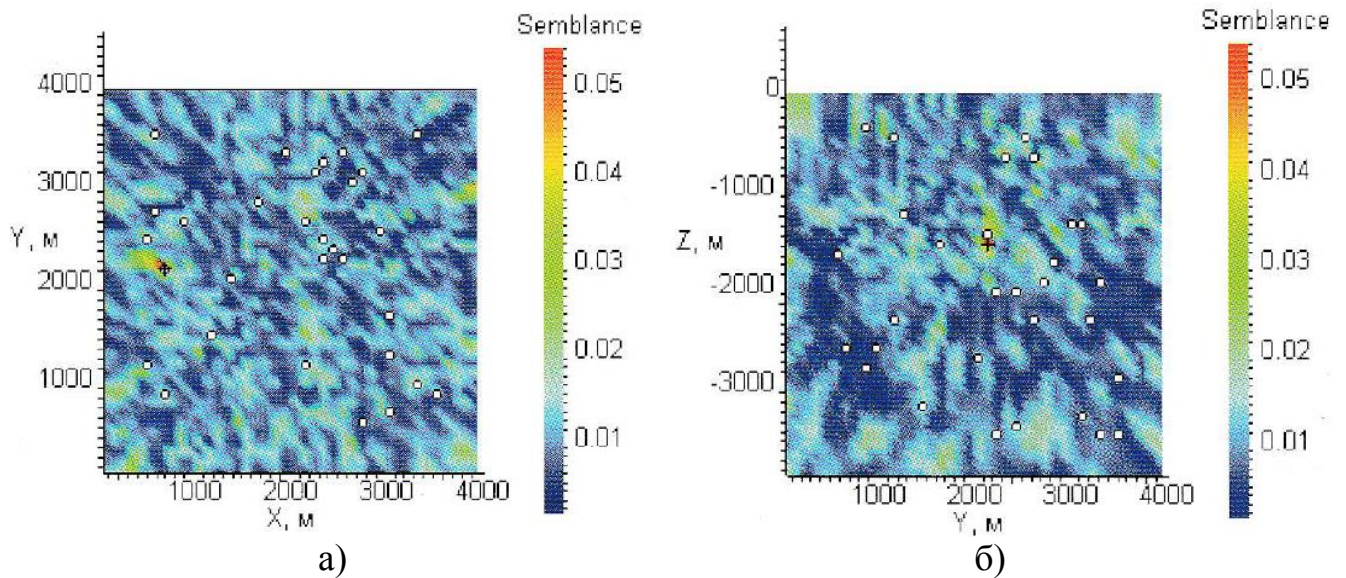


Рис. 13. Сечения функции Semblance плоскостями (а) XY и (б) YZ, проходящими через найденный источник с координатами (650, 2150, 1450) для частотного диапазона $28 \div 56$ Гц.

В результате обработки сейсмических записей найдены 37 источников акустических шумов (при 30 истинных источниках). 3D картина расположения найденных и истинных источников показана на рис. 14.

Неудовлетворительно локализовались источники, расположенные сбоку от приемной антенны на незначительной глубине залегания - 0 – 650 м. Остались также нелокализованными источники, расположенные на значительной глубине, у которых отношение глубины залегания источника к апертуре антенны больше 3 (глубина 3000 м и более). При этом у трех источников с глубиной 3550 м время события было одинаковое, сигналы от них пришли на датчики приемной группы в близкие моменты времени, что затруднило их локализацию.

Из найденных источников совпало с заданными 70%, оказались ложными – 30%. При расчете на реальных данных следует ожидать подобных результатов.

Заметим, что отмеченные проблемы локализации глубинных источников (неточности локализации, нахождение ложных источников и необнаружение истинных, влияние паразитных шумов) значительно снижаются при применении антенны большей апертуры.

Заключение

Основной задачей создаваемых в настоящее время «интеллектуальных месторождений» является получение и обработка информации в режиме реального времени. Применение быстрых и точных алгоритмов локализации способно стать основной технологией оперативного контроля на таких месторождениях. Рассмотренный в настоящей работе подход к задаче локализации источников АЭ, основанный на когерентной оценке Semblance, и предложенные методы уточнения поиска, являются простыми в реализации и

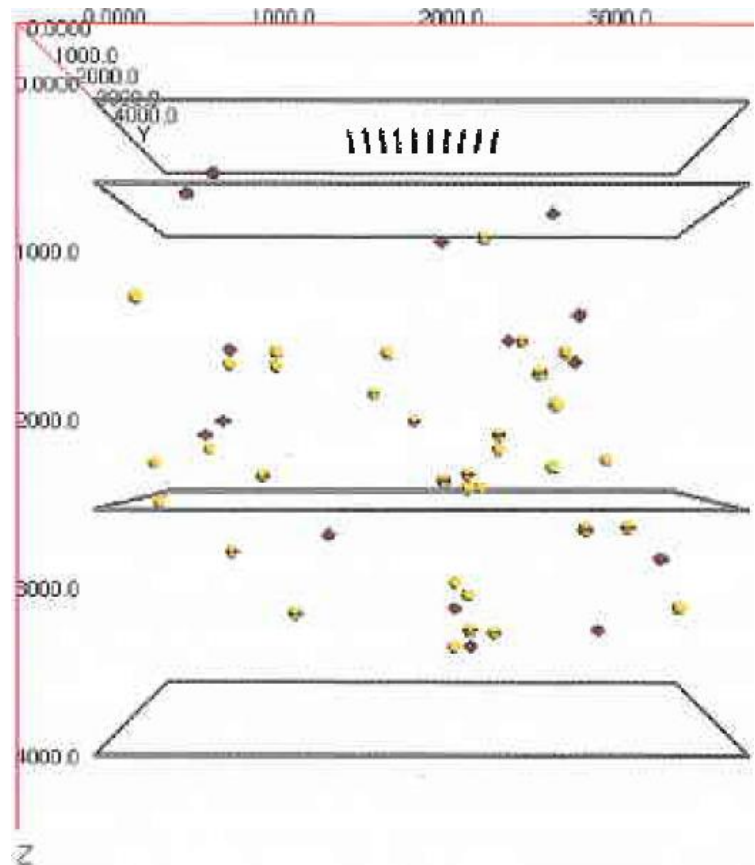


Рис. 14. Взаимное положение истинных (крестики) и найденных источников шума (желтые шары). На поверхности $Z = 0$ показаны элементы приемной антенны (в виде серых шариков, слившихся в черточки).

могут быть применены для осуществления мониторинга пространства вокруг скважин. Предложенные и разработанные в работе алгоритмические улучшения, как было показано, позволяют не только существенно сократить время расчетов, но и максимально эффективно и полно использовать имеющуюся в сейсмических записях информацию. Проведенные вычислительные эксперименты демонстрируют эффективность разработанных методов для задачи локализации источников АЭ.

В частности, типичные условия на шельфе позволяют эффективно применять данный подход при решении задач разработки и мониторинга шельфовых месторождений в реальном времени.

Приложение

III. Акустические волны: основные понятия, термины

В акустической волне [13 - 15] частицы среды совершают колебания вокруг точки покоя. Волна, у которой вектор колебательной скорости параллелен направлению распространения, называется *продольной волной (Р-волна)* – частицы среды колеблются в направлении, совпадающем с направлением распространения волны. Если частицы среды под действием волновой энергии совершают колебания в направлении, перпендикулярном распространению волны, такая волна называется *поперечной или сдвиговой (S-волна)*.

$$\lambda = V / f - \text{длина волны,}$$

$$T = \lambda / V = 1 / f - \text{период волны,}$$

где V , м/с, – скорость распространения волны в данной среде, f – частота.

В теории волн важным понятием является представление о *гармонической волне*, в которой все изменения состояния среды происходят по закону синуса или косинуса. Например, гармонически изменяющуюся во времени волну, распространяющуюся в направлении оси z , можно описать в следующем виде:

$$A(t) = A_0 \cos(\omega t - kz + \varphi),$$

где максимальное отклонение колебания относительно равновесного состояния называется **амплитудой** A_0 , $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, константа φ называется **начальной фазой** колебания, и ее значение обычно определяется источником колебаний, $k = 2\pi / \lambda$ – **волновое число**.

Гармонические волны называются также *монохроматическими*, поскольку колебания происходят на фиксированной частоте.

Волна, распространяющаяся в трехмерном пространстве, характеризуется понятием «**фронт волны**». **Фронт волны** – это поверхность, на которой волновой процесс имеет одинаковую фазу колебания. Распространение волны происходит в направлении, перпендикулярном поверхности фронта. По виду

фронта волны (или эквифазной поверхности) можно выделить *плоские, цилиндрические и сферические волны*.

Плоская волна – простейший вид волнового движения, распространяется в направлении по нормали к ее фронту. Наиболее общим ее аналитическим выражением является функция

$$F((n_x x + n_y y + n_z z)/V - t),$$

где n_x, n_y, n_z удовлетворяют условию $n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 = 1$ и являются проекциями на оси координат единичного вектора нормали к фронту волны, т.е. к плоскости, на которой аргумент функции F , $\xi = (n_x x + n_y y + n_z z)/V - t$, остается постоянным. Функция F является решением *волнового уравнения*

$$\Delta F - \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 F}{\partial t^2} = 0.$$

Она описывает некоторое возмущение, распространяющееся в среде со скоростью V . Форма волны, определяемая видом F , остается неизменной в процессе распространения.

Цилиндрическая и сферическая волны расходятся радиально, соответственно в цилиндрической и сферической системах координат. Амплитуда сферической волны убывает обратно пропорционально расстоянию от источника, а цилиндрическая – обратно пропорционально квадратному корню расстояния.

В акустике простейшим излучателем (источником акустического возмущения) является пульсирующая сфера малого радиуса. Звуковое давление или звуковой потенциал этого излучателя будет выражаться в виде **сферической волны**. Если ограничиться синусоидальным режимом излучателя и предположить, что радиус сферы r_0 мал по сравнению с длиной волны, то звуковой потенциал на расстоянии R от излучающей сферы будет выражаться формулой [14]

$$\psi = \frac{V_0}{4\pi R} \exp[i(kR - \omega t)],$$

где $k = \omega/V = 2\pi/\lambda$, $V_0 = 4\pi r_0^2 v_0$ – так называемая объемная скорость излучателя, равная произведению площади сферы радиуса r_0 на амплитуду скорости v_0 ее поверхности.

Направление распространения волны обычно называют лучом. Волновой фронт перпендикулярен лучу. У цилиндрических и сферических волн, распространяющихся от источника возбуждения, лучи направлены радиально, а волновые фронты представляют собой соответственно цилиндры или сферы. В случае плоского или удаленного источника возникают плоские волны. В них лучи параллельны, а волновые фронты представляют собой плоскости.

Если на пути распространения волны встречается граница со средой, свойства которой отличаются от свойств среды распространения, наблюдается эффект частичного или полного отражения, а также частичного (а в некоторых

случаях и полного) прохождения во вторую среду. Поскольку фронт волны перпендикулярен направлению распространения волны в однородной среде, то из простых геометрических построений следует равенство углов падения и отражения волн. Однако в отличие от электромагнитных волн в ряде случаев для акустических волн может наблюдаться эффект расщепления волн и появления волнового луча, отраженного под другим углом.

Если свойства среды, влияющие на скорость распространения волны, меняются, то может наблюдаться такое явление, как *рефракция*. **Рефракцией** называется искривление траектории распространения волны в неоднородной среде.

Возникновение дополнительных акустических или электромагнитных полей в результате **дифракции** соответствующих волн на препятствиях, помещенных в среду, на неоднородностях среды, а также на неровных и неоднородных границах сред, называется **рассеянием** волн.

Интерференцией волн называется сложение в пространстве двух или нескольких волн, при котором в разных точках пространства получается усиление или ослабление амплитуды результирующей волны.

В среде с потерями распространяющаяся волна часть своей энергии отдает веществу среды, при этом амплитуда поля уменьшается. Это может быть учтено введением зависимости (z – направление распространения волны):

$$A_0(z) = A_0 \exp(-\alpha z),$$

где α – коэффициент затухания, м^{-1} .

Поглощение звука часто характеризуют также коэффициентом потерь $\varepsilon = \alpha \lambda / \pi$ (где λ — длина волны звука) или добротностью $Q = 1/\varepsilon$. Величина $\alpha \lambda$ называется логарифмическим декрементом затухания. При распространении звука в среде обладающей вязкостью и теплопроводностью,

$$\alpha = \frac{b\omega^2}{2\rho V^3}, \quad b = \frac{4}{3}\eta + \eta' + \chi \cdot (1/C_V - 1/C_P),$$

где ρ – плотность среды, V – скорость звука в ней, ω – круговая частота звуковой волны, η и η' – коэффициент сдвиговой и объёмной вязкости соответственно, χ – коэффициент теплопроводности, C_P и C_V – теплоёмкости среды при постоянном давлении и объёме, соответственно.

Если ни один из коэффициентов не зависит от частоты, что часто выполняется на практике, то $\alpha \sim \omega^2$.

Во многих твёрдых телах при не очень высоких частотах (до сотен килогерц) коэффициент затухания пропорционален частоте, $\alpha \sim \omega$, поэтому величина добротности Q не зависит от частоты и может служить характеристикой затухания звуковых волн в веществе.

П2. Акустические волны в твердом теле и в поровой среде

В однородных твёрдых телах могут существовать два типа акустических волн, отличающихся друг от друга поляризацией колебаний относительно направления распространения волны: *продольная* (Р-волна) и *поперечная* (S-волна, имеющая две компоненты, SH, SV). Иногда продольные волны называют объёмными, а поперечные – сдвиговыми, т.к. последние связаны со сдвиговыми упругими напряжениями. Скорость распространения продольных волн (V_P) всегда выше, чем скорость поперечных (V_S). Их значения определяются в теории упругости через плотность вещества ρ и адиабатические модули упругости K , G (или E , ν) следующими выражениями [14 - 16] :

$$V_P = \sqrt{\frac{K + 4G/3}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}}, \quad (3)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}}.$$

Здесь K – модуль всестороннего (объёмного) сжатия – показатель сопротивляемости породы объёмному сжатию – измеряется в паскалях (Па), и обычно имеет значение от 10 до 100 ГПа. Величина, обратная K , называется сжимаемостью; G – модуль сдвига – показатель сопротивляемости породы поперечному сдвигу, измеряется в Па и имеет значения примерно в 2 раза меньше, чем K ; ν – коэффициент Пуассона, являющийся показателем пластичности породы и характеризующий изменения поперечных размеров элементарного объёма относительно продольной деформации при возникновении продольного сжатия, – в горных породах изменяется от 0 до 0,5 (практический диапазон 0,1 ÷ 0,4) и зависит от минералогического состава пород. Наименьшие значения ν связаны с жёсткими породами, сложенными кварцем или минералами, близкими по упругим свойствам. Наибольшие значения ν имеют глины или химические осадки типа неметаморфизованных известняков.

Уточним вопрос с распространением вышеупомянутых типов акустических волн и их взаимодействием с плоской границей раздела двух твердых сред. Для упрощения рассмотрим плоскую волну. Имеется 3 вектора: вектор направления распространения плоской волны, \mathbf{v} , вектор смещения частиц упругой среды, \mathbf{u} , и вектор нормали к плоскости раздела двух сред, \mathbf{n} , на которую падает плоская волна. Плоскость, образованная векторами \mathbf{v} , \mathbf{n} , называется плоскостью падения. Вектор \mathbf{u} раскладывается в сумму трех векторов: вектор, параллельный \mathbf{v} , вектор, перпендикулярный плоскости падения, и вектор, лежащий в плоскости падения: $\mathbf{u} = \mathbf{u}_P + \mathbf{u}_{SH} + \mathbf{u}_{SV}$. Соответственно, имеем волны трех типов: продольная, \mathbf{u}_P (Р-волна) и две поперечных, \mathbf{u}_{SH} и \mathbf{u}_{SV} (с горизонтальной, SH-волна, и вертикальной поляризацией, SV-волна). Каждая из этих волн по-своему взаимодействует с

границей раздела сред: каждая Р-волна и SV-волна не только порождают по две одноименных волны (отраженную и прошедшую через границу волны), но еще и могут "расщепляться", т.е. породить волны противоположного типа (Р-волна порождает две новые SV-волны: отраженную и прошедшую через границу раздела сред, а SV-волна аналогично порождает две Р-волны – отраженную и прошедшую через границу). SH-волна порождает только две одноименные волны – отраженную и прошедшую через границу SH-волны.

При наличии границ раздела сред могут существовать также **поверхностные волны** различных типов, в которых упругая энергия передается вдоль границ. Скорость поверхностных волн отличается от скорости продольных и поперечных волн, а переносимая энергия может во много раз превосходить энергию объемных волн. Отметим такие поверхностные волны, как **волна Лява** – поверхностная волна с горизонтальной поляризацией (SH типа), распространяющаяся в структуре упругого слоя на упругом полупространстве, и **волна Стоули**, которая распространяется вдоль плоской границы двух твердых сред, модули упругости и плотности которых не сильно различаются.

В многофазных средах из-за явлений неупругого поглощения энергии скорость звука, вообще говоря, зависит от частоты колебаний (то есть наблюдается дисперсия скорости). Например, оценка скорости упругих волн в двухфазной пористой среде может быть выполнена с применением уравнений теории Био–Николаевского. При достаточно высоких частотах (выше **частоты Био**) в такой среде возникают не только продольные и поперечные волны, но также и продольная волна II-рода.

При геофизических исследованиях земной коры для частот колебаний ниже частоты Био скорости продольных и поперечных упругих волн могут быть оценены по формулам (3) с использованием гораздо более простых уравнений Гассмана [17]. Уравнения Гассмана получены в приближении линейной теории упругости, в рамках которой однородный изотропный материал характеризуется тремя независимыми параметрами, например, модули упругости и плотность в поровой среде. В явной форме уравнений Гассмана эти параметры определяются следующим образом:

$$K = K_{dry} + \frac{(1 - K_{dry} / K_m)^2}{\phi / K_f + (1 - \phi) / K_m - K_{dry} / K_m^2},$$

$$G = G_{dry}, \quad \rho = \rho_m(1 - \phi) + \rho_f \phi,$$

где ϕ – пористость, ρ, ρ_m, ρ_f – плотности среды, твердого порового каркаса и флюида, заполняющего поры, K_{dry}, G_{dry} – модули упругости при отсутствии флюида (для сухих пор).

Частотный диапазон, в пределах которого теория Гассмана хорошо описывает экспериментальные данные, обычно оценивают величиной, равной 10% от резонансной частоты Био:

$$f_{\max} = 0.1 f_{\text{Bio}} \quad f_{\text{Bio}} = \frac{\eta \phi}{2\pi k \rho_f},$$

η – динамическая вязкость флюида, – коэффициент проницаемости вещества (абсолютная проницаемость горной породы). Для большинства реальных горных пород резонансная частота Био существенно выше 20-30 кГц. Это позволяет использовать уравнения Гассмана в процессе интерпретации данных сейсморазведки и акустического каротажа.

При выводе уравнений Гассмана используются следующие допущения, ограничивающие область их применения:

- минеральный поровый каркас и флюид движутся вместе (без проскальзывания); изменение элементарного объема породы складывается из изменения объема флюида и объема твердой фазы;
- свойства флюида не влияют на модуль сдвига G породы;
- напряжение в породе складывается из напряжения в каркасе породы и давления во флюиде (порового давления).

Для расчета упругих характеристик насыщенного пористого материала с использованием явной формы уравнения Гассмана необходимо задавать параметры K_{dry}, G_{dry} . Для этого обычно пользуются эмпирическими зависимостями. Широкое применение нашла обобщенная модель критической пористости Нура (A.Nur) [18], хорошо согласующаяся с экспериментами:

$$K_{dry} = K_m (1 - \phi / \phi_{cr})^a, \quad \phi < \phi_{cr},$$

$$G_{dry} = G_m (1 - \phi / \phi_{cr})^b, \quad \phi < \phi_{cr}.$$

Здесь ϕ_{cr} – критическая пористость, a и b – управляющие коэффициенты, калибруемые на результаты измерений. Физический смысл критической пористости – относительный объем пустот, выше которого материал теряет жесткость (например, точка перехода от песчаника к песку или от насыщенной породы к взвеси). Для значения пористости выше критического принимается $K_{dry} = G_{dry} = 0$. При этом уравнение Гассмана переходит в уравнение Вуда (Wood). Значения параметров a и b зависят от геометрии пустотного пространства, характера контакта, формы зерен и других характеристик скелета породы.

Библиографический список

- [1] Чеботарева И.Я. и др. Источник сейсмической эмиссии, связанный с магматическим телом в районе вулканического фронта, о. Хонсю, Япония // Вулканонология и сейсмология, 1997а, №2, с. 58–73.
- [2] Чеботарева И.Я. Структура и динамика геосреды в шумовых сейсмических полях, методы и экспериментальные результаты // Диссертация на соискание ученой степени д.ф.-м.н., Москва, 2010.
- [3] Островский А.А. Донные сейсмоэксперименты. М.: Наука, 1998, – 255 с.
- [4] Шмаков Ф.Д. Программный комплекс решения обратных кинематических задач микросейсмического мониторинга // Вестник НГУ Серия: Информационные технологии, 2010, Т.8, №2, с. 34–42.
- [5] Васекин Б.В., Максимов Д.Ю., Попов С.Б. Особенности применения метода пассивной сейсмоакустики на шельфовых месторождениях // Вестник ЦКР Роснедра, 2013, №3, с.46–51.
- [6] Васекин Б.В., Попов С.Б. Алгоритмические особенности решения задачи локализации источников акустической эмиссии при мониторинге нефтегазовых месторождений // Вестник ЦКР Роснедра, 2013, №4, с.38–45.
- [7] Taner T., Koehler F. Velocity spectra-digital computer derivation and application of velocity function // Geoph.: 1969, V.3,4, P.859–881.
- [8] Кугаенко Ю.А. О возможности обнаружения источника сейсмической эмиссии в условиях интенсивных помех при использовании эмиссионной томографии // Геология и геофизика, 2005, Т.46, №7, с.763–775.
- [9] Roessler D. et al. Rapid characterization of large earthquakes by multiple seismic broadband arrays // National Hazards Earth System Science, 2010, N10, P.259–288.
- [10] Moser T.J., Nolet G. and Shieder R. Ray Bending Revised // Bulletin of the Seismological Society of America, 1992, V.82, № 1, P 259–288.
- [11] Алексеев А.С. и др. Сейсмическая голография и фотографирование - методы и результаты работ // Проблемы вибрационного просвечивания земли. М: Наука, 1977, – 240 с.
- [12] Волошинов Б.В. и др. Широкоапертурная спектральная акустооптическая фильтрация электромагнитного излучения // Письма в ЖТФ, 1984, Т.15, №4, с.69–72.

- [13] Соловьянов И.П., Шабунин С.Н. Теория волновых процессов: Акустические волны. Учебное пособие. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. 142 с.
- [14] Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. Изд.2, М.: Наука, 1973.
- [15] Уайт Дж.Э. Возбуждение и распространение сейсмических волн. Underground sound // редактор пер. Н.Н. Пузырев, М.: Недра, 1986, - 261 с.
- [16] Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The Rock Physics Handbook // Cambridge University Press, 2009.
- [17] Gassmann F. Uber Die elastizitat poroser medien // Vier, der Natur Gesellschaft, 1951, № 96, С. 1-23. (нем., есть англ. перевод)
- [18] Nur A. et al. Critical porosity: the key to relating physical properties to porosity in rocks // Proc. 65th Ann Int. Meeting Soc. Expl. Geophys., 1995, № 878.

Оглавление

1. Введение	3
2. Составляющие алгоритма локализации источников	6
2.1. Алгоритм трассировки «bending» и его оптимизация.....	6
2.2. Выбор размера окна	8
2.3. Предобработка сейсмических данных	9
2.4. Выбор размеров ячеек сетки и расстояний между датчиками	9
3. Тестовые расчеты на примере единственного источника.....	10
3.1. Влияние положения приемной антенны относительно источника шума.....	10
3.2. Влияние погрешности задания входных данных.....	12
4. Методы повышения точности локализации	14
4.1. Передискретизация	15
4.2. Разбиение на подокна	15
4.3. Метод уточнения положения источника	18
4.4. Метод последовательного исключения	21
Расчет модельной задачи с многочисленными источниками.....	23
Заключение.....	27
Приложение	28
П1. Акустические волны: основные понятия, термины.....	28
П2. Акустические волны в твердом теле и в поровой среде	31
Библиографический список.....	34