

## Выбор метода микросейсмических исследований в зависимости от решаемой задачи

Е.В. Биряльцев, М.Р. Камилов\*  
ЗАО «Градиент», Казань, Россия

В статье приводится сравнение двух методов микросейсмических исследований – метода максимума правдоподобия и метода Кейпона, для детектирования положения микросейсмического события при наблюдении с поверхности в условиях разрабатываемого месторождения или проведения мониторинга гидроразрыва пласта. Приведены результаты вычислительных экспериментов по определению точности локализации модельного микросейсмического события в пространстве, а также при различных уровнях шума, при различных типах микросейсмических событий и при выделении повторяющихся событий. По результатам экспериментов делается вывод, что задачи выявления неповторяющихся событий более уверенно решаются методом максимума правдоподобия, в то время как для задач выявления зон повышенной трещиноватости лучше всего подходит метод Кейпона.

**Ключевые слова:** мониторинг гидроразрыва пласта, мониторинг естественной трещиноватости, микросейсмические события, метод максимума правдоподобия, метод сверхразрешения, метод Кейпона, тензор сейсмического момента

**Для цитирования:** Биряльцев Е.В., Камилов М.Р. (2018). Выбор метода микросейсмических исследований в зависимости от решаемой задачи. *Георесурсы*, 20(3), Ч.2, с. 217-221. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2018.3.217-221>

### Введение

Локализация микросейсмических событий все более применяется в нефтегазовой геофизике для решения различных геологических и технологических задач. Основными областями применения микросейсмических технологий являются мониторинг гидроразрыва пласта (ГРП) для оптимизации последующего освоения и мониторинг естественной трещиноватости. Мониторинг естественной трещиноватости позволяет определить зоны повышенной трещиноватости, что используется для оптимизации сетки скважин. Большой интерес для решения задач геомеханики представляет определение направления как трещин гидроразрыва, так и естественной трещиноватости.

Очевидно, что такое разнообразие решаемых задач не может быть покрыто одним методом и даже одним подходом локализации микросейсмического события. Известно достаточно большое количество методов локализации (Anikiev et al., 2014; Gajewski et al., 2007; Gajewski, Tessmer, 2005; Gharti et al., 2011), предпринимаются попытки их сопоставления (Kushnir et al., 2014; Maxwell, 2014). К сожалению, сопоставление зачастую производится без учета решаемой задачи, шумовой обстановки, точности знания скоростной характеристики среды. Ниже мы приводим сопоставление двух наиболее популярных подходов к локализации микросейсмического события для решения различных задач и делаем вывод об оптимальной области их применения.

### Известные теоретические подходы к локализации микросейсмического события

В настоящее время известны два подхода к локализации

микросейсмических событий. Первый подход, к которому относятся методы дифракционного суммирования (Anikiev et al., 2014; Gajewski et al., 2007), моделирования в обратном времени (Gajewski, Tessmer, 2005; Gharti et al., 2011) и методы максимума правдоподобия (Biralteev et al., 2017), позволяет восстанавливать интенсивность микросейсмических событий в пространстве и времени с точностью до частоты дискретизации сигнала на приемнике. Этот подход оперирует при восстановлении положения микросейсмического события непосредственно отсчетами полевых сигналов.

Второй подход (Kushnir et al., 2014), который известен как методы сверхразрешения или спектральные методы, основан на восстановлении местоположения микросейсмического сигнала конечной длительности, который накапливается за этот промежуток и только затем определяется его местоположение. Время возникновения микросейсмического события определяется, в этом случае, с точностью до интервала накопления, однако точность определения пространственных координат микросейсмического события значительно выше, чем для методов первого подхода.

Различие в подходах можно пояснить, рассматривая математические допущения, лежащие в основе этих подходов. Для общности будем рассматривать микросейсмическое событие, используя тензор сейсмического момента, введенного Аки и Ричардсом (Aki, Richards, 1980), что позволяет объединить в одном микросейсмическом событии раскрытие/закрытие трещины и сдвиговые движения.

Обозначим величины компонент тензора сейсмического момента через  $M_i$ , где  $i$  – компонент тензора сейсмического момента. Представим расстановку из  $k=1..K$  датчиков и обозначим регистрируемый на них сигнал как  $z_k(t)$ . Регистрируемый сигнал можно рассматривать как сумму шума  $n_k(t)$  и полезного сигнала  $s_k^i$  от микросейсмического события с магнитудой  $M$ :

$$z_k(t) = n_k(t) + \sum_i M^i s_k^i(t) \quad (1)$$

\* Ответственный автор: Марсель Робертович Камилов  
E-mail: [m.kamilov@gradient-geo.com](mailto:m.kamilov@gradient-geo.com)

Матрица ковариации вектора регистрируемых сигналов  $Z$  на датчиках имеет общий вид:

$$\begin{aligned} \text{cov}(Z) &= \text{cov}(N + \sum_i M^i S^i) = \text{cov}(N) + \\ &+ \text{cov}(N, \sum_i M^i S^i) + \text{cov}(\sum_i M^i S^i) \end{aligned} \quad (2)$$

Полная матрица ковариации в (2) состоит из матрицы ковариации шума, матрицы ковариации сигнала и матрицы взаимной ковариации шума и сигнала.

Матрица взаимной ковариации является матрицей рассеяния, для задач локации активных микросейсм мы полагаем ее тождественно равной нулю. В первом подходе мы полагаем, что матрица ковариации сигнала пренебрежимо мала и ковариации полевого сигнала обуславливаются только ковариацией шумов. Во втором подходе мы предполагаем, что ковариация сигнала больше ковариаций шума и матрица ковариаций полевого сигнала при достаточном времени накопления соответствует ковариации полезного сигнала от микросейсмического события.

Для первого подхода наиболее общим методом, включающим в себя как частные случаи методы дифракционного суммирования и моделирования в обратном времени, является метод максимума правдоподобия. В (Birialtsev et al., 2017) показано, что мы можем определить тензор сейсмического момента, решая систему уравнений

$$\sum_k a_{1k} M^k = b_1 \quad (3)$$

где

$$a_{1m} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij}^{-1} (s_i^m s_j^1 + s_j^m s_i^1) \quad (4)$$

$$b_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij}^{-1} (z_i s_j^1 + z_j s_i^1) \quad (5)$$

Таким образом, если мы пренебрегаем матрицей ковариации полезного сигнала, то уравнения относительно компонент тензора сейсмического момента являются линейными и решаются относительно легко.

Очевидно также, что подобное решение неприменимо для второго подхода, так как матрица ковариации полевого сигнала в этом случае нелинейно зависит от компонент тензора сейсмического момента. Для второго подхода мы вынуждены пока предполагать, что источник микросейсм является центром расширения, все компоненты тензора которого равны.

Методы сверхразрешения базируются на следующем подходе. Из полевых данных мы имеем функцию ковариации  $\text{cov}(Z)$ , которая состоит из ковариаций полезного сигнала. Строится вектор модельного сигнала  $S(r)$ , зависящий от положения источника в пространстве  $r$ , и для набора положений  $r$  строится значение тестовой функции:

$$F(r) = \frac{1}{S(r) \text{cov}(Z)^{-n} S(r)^T} \quad (6)$$

Максимум  $F(r)$  соответствует положению одного из источников микросейсм. Показатель  $-n$  при функции ковариации соответствует различным методам в рамках подхода сверхразрешения,  $n=1$  соответствует исторически первому и наиболее помехоустойчивому методу сверхразрешения, методу Кейпона.

### Вычислительные эксперименты

Для практического сопоставления применимости первого и второго подходов при решении различных геологических и технологических задач были проведены ряд вычислительных экспериментов с методом максимума

правдоподобия и методом Кейпона как наиболее типичными представителями обоих подходов. Оба метода были реализованы в изложенной постановке. Модельный эксперимент производился для случая однородной среды со скоростью  $V_p$  в следующих условиях (Рис. 1).

Модельные датчики в количестве 225 единиц располагались равномерно на площади в 1 квадратный километр. Источник сигнала располагался под центром площади на глубине 500 метров. Восстановление положения сигнала производилось по такой же сетке в плоскости источника в 4-х плоскостях выше и ниже источника с шагом 50 метров по вертикали. Сигнал модельного источника имел вид вейвлета Пузырева с центральной частотой 25 Гц.

В первом эксперименте (Рис. 2) было проверено утверждение о более высоком разрешении методов сверхразрешения по сравнению с методом максимума правдоподобия. Действительно, область локализации микросейсма в плоскости источника выглядит более выраженной, однако размазанность этой области по вертикали существенно больше, чем у метода максимума правдоподобия.

Второй эксперимент проводился с целью сопоставления помехоустойчивости методов Кейпона и метода максимума правдоподобия в горизонтальной плоскости микросейсмического события. Верхняя группа изображений на рис. 3 соответствует методу максимума правдоподобия, нижняя – методу Кейпона. Отношение сигнал/шум соответствует 1/7, 1/12, 1/17 слева направо соответственно.

Видно, что при низком уровне шума выраженность локализации микросейсмического события у метода Кейпона значительно выше, чем у метода максимума правдоподобия, однако при увеличении уровня шума метод Кейпона резко теряет в достоверности, начинают появляться артефакты, сопоставимые по уровню с реальным положением микросейсма, а при дальнейшем увеличении шума реальный источник не диагностируется. Метод максимума правдоподобия напротив, демонстрирует плавное снижение выраженности области локализации микросейсма при умеренном уровне артефактов для всех исследованных уровней шума.

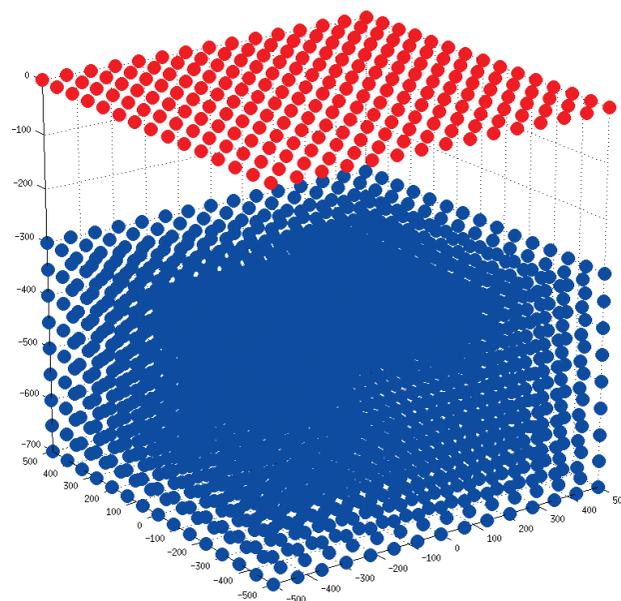


Рис. 1. Схема вычислительного эксперимента

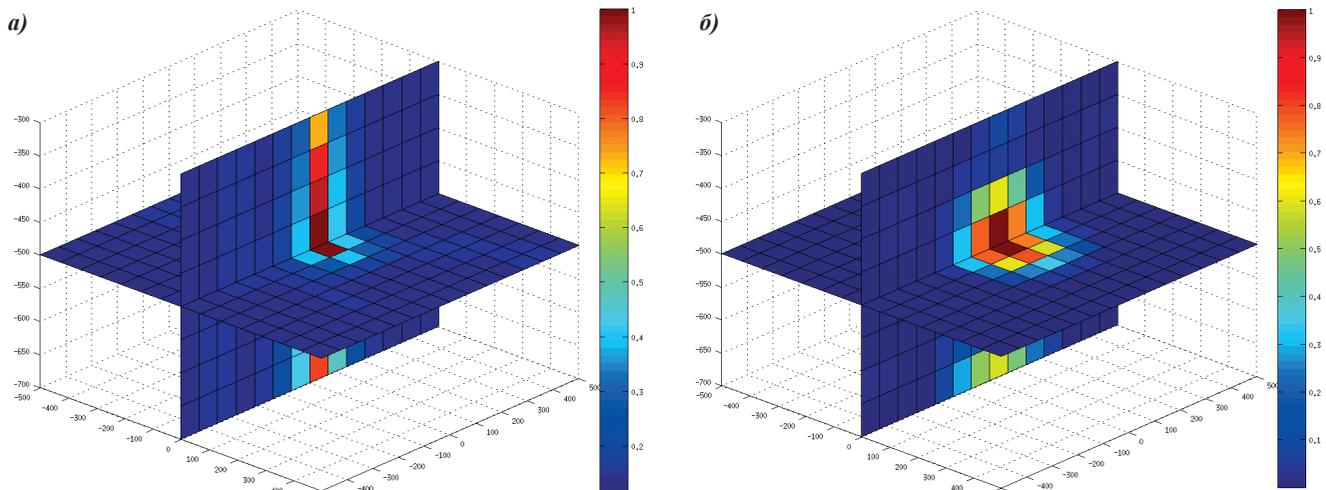


Рис. 2. Точность локализации модельного микросейсма методами Кейпона (а) и максимума правдоподобия (б) в пространстве для низкого уровня шума

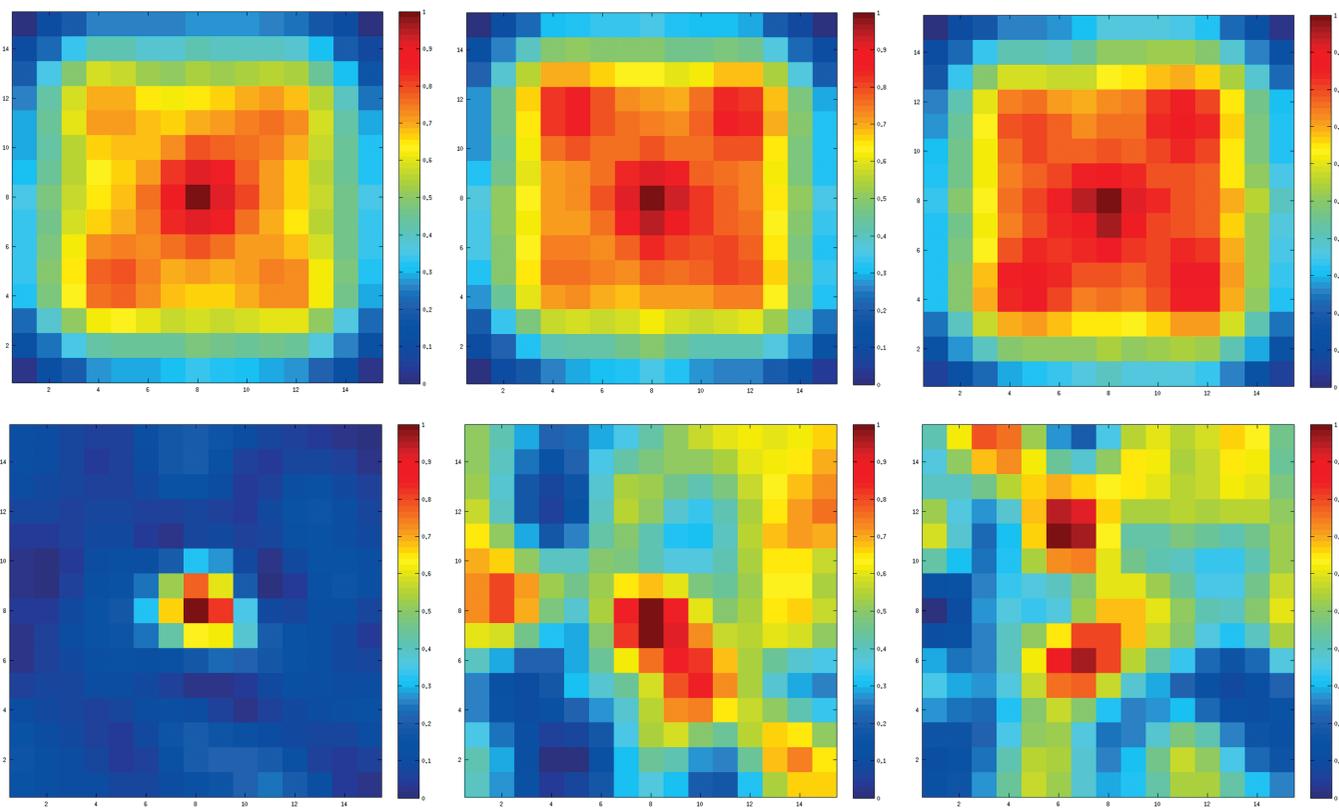


Рис. 3. Сопоставление точности локализации микросейсм методом Кейпона и методом максимума правдоподобия для различных уровней шума

Следующий вычислительный эксперимент проводился с целью определения возможности восстановления положения микросейсмического события при различных типах микросейсмических событий. Как можно видеть на рис. 4, события типа центр расширения и трещина отрыва восстанавливаются точно, а событие сдвигового характера вызвало появление вытянутого артефакта с максимумом на значительном удалении от реального места события.

Вышеуказанные эксперименты производились с единичными событиями. В ряде случаев микросейсмические события имеют повторяющийся характер, например при событии естественной трещиноватости или длительном воздействии на пласт заводнением или термическими методами.

В последнем эксперименте была сопоставлена помехоустойчивость методов максимума правдоподобия и Кейпона для выделения повторяющихся событий. Для данного эксперимента был сгенерирован псевдополевой сигнал, состоящий из белого шума и аперiodически появляющихся модельных сигналов. Были проведены эксперименты с уровнями сигнал/шум в 1/10, 1/20 и 1/50. Метод максимума правдоподобия использовался для выделения отдельных сигналов с выделением лучшего варианта восстановления, метод Кейпона использовался с двумя временами накопления 15 минут и 2.5 часа модельного времени. Результат представлен на рис. 5. Хорошо видно, что при уменьшении отношения сигнал/шум в методе максимума правдоподобия появляются

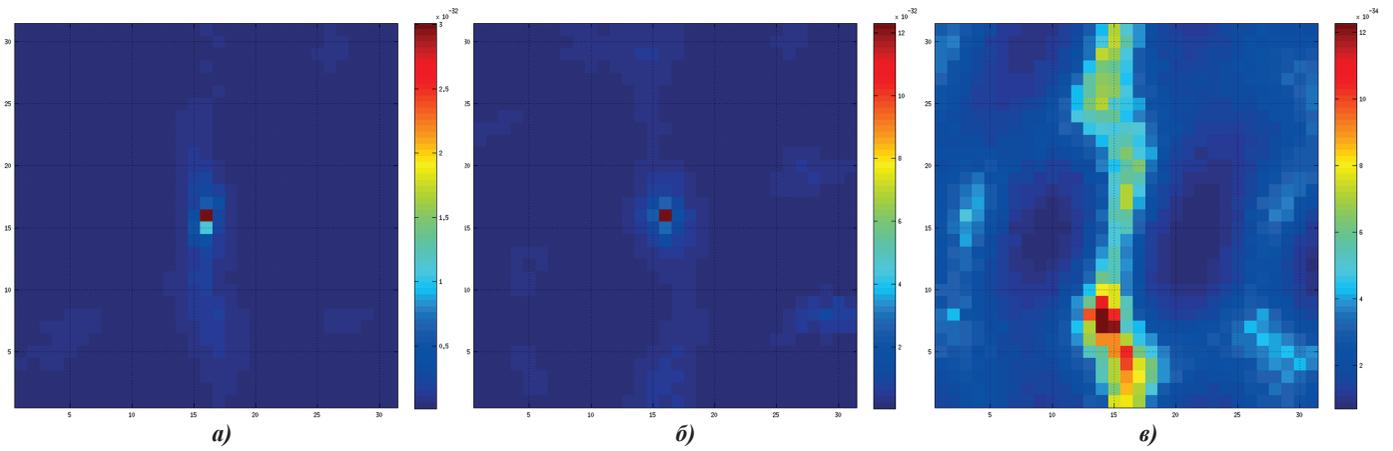


Рис. 4. Локализация методом Кейпона событий различных типов: центр расширения (а), трещина отрыва (б) и сдвиг (в)

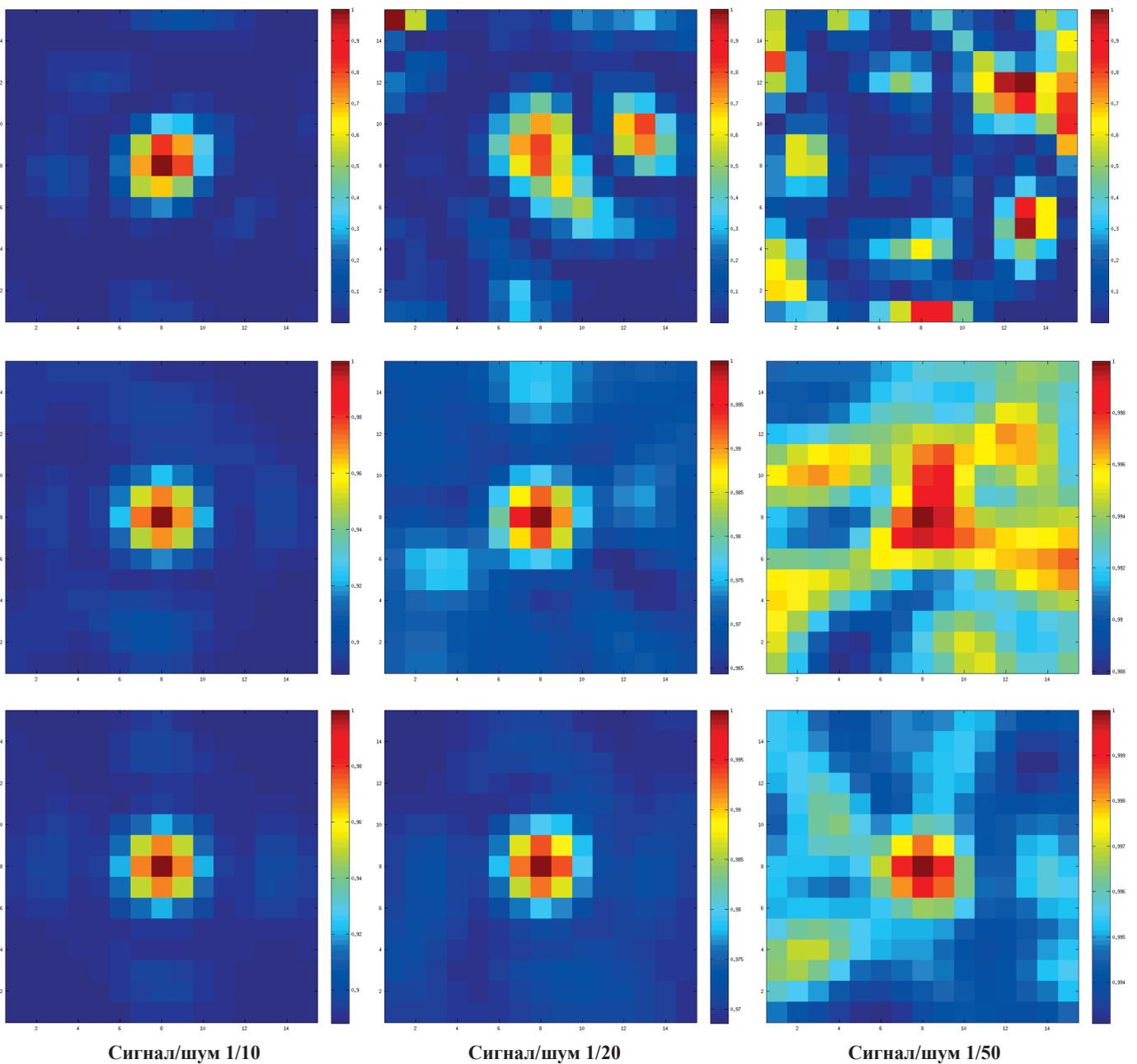


Рис. 5. Сопоставление метода максимума правдоподобия (верхний ряд) и метода Кейпона со временем накопления 15 минут (средний ряд) и 2.5 часа (нижний ряд) для различного уровня сигнал/шум

артефакты и при увеличении шума полезный сигнал не детектируется. Единственный способ улучшить помехоустойчивость метода максимума правдоподобия в

этом случае – увеличение количества датчиков. Метод Кейпона позволяет улучшить помехоустойчивость путем увеличения времени накопления.

## Заключение

Проведенные эксперименты показали, что оба исследованных подхода не универсальны. Задачи выявления неповторяющихся событий, особенно в условиях высоких поверхностных шумов, например при мониторинге ГРП, более уверенно решаются методом максимума правдоподобия, который также позволяет рассчитать тензор сейсмического момента, что дает возможность выявить тип микросейсмического события и направление породившей его трещины.

Выявление зон повышенной трещиноватости, особенно когда известен целевой горизонт, и мониторинг зон заводнения и термического воздействия на пласт более уверенно решаются методами сверхразрешения типа метода Кейпона.

Наиболее сложные и актуальные задачи, такие как определение направления естественной трещиноватости, должны решаться комбинированным применением обоих методов.

## Благодарности

Исследования и подготовка публикации проведены при поддержке грантов РФФИ №№ 18-47-160010 и 18-07-00964.

## Литература

Aki K., Richards P.G. (1980). Quantitative seismology: Freeman and Co.  
Anikiev D., Valenta J., Stanek F. and Eisner L. (2014). Joint location and source mechanism inversion of microseismic events: benchmarking on seismicity induced by hydraulic fracturing. *Geophys. J. Int.*, 198, pp. 249-258.

Biryaltsev E.V., Demidov D.E., Mokshin E.V. (2017). Determination of moment tensor and location of microseismic events under conditions of highly correlated noise based on the maximum likelihood method. *Geophysical prospecting*, pp. 1-17. DOI: 10.1111/1365-2478.12485.

Gajewski D., Anikiev D., Kashtan B., Tessmer E. & Vanelle C. (2007). Localization of seismic events by diffraction stacking, *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 26(1), pp. 1287-1291.

Gajewski D. and Tessmer E. (2005). Reverse modelling for seismic event characterization. *Geophys. J. Int.*, 163(1), pp. 276-284.

Gharti H., Oye V., Kühn D. and Zhao P. (2011). Simultaneous microearthquake location and moment tensor estimation using time reversal imaging. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 319, pp. 1632-1637.

Kushnir A., Varypaev A., Dricker I., Rozhkov M. and Rozhkov N. (2014). Passive surface microseismic monitoring as a statistical problem: location of weak microseismic signals in the presence of strongly correlated noise. *Geophys. J. Int.*, 198(2), pp. 1186-1198.

Maxwell S.C. (2014). Microseismic Imaging of Hydraulic Fracturing: Improved Engineering of Unconventional Shale Reservoirs. Distinguished Instructor Short Course No 17, Society of Exploration Geophysicists Tulsa Ok. <https://doi.org/10.1190/1.9781560803164>

## Сведения об авторах

Евгений Васильевич Биряльцев – канд. тех. наук, зам. генерального директора по науке и новым технологиям ЗАО «Градиент»  
Россия, 420045, Казань, ул. Николая Ершова, 29

Марсель Робертович Камиллов – Ведущий инженер ЗАО «Градиент»  
E-mail: m.kamilov@gradient-geo.com

Статья поступила в редакцию 02.07.2018;  
Принята к публикации 25.07.2018; Опубликована 30.08.2018

IN ENGLISH

## Method selection of microseismic studies depending on the problem being solved

E.V. Biryaltsev, M.R. Kamilov\*

Gradient CJSC, Kazan, Russian Federation

\*Corresponding author: Marsel R. Kamilov, e-mail: m.kamilov@gradient-geo.com

**Abstract.** The article compares two methods of microseismic studies of the maximum likelihood method and the Keipon method for detecting the position of microseismic event when observed from the surface in the conditions of the developed deposit or by monitoring the hydraulic fracturing. The results of computational experiments for determining the accuracy of localization of model microseism in space, as well as for various noise levels, for various types of microseismic events and for the allocation of recurring events are presented. Based on the results of the experiments, the conclusion is drawn that the problems of identifying non-recurring events are more confidently solved by maximum likelihood methods, while for the detection of zones of increased fracturing, the method of Keipon is best suited.

**Keywords:** hydraulic fracturing monitoring, natural fracturing monitoring, microseismic events, maximum likelihood method, superresolution method, Keipon method, seismic moment tensor

**Recommended citation:** Biryaltsev E.V., Kamilov M.R. (2018). Method selection of microseismic studies depending on the problem being solved. *Georesursy = Georesources*, 20(3), Part 2, pp. 217-221. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2018.3.217-221>

**Acknowledgements.** This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grants Nos. 18-47-160010, 18-07-00964.

## References

Aki K., Richards P.G. (1980). Quantitative seismology: Freeman and Co.  
Anikiev D., Valenta J., Stanek F. and Eisner L. (2014). Joint location and source mechanism inversion of microseismic events: benchmarking on seismicity induced by hydraulic fracturing. *Geophys. J. Int.*, 198, pp. 249-258.

Biryaltsev E.V., Demidov D.E., Mokshin E.V. (2017). Determination of moment tensor and location of microseismic events under conditions of highly correlated noise based on the maximum likelihood method. *Geophysical prospecting*, pp. 1-17. DOI: 10.1111/1365-2478.12485.

Gajewski D., Anikiev D., Kashtan B., Tessmer E. & Vanelle C. (2007). Localization of seismic events by diffraction stacking, *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 26(1), pp. 1287-1291.

Gajewski D. and Tessmer E. (2005). Reverse modelling for seismic event characterization. *Geophys. J. Int.*, 163(1), pp. 276-284.

Gharti H., Oye V., Kühn D. and Zhao P. (2011). Simultaneous microearthquake location and moment tensor estimation using time reversal imaging. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 319, pp. 1632-1637.

Kushnir A., Varypaev A., Dricker I., Rozhkov M. and Rozhkov N. (2014). Passive surface microseismic monitoring as a statistical problem: location of weak microseismic signals in the presence of strongly correlated noise. *Geophys. J. Int.*, 198(2), pp. 1186-1198.

Maxwell S.C. (2014). Microseismic Imaging of Hydraulic Fracturing: Improved Engineering of Unconventional Shale Reservoirs. Distinguished Instructor Short Course No 17, Society of Exploration Geophysicists Tulsa Ok. <https://doi.org/10.1190/1.9781560803164>

## About the Authors

Evgeny V. Biryaltsev – PhD (Engineering) Deputy Director General for Science and New Technologies, Gradient CJSC  
N.Ershov st., 29, Kazan, 420045, Russian Federation

Marcel R. Kamilov – Leading engineer, Gradient CJSC  
N.Ershov st., 29, Kazan, 420045, Russian Federation

Manuscript received 02 July 2018;  
Accepted 23 July 2018; Published 30 August 2018