

**О1 Мониторинг многостадийного ГРП с дневной поверхности с применением метода максимального правдоподобия. Теоретические подходы и практические результаты.**

В.А. Рыжов, Е.В. Биряльцев

(ЗАО «Градиент», Казань)

**Results of multistage hydraulic fracture microseismic monitoring from the surface with application the maximum likelihood method. Theoretical approaches and practical results.**

V.A.Rizhov, E.V. Birialtsev

(Gradient JSC, Kazan)

**Аннотация**

Рассматривается подход к мониторингу распространения трещины ГРП микросейсмическими методами при наблюдении микросейсм, порожденных трещиной гидроразрыва, с дневной поверхности. Анализируется требуемая аппаратура, методика наблюдений и методика обработки. Приводятся результаты опытного применения данного подхода при мониторинге многостадийного гидроразрыва в горизонтальном стволе. Делаются оценки точности локализации трещины ГРП данным методом в плане и в разрезе.

**Abstract**

There is considers an approach to the microseismic monitoring from the surface of hydraulic fracture propagation. There is analyzed the required equipment, methods of observation and data processing. Results of pilot application of this approach to monitoring multistage fracturing in horizontal wellbore are presented. The estimations of accuracy of localization the fracture by this method in plan and in section are calculated.

## **Введение**

Технологии мониторинга микросейсмической эмиссии в геологической среде уже достаточно широко применяются для решения задач разработки месторождений нефти в России и за рубежом. Одним из приложений мониторинга сейсмической эмиссии является мониторинг гидроразрыва пласта (ГРП) [1]. Рассмотрим три способа наблюдения: 1) с поверхности, 2) в скважинах, 3) совместно с поверхности и со скважин. При наблюдении с поверхности достигается высокая оперативность проведения работ и достаточно хорошая точность локализации по горизонтали, однако проблемы составляют шумы от поверхностных источников, неточное знание ВЧР, влияние погодных и сезонных факторов. Наблюдения со скважин сопровождаются трудоемкими монтажно-демонтажными работами при этом можно получить достаточно высокую точность локализации по вертикали с рядом осложнений в виде гула колонны, проблем с плохой обсадкой колонны. При совместных наблюдениях может быть достигнута высокая точность, однако необходимо решать все проблемы наблюдений с поверхности и со скважин, что снижает оперативность и повышает трудозатраты.

Для задачи мониторинга ГРП первостепенной является точность локализации по горизонтали, поэтому в большинстве случаев наблюдения с поверхности это наиболее оптимальный вариант мониторинга ГРП. Рассмотрим методические особенности мониторинга ГРП с поверхности.

## **Аппаратура**

Первостепенной задачей для осуществления мониторинга ГРП является выбор регистрирующей аппаратуры. Особенность работ по локализации источников микросейсм от трещины ГРП заключается в необходимости локализации очень слабых сигналов, значительно слабее тех, которые порождаются вибраторами и взрывами в активной сейсморазведке. Возникает вопрос, достаточна ли чувствительность сейсмических сенсоров для регистрации данных сигналов или требуется более чувствительное сейсмологическое оборудование.

Сопоставим стандартные сейсморазведочные геофоны на примере GS-20DX и сейсмологические велосиметры на примере СМЕ-4111-LT. На рис. 1. представлены спектрограммы данных записей, записанных разными датчиками в одно и то же время. Хорошо видно, что сейсмический датчик регистрирует только самые высокоэнергетические импульсы. На записях сейсмологического датчика хорошо видна структура природных шумов

(диапазон от 0 до 15 Гц). Из сопоставления числовых записей регистрируемых сигналов следует, что мощность собственных шумов сейсмического геофона в его рабочем диапазоне (выше 10 Гц) превышает мощность собственных шумов сейсмологического датчика не менее чем на порядок по амплитуде.

При необходимости компенсации недостатка чувствительности количеством сенсоров, их количество необходимо увеличить квадратично относительно падения чувствительности. Так, при падении чувствительности в 2 раза, это падение может быть скомпенсировано увеличением количества датчиков в 4 раза. При отличии чувствительности в 10 раз, количество датчиков должно быть больше в 100 раз. Учитывая, что сейсмометр СМЕ-4111-ЛТ трехканальный, а геофоны одноканальные, мы получаем, что 1000 геофонов с чувствительностью в 10 раз меньшей, чем у СМЕ-4111-ЛТ, эквивалентны  $1000/100/3 = 3.3$  датчикам. Результат, конечно, может несколько количественно меняться при использовании других геофонов и цифровых регистраторов.

Таким образом, для наземного мониторинга ГРП предпочтительнее использовать сейсмологическое оборудование.

### **Методика проектирования схемы наблюдения**

Важным методическим вопросом является способ расстановки датчиков. Необходимо оптимизировать расстановку таким образом, чтобы максимизировать полезный сигнал. При этом необходимо учитывать следующие факторы.

Расстановка, совместно с параметрами фокусировки образует антенну с пространственной диаграммой направленности, главный лепесток которой имеет максимум в исследуемой точке. Однако расстановка, как любая антенна, имеет и боковые лепестки диаграммы направленности. При попадании в боковой лепесток мощного источника шума мы будем иметь в главном фокусе паразитный сигнал. При мониторинге ГРП такой источник всегда имеется в виде флота ГРП. Также значительными источниками шума могут являться работающие в непосредственной близости добывающее оборудование скважины, производственные объекты и другие техногенные источники.

Наиболее мощным источником шума обычно является флот ГРП. Как поверхностный источник он порождает шум в виде волны Релея, энергия которых падает с расстоянием как  $1/R$ . Искомые же сигналы от трещины ГРП

являются объемными волнами, энергия которых падает с расстоянием как  $1/R^2$ . Учитывая, что флот ГРП располагается приблизительно над забоем скважины и, соответственно, над местом образования трещины, можно выделить область, в которой отношение сигнал/шум будет максимальным. Эта область имеет форму кольца, охватывающего забой и флот ГРП. Расстановка датчиков внутри кольца максимума сигнал/шум необходимо провести таким образом, чтобы в пространственной диаграмме направленности в точке расположения флота ГРП не образовывалось значительного бокового лепестка.

### **Обработка данных методом максимального правдоподобия**

Задача локализации микросейсмических источников является хорошо известной в радиотехнике задачей обнаружения сигналов при многоканальном приеме и решается разными методами. Применительно к задаче локализации источника микросейсм они обладают различной точностью локализации, устойчивостью к шумам и вычислительной сложностью [2, 3]. Известно также, что одним из наиболее информативных методов является метод обнаружения сигналов на основе максимума правдоподобия (МП). В отличие от более простых методов, например, дифракционного суммирования, метод МП требует знания формы сигнала, а не только времени первого вступления. С использованием современных средств полноволнового моделирования и суперкомпьютерных комплексов [4] такой расчет вполне возможен за практически приемлемое время, что делает наиболее мощный метод МП доступным инструментом для локализации слабых микросейсм.

### **Практические результаты**

Для апробации рассматриваемого метода микросейсмического мониторинга многоступенчатого ГРП была выбрана скважина с горизонтальным стволом в толще турнейских отложений, расположенная в южной части западного склона Южно-Татарского свода. Фактическая схема наблюдения при мониторинге ГРП (рис. 2) проектировалась с учетом расположения датчиков в зоне максимального отношения сигнал/шум.

Наблюдения производились регистрирующими комплексами из трехкомпонентных широкополосных сейсмометров («СМЕ-4111-ЛТ» (рис. 3. а) или «LE-3DLite» (рис. 3. б)) и регистратора «Байкал-АСН88» (рис. 3. в), предназначенные для регистрации вертикальной и двух горизонтальных компонент сейсмических колебаний и преобразования их в цифровой вид с привязкой к единому времени. Количество регистрирующих

комплексов составило – 41 шт. Для устранения различий в характеристиках двух типов сенсоров выполнялась их компенсация за счет построения и применения обратных фильтров.

На основе скоростной модели по данным ВСП была построена плоскопараллельная скоростная 3D модель и выполнено численное моделирование распространения волнового процесса от импульса в области возможного распространения трещин ГРП на глубине залегания целевого пласта. Расчет численной модели выполнялся на суперкомпьютере, построенном на основе графических процессоров. Результатом численного моделирования были формы сигналов волнового процесса по трем компонентам для каждого датчика на поверхности от всех точек визуализации.

Заключительным этапом всего комплекса проведенных работ по обработке и интерпретации материалов мониторинга многоступенчатого ГРП стали повременные карты накопленной микросейсмической активности по каждой из стадий ГРП, по которым можно проследить динамику развития данных зон.

На рис. 4 и 5 приведена динамика развития зон по стадии № 3 и 5, соответственно. Черными линиями на картах накопленной микросейсмической активности нанесены прогнозные осевые линии распространения зон трещинообразования в процессе ГРП.

Проведенные работы позволили проследить динамику развития зон микросейсмической активности, связанную с развитием трещин. Начиная с 3 стадии, от стадии к стадии в ряде случаев происходят значительные прорывы вдоль горизонтального ствола скважины. Вероятно, они связаны с: 1) плохим контактом изолирующих пакеров; 2) вторичными нарушениями сплошности пород вдоль горизонтального ствола скважины, произошедшими в процессе бурения.

### **Оценка точности локализации**

Точность локализации во многом зависит как от скоростной модели среды, так и от точности совпадения скоростной модели среды с реальностью. Обычно для калибровки модели используют яркий импульс от перфорации колонны. При данных работах ГРП проводился в открытом стволе, без перфорации (без калибровочного импульса), что могло привести к невозможности получить адекватных результатов.

В связи с отсутствием калибровочных данных было решено анализировать достаточно низкочастотный рабочий диапазон от 10 до 14 Гц. При скорости продольных волн порядка 1200 м/с в верхней части разреза на частоте 12 Гц длина волны достигает 100 м. Волны можно приближенно считать синфазными, если разность их хода меньше  $\frac{1}{4}$  длины волны. Поэтому условно можно констатировать, что неточности знания модели менее чем 25 м не должны существенно исказить результаты восстановления.

Подав на вход метода локализации вместо реальных сигналов модельные, полученные из конкретной точки визуализации, например, из точки порта (муфты) ГРП, можно оценить минимальные размеры зоны размытия по горизонтали и вертикали с применением конкретной расстановки датчиков, данного метода локализации, при условии идеального описания скоростной модели в рабочем частотном диапазоне.

Данная процедура была проведена на модели участка работ, что проиллюстрировано на рис. 6. Для данной скоростной модели точность локализации по уровню 0.7 по горизонтали составляет около 50 м, а по вертикали около 500 м.

## **Выводы**

Таким образом, проведенные исследования показали принципиальную возможность мониторинга процесса многоступенчатого ГРП в горизонтальном открытом стволе скважины исключительно с дневной поверхности при использовании сейсмологической аппаратуры, оптимальной схемы наблюдения и метода максимального правдоподобия, как метода локализации микросейсм. Оценка точности локализации по горизонтали при этом приемлема для практического применения, точность локализации по вертикали недостаточна для выводов о развитии трещины в вертикальном направлении.

Полученные в процессе мониторинга ГРП данные позволили проследить весь процесс образования трещиноватых зон для каждой его стадии.

## **Литература**

1. Александров С.И., Гогоненков Г.Н., Мишин В.А. Применение пассивных сейсмических наблюдений для контроля параметров гидроразрыва пласта // Нефт. хоз-во. 2005. № 5. С. 64–66.

2. Мокшин, Е.В. Сопоставление метода "TIME REVERSE MODELING" и метода дифракционного суммирования [Текст] / Е.В.Мокшин, Д.В.Бережной, Е.В.Биряльцев // Научно-технический журнал "ЭКСПОЗИЦИЯ НЕФТЬ ГАЗ", 2012. Т.2, С. 26-28.

3. Steiner B., Saenger E.H., Schmalholz S.M. Time reverse modeling of low-frequency microtremors: A potential method for hydrocarbon reservoir localization // Geophys. Res. Lett.2008. V. 35. L03307.

4. Галимов М.Р., Биряльцев Е.В. Некоторые технологические аспекты применения высокопроизводительных вычислений на графических процессорах в прикладных программных системах // Вычислительные методы и программирование, 2010. Т. 11, С. 77-93.

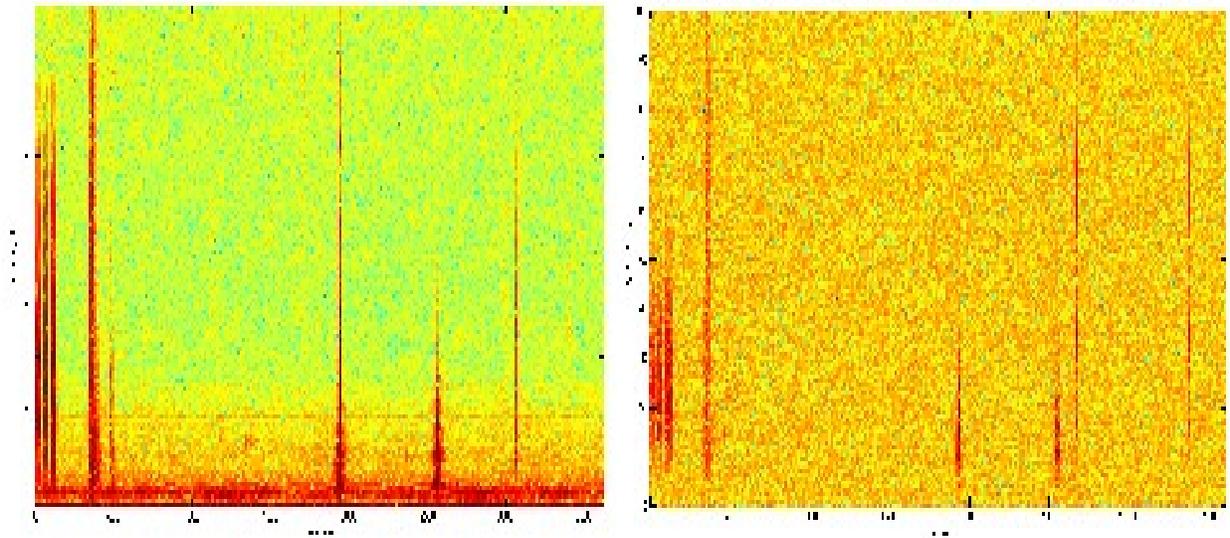


Рис. 1. Спектрограмма сигнала с сейсмологического датчика СМЕ-4111-LT (слева) и сейсмического датчика GS-20DX (справа)

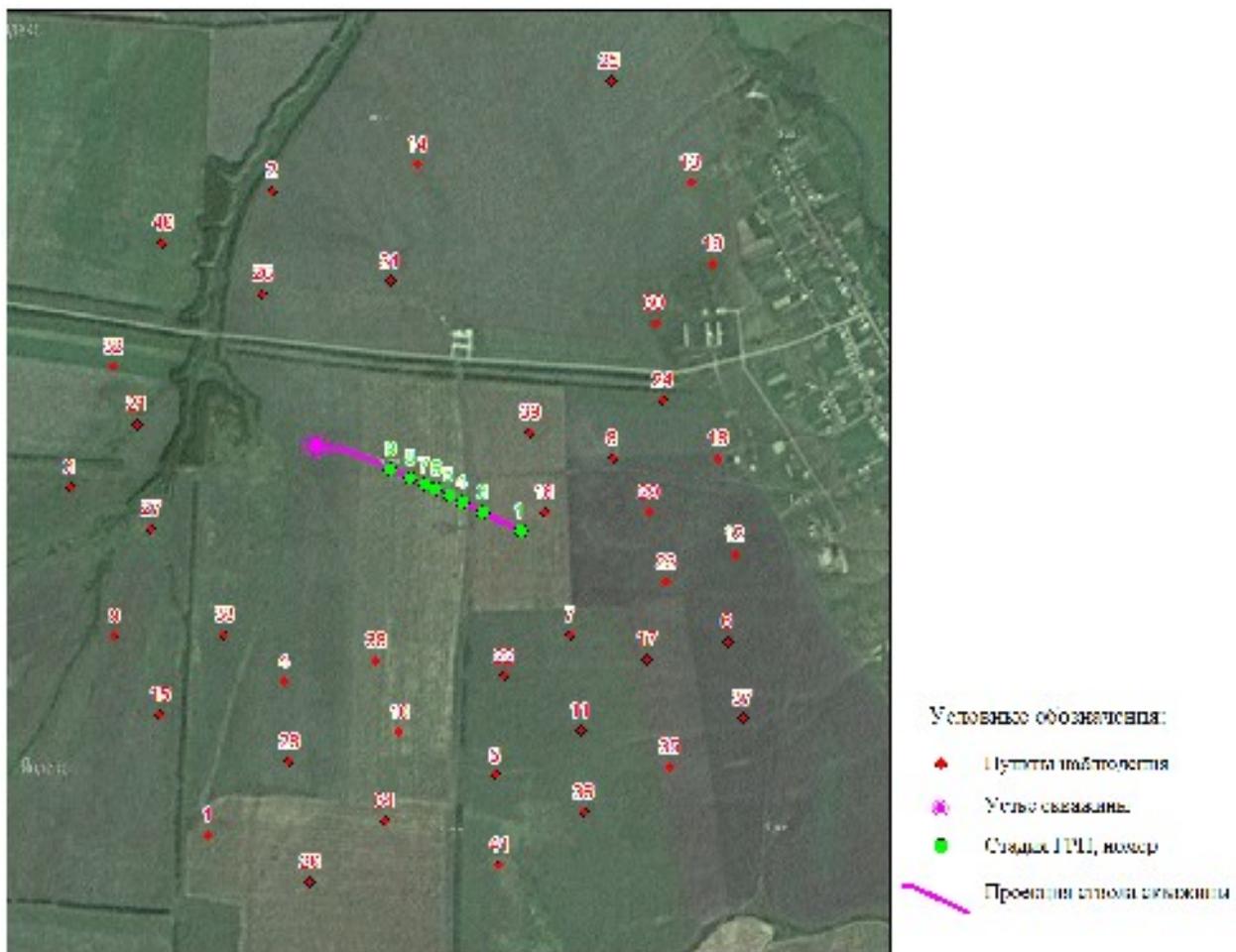


Рис. 2. Схема расстановки датчиков при мониторинге многоступенчатого ГРП



а



б



в

Рис. 3. Внешний вид сейсмометра «СМЕ-4111-ЛТ» (а), LE-3Dlite (б) и регистратора «Байкал-АСН88» (в)

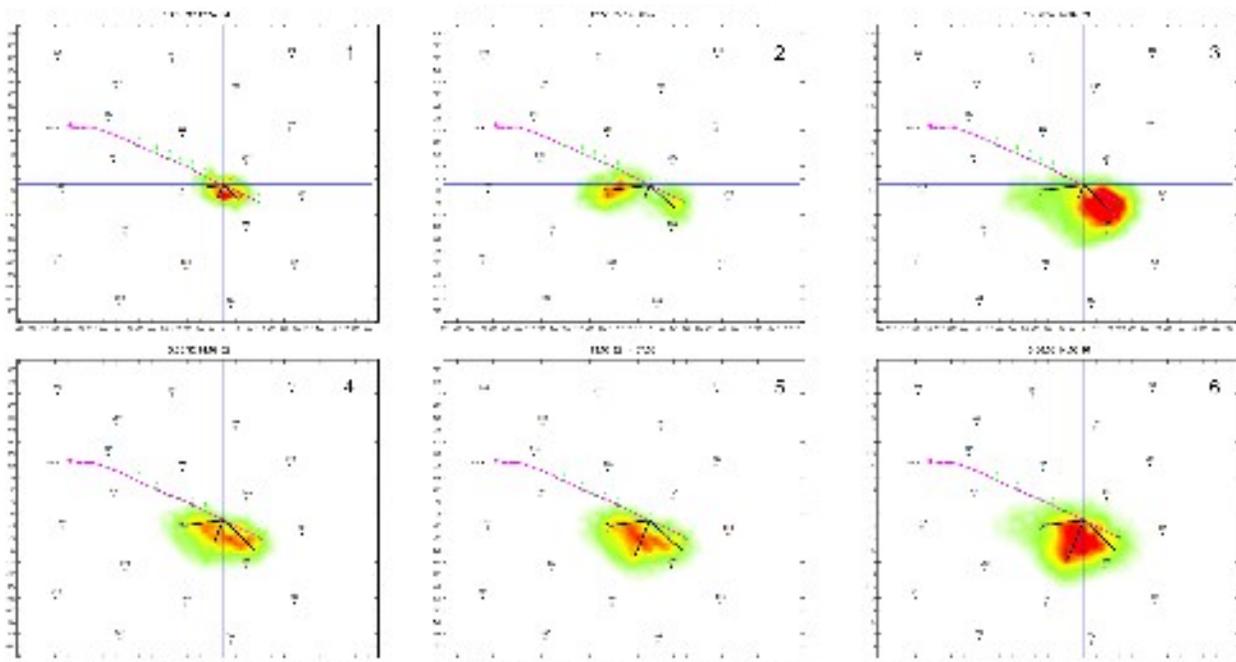


Рис.4. Стадия 3. Динамика развития зон микросейсмической активности при проведении ГРП

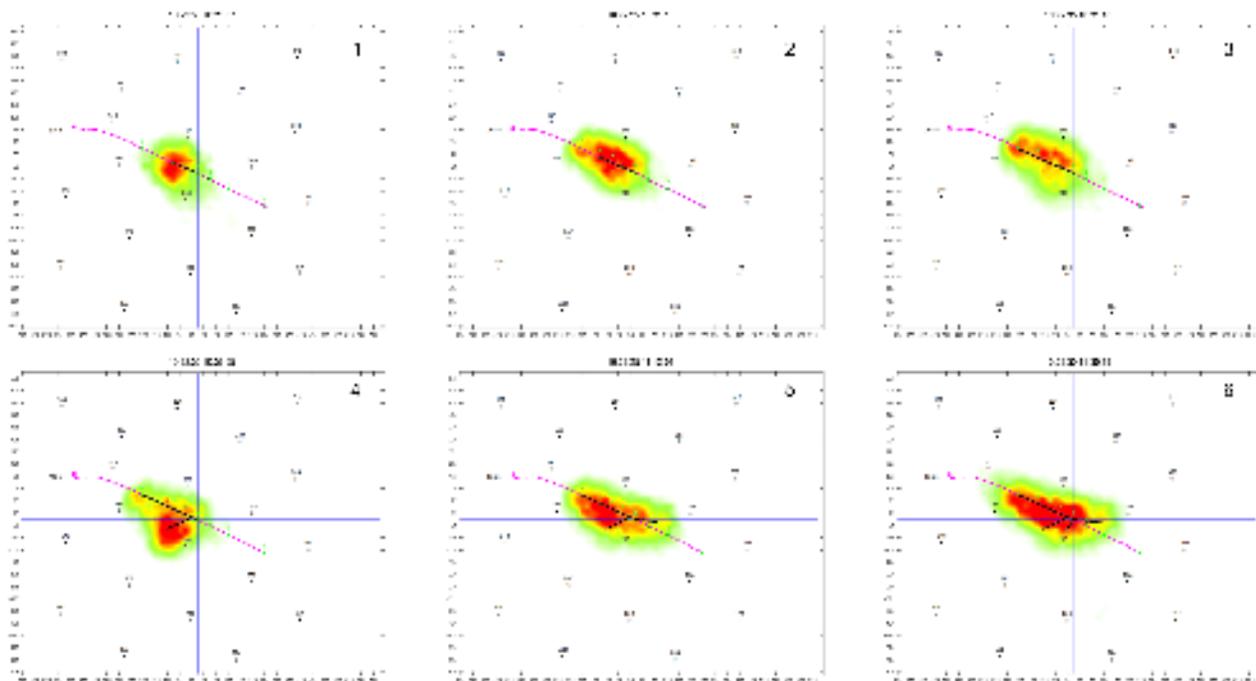


Рис.5. Стадия 5. Динамика развития зон микросейсмической активности при проведении ГРП

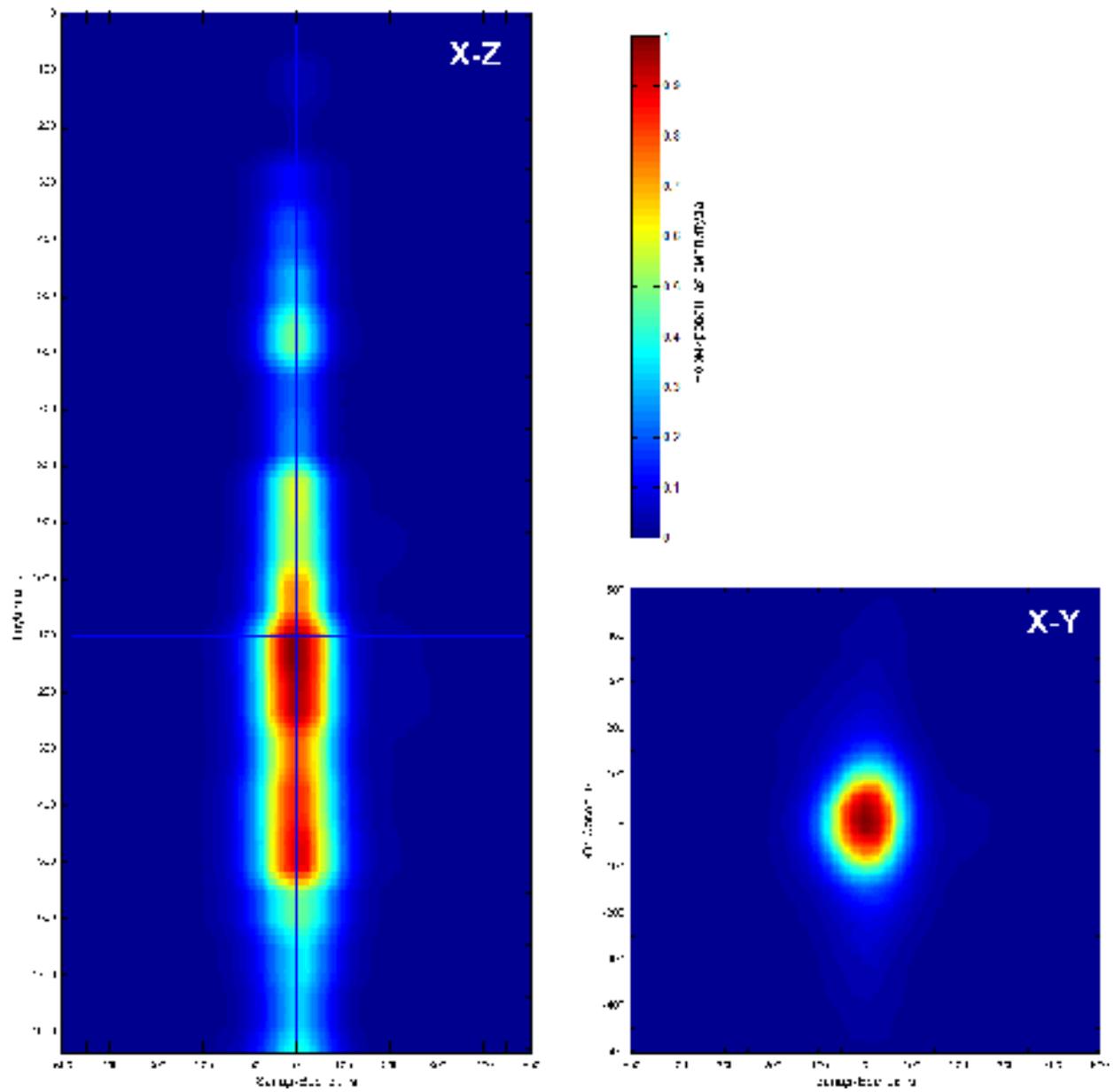


Рис. 6. Оценка точности локализации трещины ГРП по вертикали и горизонтали