



ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ЛОКАЦИИ МИКРОСЕЙСМИЧНОСТИ

С.С. Абраменков¹, Т.А. Ступина¹, И.Ю. Кулаков^{1,2}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,
e-mail: StupinaTA@ipgg.sbras.ru

В данной работе проводится исследование алгоритма локации источников микросейсмических событий методом направленного суммирования энергетических огибающих по сети станций. В основе алгоритма используется back projection технология, позволяющая послойно визуализировать интенсивность сейсмического излучения. Проведен сравнительный анализ предложенного метода на помехоустойчивость с методом, использующим меру подобия semblance.

Функция интенсивности сейсмического излучения; характеристическая функция; отклик сети; потенциальный источник микросейсмического события

RESEARCH OF THE MICROSEISMICITY LOCATION ALGORITHM

S.S. Abramenzov¹, T.A. Stupina¹, I.Yu. Koulakov^{1,2}

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

²Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: StupinaTA@ipgg.sbras.ru

In this paper, we propose the algorithm for locating microseismic events by the method of directed summation of energy envelopes over a network of stations. The algorithm is based on a back projection technology, which allows visualizing the intensity of seismic emission by layer. A comparative stability and robustness analysis of the proposed method with the method using the semblance is carried out.

Function of seismic emission; characteristic function; network response; potential source of microseismic event

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментально подтвержденное явление сейсмической эмиссии сделало возможным использование подходов, рассматривающих микросейсмические шумы как самостоятельный источник информации [Кугаенко, 2001, 2005], и позволило решать задачи локализации и построения изображений распределения в пространстве сейсмически активных областей внутри заданного геологического объекта за ограниченный промежуток времени.

В работе рассматривается один из методов построения изображений шумового поля эндогенных сейсмических шумов, обладающих свойством когерентности. Подобным методам уделяется большое внимание как в зарубежных, так и в отечественных научных коллективах. В русскоязычной литературе их часто называют «методами эмиссионной томографии». Одним из первых практических применений

подобных методов является работа по построению сейсмоземиссионного изображения литосферы по данным группы NORSAR (Норвегия) [Nikolaev, Troitskiy, 1987], в которой была подтверждена гипотеза о существовании эндогенного микросейсмического излучения. В ряде работ активно исследуются сейсмоактивные, вулканические и геотермальные области [Tchebotareva et al., 2000; Кугаенко, 2001; Хогоев, Колесников, 2011; Frank, Shapiro, 2014; Langet et al., 2014]. В настоящее время модификации этой группы методов находят применение при мониторинге и разработке месторождений нефти и газа [Чеботарева, 2010б], исследовании зон субдукции [Kao, Shan, 2004], процесса гидроразрыва пласта [Maity et al., 2014], в контроле состояния горных выработок [Grigoli et al., 2013].

В основе этих методов лежит Back Projection (BP) технология поиска локального максимума функции интенсивности излучения (оценки меры когерентности) по заданной сетке в пространстве и времени при некоторых априорных предположениях об источнике излучения. По сути, функция интенсивности представляет собой суммирование сейсмических записей, сдвинутых на предварительно вычисленное время пробега в теоретические исходные точки. Например, в работе [Tchebotareva et al., 2000; Чеботарева, 2010а] функция интенсивности задается через меру подобия semblance [Neidell, Taner, 1971], имеющей достаточно хорошие статистические свойства [Douze, Laster, 1979] и дающей достоверную интерпретацию решения, учитывающего объем исходных данных. Авторы работы [Kao, Shan, 2004] в алгоритме сканирования источников предложили использовать функцию яркости «brightness function». В работе [Frank, Shapiro, 2014] вводится функция «beamformed network response». Более сложные подходы предложены в работах зарубежных ученых [Langet et al., 2014; Poiata et al., 2016].

В данной работе проводится исследование алгоритма локации источников микросейсмических событий методом направленного суммирования энергетических огибающих по сети станций. В основе алгоритма используется лучевая версия BP-технологии, позволяющая послойно визуализировать интенсивность сейсмического излучения. На синтетических данных проводится сравнительный анализ предложенного метода с методом, использующим меру подобия semblance.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

В основе рассматриваемого метода лежит гипотеза пространственной упорядоченности источников эндогенного сейсмического излучения. Пусть в момент времени t^* в некотором пространстве X происходит сейсмическое событие в точке $\vec{x}^* \in X$ с координатами $\vec{x}^* = (\varphi, \lambda, z)$, зарегистрированное сетью из N сейсмических станций с координатами $\vec{r}_i$ в записях волновых форм $u_i(t)$. Для любой точки $\vec{x} \in X$ определим функцию интенсивности излучения в момент времени $t \in T$ следующим образом:

$$p(\vec{x}, t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A(\vec{r}_i, \vec{x}) f_i(t - \tau(\vec{r}_i, \vec{x})), \quad (1)$$

где $\tau(\vec{r}_i, \vec{x})$ – теоретическое время пробега сейсмической волны от точки $\vec{x}$ до станции с координатами $\vec{r}_i$, рассчитанное в соответствии с априорной моделью годографа, $f_i(t)$ – характеристическая функция, являющаяся статистикой сигнала $u_i(t)$ на временном интервале T , $A(\vec{r}_i, \vec{x})$ – коэффициент геометрического расхождения сейсмических волн. Будем называть данную функцию BPI (Back Projection

Intensity) – функцией, отражающей отклик сети на потенциальный источник возбуждения сейсмического сигнала, находящегося в точке $\vec{x}$. Коэффициент геометрического расхождения от потенциального источника до станции будем вычислять следующим образом:

$$A(\vec{r}_i, \vec{x}) = \frac{r_0}{d(\vec{r}_i, \vec{x})}, \quad (2)$$

где r_0 – размер источника, аппроксимируемый единичной сферой, $d(\vec{r}_i, \vec{x})$ – длина пути от потенциального источника до приемника, вычисленная по априорной референтной модели. Характеристическую функцию зададим через энергетическую огибающую сейсмического сигнала:

$$f_i(t) = \int_{-T/2}^{T/2} u^2(t + \xi) d\xi. \quad (3)$$

Это позволит избежать синфазности сигналов, регистрируемых на разных станциях. Таким образом, оптимизируя функцию интенсивности (1) по всему трехмерному пространству, решается задача локализации сейсмического события:

$$p(\vec{x}^*, t) = \arg \max_{\vec{x} \in X} p(\vec{x}, t). \quad (4)$$

На рисунке 1 схематично представлена общая ВР-концепция рассматриваемого метода.

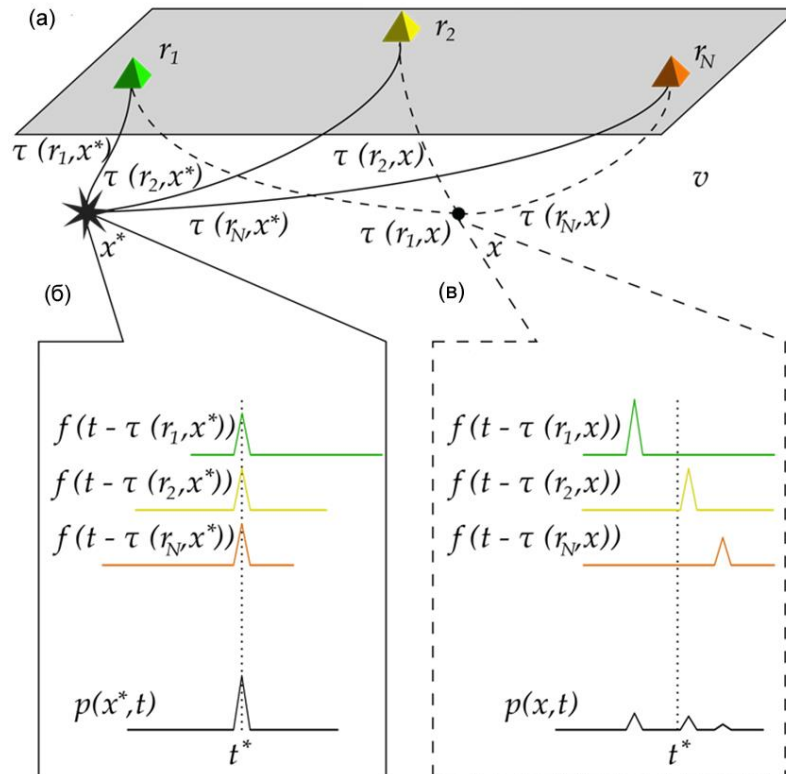


Рис. 1. Визуализация общей ВР-концепции: а – упрощенная схема приемников и времен пробега вдоль луча для двух точек среды; б – ВРI-функция в актуальном источнике сейсмического события; в – ВРI-функция в виртуальном источнике сейсмического события с некорректными временами пробега

Более того, при решении оптимизационной задачи (4) во временном пространстве, появляется возможность определения времени наступления сейсмического события:

$$p(\vec{x}^*, t^*) = \arg \max_{t \in T} p(\vec{x}^*, t). \quad (5)$$

Алгоритм локации источников микросейсмических событий методом направленного суммирования энергетических огибающих по сети станций можно разбить на несколько этапов:

1) подготовка исходных данных в соответствии с выбранной характеристической функцией (3);
 2) расчет $\tau(\vec{r}_i, \vec{x})$ априорных времен пробега из точек пространственной сетки гипотетических координат $\vec{x}$ источников до координат $\vec{r}_i$ каждой из N станций;

3) расчет четырехмерного распределения ВРП-функции (1) путем суммирования преобразованных данных в дискретном пространстве;

4) решение оптимизационной задачи (4) по трехмерной пространственной сетке при фиксированном пороговом значении p_d . Для любого пространственного среза ВРП-функции по переменной $j = (\varphi, \lambda, z)$ получаем набор локальных максимумов $p_c(t) = [p(\vec{x}_j, t)]$ в моменты времени выше порогового значения p_d , что при необходимости дает возможность строить изображение интенсивности излучения, отражающее наиболее вероятное расположение источника излучения в пространстве.

Эффективность предложенного метода исследована на тестовых модельных (синтетических) данных по реальной расстановке системы наблюдения на вулкане Горелый, Камчатка. Проведенное моделирование позволяет создавать наборы сейсмических данных в различных моделях геологической среды с заданным набором параметров. В ходе тестирования синтетические модели создавались в порядке приближения к реальной ситуации. Каждый рассчитанный набор данных характеризуется скоростной моделью, местоположением и характеристиками источника, уровнем и типом помех.

Ниже представлен способ моделирования сейсмических данных и основные результаты тестирования алгоритма локации микросейсмического излучения методом направленного суммирования по энергетической огибающей (3). Далее количественную оценку излучения (изображения проекций) будем обозначать ВРП (E). В работе проведен сравнительный анализ с алгоритмом локации, использующим ВРП-функцию на основе оценки меры подобия semblance, которую далее будем обозначать ВРП (S). Оценка ВРП (S) является отношением энергии суммарного по всем N станциям группы наблюдения сигнала к сумме энергии на каждой станции в отдельности, вычисляемым в каждой точке (сетки) исследуемой области с учетом геометрического расхождения $A(\vec{r}_i, \vec{x})$, т. е.

$$S(\vec{x}, t) = \frac{\int_T \left(\sum_{i=1}^N A(\vec{r}_i, \vec{x}) u_i(t + \xi - \tau(\vec{r}_i, \vec{x})) \right)^2 d\xi}{N \sum_{i=1}^N \int_T A^2(\vec{r}_i, \vec{x}) u_i^2(t + \xi - \tau(\vec{r}_i, \vec{x})) d\xi}. \quad (6)$$

СИНТЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАННЫХ

Моделирование полезного сигнала. Полезный сигнал, зарегистрированный всеми станциями системы наблюдений, рассчитывается через введение простой кинематической поправки времени пробега сейсмической волны от источника x_0 до станции с учетом геометрического расхождения. Сигнал в источнике задается экспоненциально затухающей синусоидой, форма которой во многом схожа с регистрируемыми цугами волн от землетрясений:

$$u_0(t) = e^{-\gamma t} \sin(\omega t), \quad (7)$$

где ω – преобладающая частота, γ – коэффициент затухания. На рисунке 2 приведен пример такого сигнала.

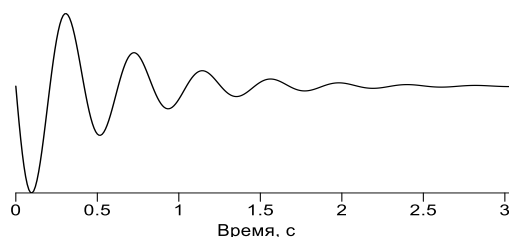


Рис. 2. Пример модельного полезного сигнала в источнике сейсмического события

Время пробега $\tau(\vec{r}_i, \vec{x})$ от точечного источника $\vec{x}$ до станции с координатами $\vec{r}$ рассчитывается по заданной скоростной модели методом изгиба луча. Скоростная модель задается градиентным возрастанием в пределах скоростей $[v_1, v_2]$ на фиксированных глубинах $[z_1, z_2]$ соответственно. Сигнал от источника, регистрируемый на станции, рассчитывается сдвигом на время $\tau(\vec{r}_i, \vec{x})$ и умножается на соответствующий длине луча коэффициент геометрического расхождения.

Моделирование помех. Предполагается, что аддитивная регулярная помеха является не коррелируемой и представляется суммой из 30 гармоник со случайными частотами, весами и фазовыми сдвигами (рис. 3) следующим образом:

$$\varepsilon_i(t) = \sum_{k=1}^{30} a_k \sin(\omega_k t - t_k). \quad (8)$$

Такие помехи характеризуют различные условия регистрации и более реалистичны, чем нормально распределенный «белый шум». Моделирование выполняется путем суммирования набора частот со случайными весами в полосе, содержащей частоту сигнала источника (от 0.5 до 15 Гц).

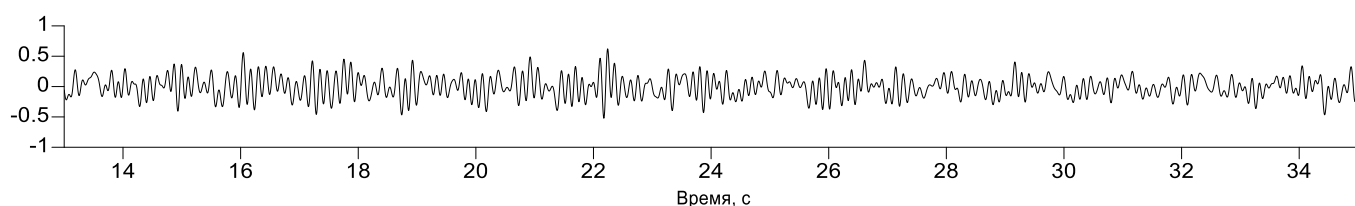


Рис. 3. Пример модельного аддитивного шума

Параметрическая помеха может быть вызвана скоростными неоднородностями в среде, геометрией расстановки группы приемников, спектром и характеристикой диаграммы направленности источника. Изменение формы сигнала от приемника к приемнику будем задавать в виде случайной нормально распределенной флуктуации фазы сигнала:

$$u_i(t + \tau(\vec{r}_i, \vec{x})) = e^{-j\varphi_i} \sin(\omega t + d\varphi_i). \quad (9)$$

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА НА СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Работоспособность и помехоустойчивость метода локации сейсмического излучения оценивались по результатам численного моделирования, в котором геометрия группы расстановки приемников соответствовала реальным 20 станциям на вулкане Горелый, Камчатка. Скоростная модель была задана градиентным возрастанием скорости с 1.3 км/с на высоте 2 км до 1.6 км/с на глубине 7 км. Синтетические сейсмограммы без помех моделировались для сигнала от источника частотой 5 Гц (рис. 4а).

Влияние аддитивной и параметрической помех на оценки BPI (E) и BPI (S) исследовалось как по отдельности, так и совместно. В качестве опорных для последующего анализа приведены данные без помех и результаты работы алгоритма с использованием каждой из оценок. Полученные результаты показывают, что в случае, когда нет ни аддитивных, ни параметрических помех, распределение функции BPI (S), использующей меру semblance, имеет главный максимум в точке, соответствующей фактическому положению источника, однако существуют и сильные ложные фокусировки (рис. 4б). Это связано с гармоничностью исходного сигнала и приводит к тому, что при сдвигах на времена равные периоду сигнала, мера подобия дает высокую оценку когерентности сигнала. Таким образом, в точках с априорными годографами, отличающимися от истинного на данный период, возникают ложные фокусировки, а в срезе по времени абсолютный максимум функции достигается на всей длительности сигнала.

С другой стороны, распределение функции BPI (E) (рис. 4в), несмотря на значительную неоднозначность в определении глубины, имеет единственный максимум, явно выраженный в срезе по времени и отчетливо просматриваемый в соответствующий момент на срезе по глубине.

В случае регулярной аддитивной помехи (9) распределение в пространстве каждой из функций BPI (S) и BPI (E) имеет единственный максимум, однако для параметра S показывает лучший результат, чем для E (рис. 5). На срезах распределения BPI-функций в соответствующий момент времени видно, что максимум с параметром S более резко маркирует истинное положение источника. С параметром E максимум менее выражен, однако соответствующее ему время и положение в пространстве близки к фактическим.

Тестирование алгоритма на синтетических данных, содержащих параметрические помехи в виде случайного фазового сдвига (9), показывает совершенно разные результаты их влияния на работоспособность алгоритма по параметрам S и E (рис. 6).

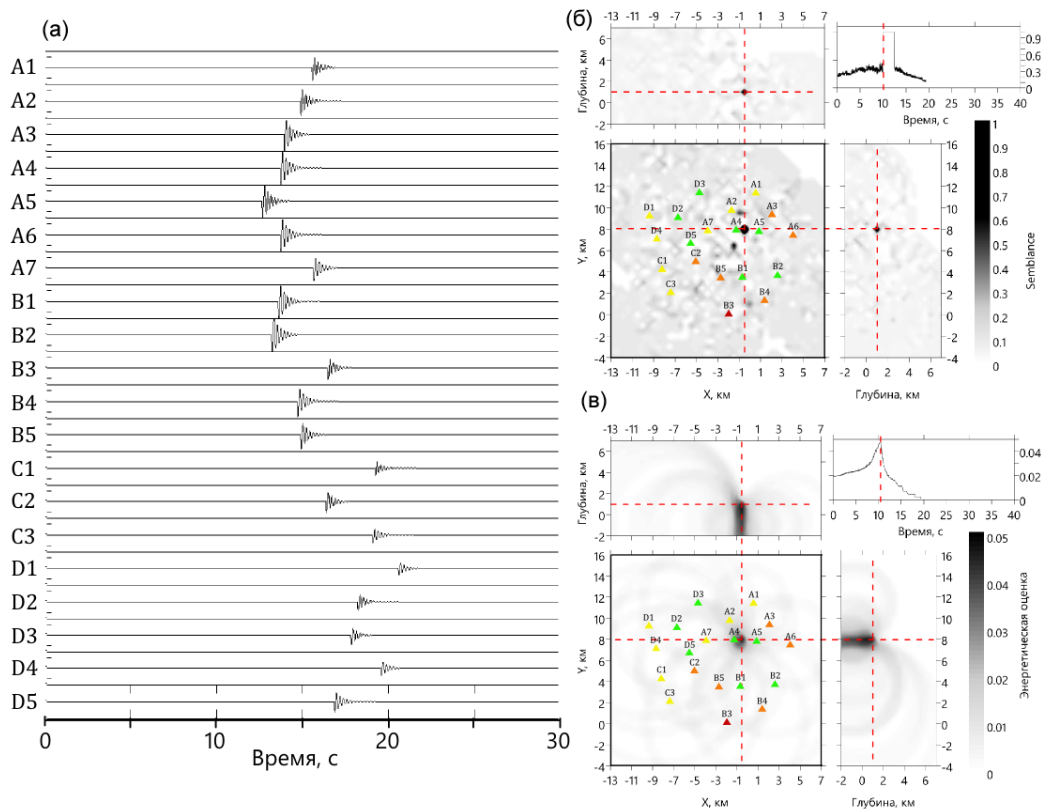


Рис. 4. Синтетические данные без помех (а), б – срезы 4D-распределения функции BPI (S), в – срезы 4D-распределения функции BPI (E)

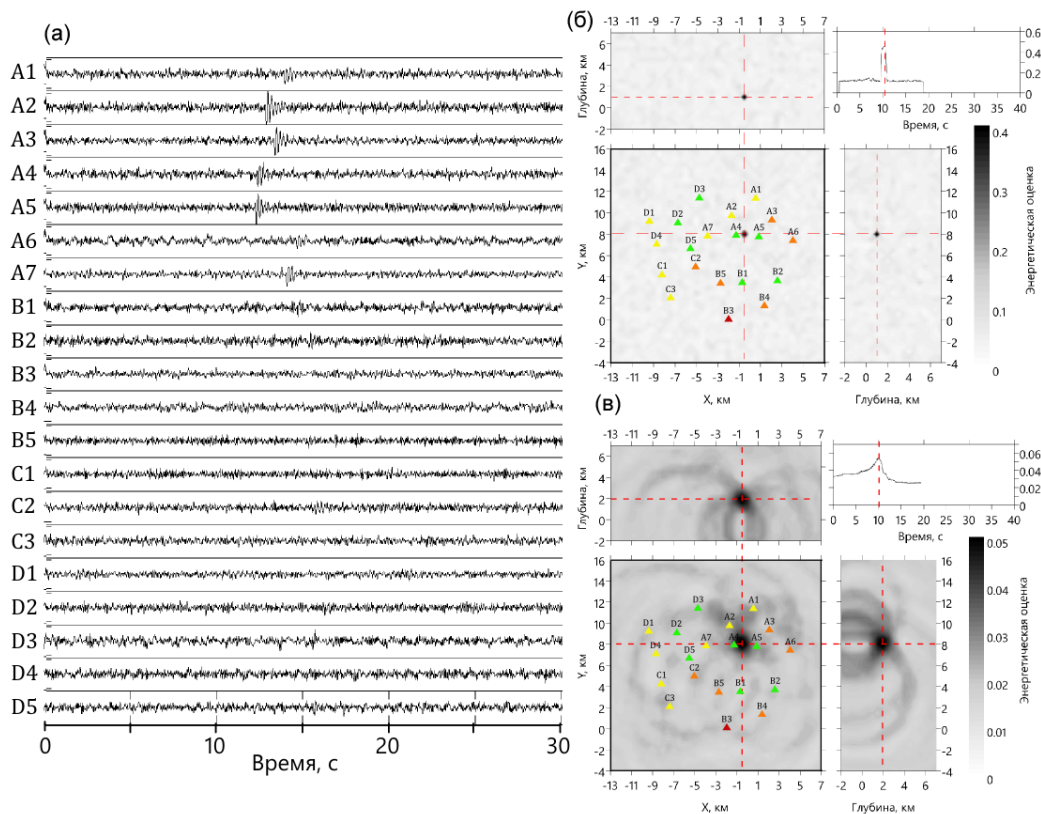


Рис. 5. Синтетические данные с аддитивной помехой в 70% от максимального уровня полезного сигнала (а), б – срезы 4D-распределения функции BPI (S), в – срезы 4D-распределения функции BPI (E)

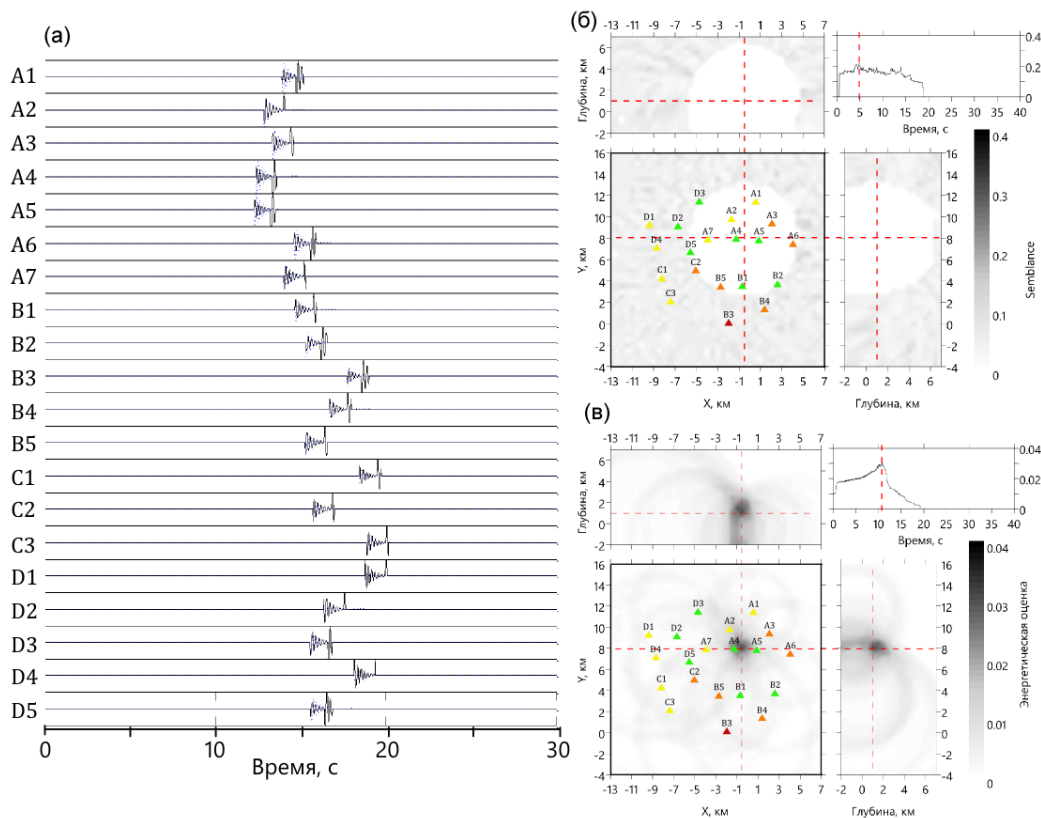


Рис. 6. Синтетические данные с параметрической помехой в виде случайного фазового сдвига (а), б – срезы 4D-распределения функции $BPI(S)$, в – срезы 4D-распределения функции $BPI(E)$

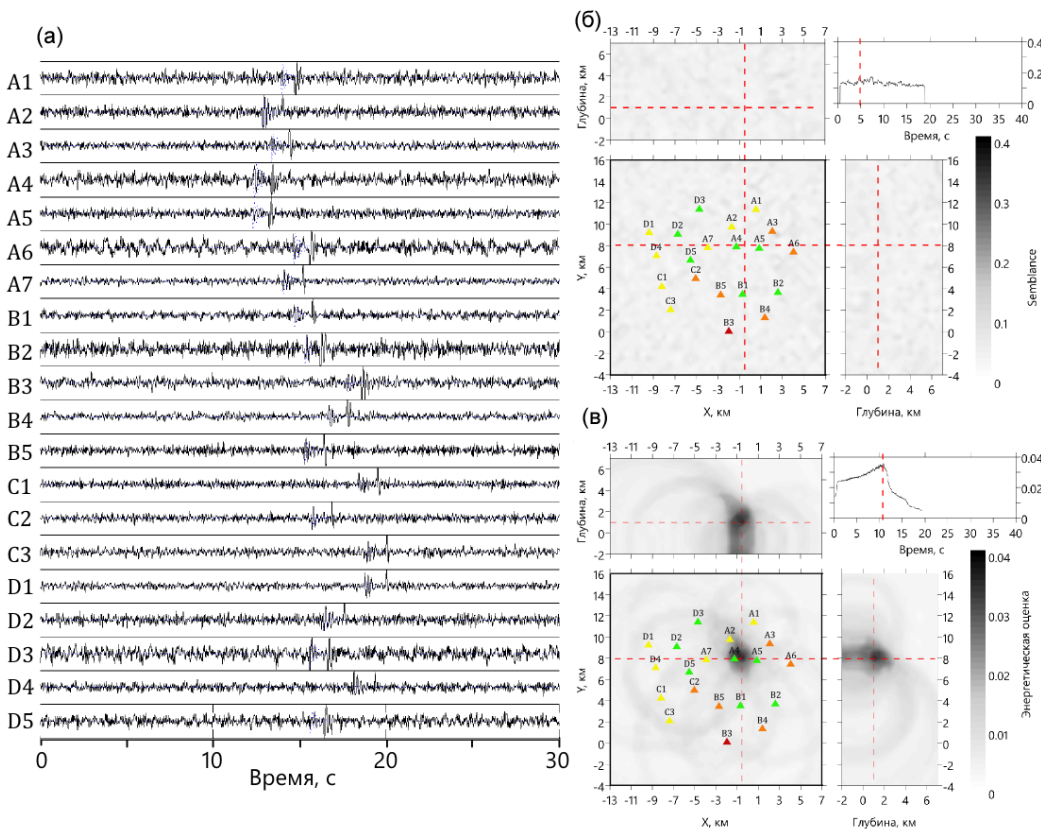


Рис. 7. Синтетические данные с аддитивной и параметрической помехой (а), б – срезы 4D-распределения функции $BPI(S)$, в – срезы 4D-распределения функции $BPI(E)$

Распределение функции BPI (S) в пространстве имеет ярко выраженную сферическую аномалию практически нулевого значения с центром в точке фактического положения источника и радиусом порядка 10 км (рис. 6б). Данный тест показывает сильное влияние изменения формы сигнала между станциями на меру подобия S. С другой стороны, максимум распределения функции BPI (E) соответствует правильному времени в источнике и его фактическому положению, что говорит об устойчивости к влиянию подобной параметрической помехи (рис. 6в).

Смоделированные синтетические данные, содержащие аддитивные и параметрические помехи, визуально очень схожи с реальными сейсмограммами (рис. 7а). Присутствие в них фазовых помех показывает результаты тестирования BPI-функции для параметра подобия S сомнительного качества, в то время как для энергетической огибающей E алгоритм демонстрирует хорошую устойчивость обнаружения сигнала и удовлетворительные результаты локации источника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численным моделированием проведено исследование алгоритма локации источников микросейсмических событий методом направленного суммирования энергетических огибающих на разрешающую способность и помехоустойчивость. Показано, что применение в алгоритме характеристической функции на основе энергетической огибающей дает результаты более устойчивые к аддитивным и параметрическим помехам по сравнению с мерой подобия semblance.

Отметим, что методы локации сейсмического излучения, в целом, не отличаются высокой разрешающей способностью. Во многом она определяется выбранной мерой когерентности и в некоторых случаях может быть увеличена путем перехода к использованию характеристических функций, в основе которых заложены оценки когерентности конкретных фаз записываемого сигнала. Оценки, основанные на вычислении огибающих, несколько ухудшают разрешающую способность, но в случае сильной зашумленности исходных данных позволяют сохранить присущую методу помехоустойчивость. Очевидна зависимость результатов работы метода от выбора априорной скоростной модели, однако это принципиальное ограничение всех сейсмических методов локации источников.

Разработанный программный комплекс и методика могут иметь широкое практическое применение и позволяют проводить исследование алгоритмов локации сейсмических событий на помехоустойчивость и работоспособность по более расширенному набору параметров, дают возможность подбирать более приемлемую характеристическую функцию при фиксированной геометрии системы наблюдений.

ЛИТЕРАТУРА

- 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.
- Кугаенко Ю.А.** Сейсмозмиссионная томография в вулканических районах Камчатки: Диссерт. на соиск. ст. канд. физ.-мат. наук. – М.: Изд-во МГУ, 2001. – 121 с.
- Хогоев Е.А., Колесников Ю.И.** Применение сейсмозмиссионной томографии для изучения геодинамически активных зон // Технологии сейсморазведки. – 2011. – Т. 1. – С. 59–65.

Чеботарева И.Я. Структура и динамика геосреды в шумовых сейсмических полях, методы и экспериментальные результаты: Диссерт. на соиск. ст. докт. физ.-мат. наук. – М.: ИПНГ РАН, 2010а. – 350 с.

Чеботарева И.Я. Новые алгоритмы эмиссионной томографии для пассивного сейсмического мониторинга разрабатываемых месторождений углеводородов. Ч. II: Результат обработки реальных данных // Физика Земли. – 2010б. – № 3. – С. 20–36.

Douze E.J., Laster S.J. Statistics of semblance // Geophysics. – 1979. – Vol. 44, No. 12. – P. 1999–2003.

Frank W.B., Shapiro N.M. Automatic detection of low-frequency earthquakes (LFEs) based on a beamformed network response // Geophysical Journal International. – 2014. – Vol. 197, No. 2. – P. 1215–1223, doi: 10.1093/gji/ggu058.

Grigoli F., Cesca S., Vassalo M., Dahm T. Automated seismic event location by travel-time stacking: an application to mining induced seismicity // Seismological Research Letter. – 2013. – Vol. 84, No. 4. – P. 666–677, doi: 10.1785/0220120191.

Kao H., Shan S. The Source-Scanning Algorithm: mapping the distribution of seismic sources in time and space // Geophysical Journal International. – 2004. – Vol. 157, No. 2. – P. 589–594, doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02276.x.

Langet N., Maggi A., Michelini A., Brenguier F. Continuous kurtosis-based migration for seismic event detection and location, with application to Piton de la Fournaise Volcano, La Reunion // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2014. – Vol. 104, No. 1. – P. 229–246, doi: 10.1785/0120130107.

Maity D., Salehi I., Ciezobka J. Semblance weighted emission mapping for improved hydraulic fracture treatment characterization // SEG Annual Meeting. – Denver, 2014. – P. 2203–2207.

Neidell N.S., Taner M.T. Semblance and other coherency measures for multichannel data // Geophysics. – 1971. – Vol. 36, No. 3. – P. 482–497.

Nikolaev A.V., Troitskiy P.A. Lithospheric studies based on array analysis of P-coda and microseisms // Tectonophysics. – 1987. – Vol. 140, No. 1. – P. 103–113, doi: 10.1016/0040-1951(87)90143-0.

Poiata N., Satriano C., Vilotte J.-P., Bernard P., Obara K. Multiband array detection and location of seismic sources recorded by dense seismic networks // Geophysical Journal International. – 2016. – Vol. 205, No. 3. – P. 1548–1573, doi: 10.1093/gji/ggw071.

Tchebotareva I.I., Nikolaev A.V., Sato H. Seismic emission activity of Earth's crust in Northern Kanto, Japan // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2000. – Vol. 120, No. 3. – P. 167–182, doi: 10.1016/S0031-9201(99)00163-6.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

АБРАМЕНКОВ Сергей Сергеевич – инженер лаборатории сейсмической томографии ИНГГ СО РАН. Основные научные интересы: методы сейсмической томографии, методы распознавания образов.

СТУПИНА Татьяна Александровна – к.ф.-м.н., научный сотрудник лаборатории сейсмической томографии ИНГГ СО РАН. Основные научные интересы: геостатистика, обработка и анализ сейсмических данных, методы построения оценок качества моделей.

КУЛАКОВ Иван Юрьевич – д.г.-м.н., член-корреспондент РАН, заместитель директора ИНГГ СО РАН. Основные научные интересы: численные методы решения прямых и обратных задач геофизики, методы сейсмической томографии, методы сейсмической томографии.