

## Геофизика и инжиниринг коллектора

**Отображение зон гидроразрыва по данным пассивной наземной микросейсмической съемки. Imaging hydraulic fracture zones from surface passive microseismic data**

Vladimir A. Kochnev,<sup>1\*</sup> Ilya V. Goz,<sup>1</sup> Vitaly S. Polyakov,<sup>1</sup> Issa S. Murtayev,<sup>2</sup> Vladimir G. Savin,<sup>2</sup> Boris K. Zommer,<sup>2</sup> и Ilya V. Bryksin<sup>2</sup> приводят некоторые примеры проведения пассивной микросейсмической съемки в России с целью картирования зон гидроразрыва.

В большинстве современных микросейсмических методов для картирования зон растрескивания пород при проведении гидроразрыва применяются скважинные системы наблюдений. Трехкомпонентные приемники размещаются в одной или нескольких расположенных поблизости скважинах. Регистрация должна проводиться в высокочастотном диапазоне (выше 100 Гц). (Rutledge et al. 2003, Li et al. 1998, Block et al. 1994, Meadows et al. 1994).

Местоположение микроземлетрясений вычисляется по зарегистрированным направлениям прихода волн и задержкам S-волн по отношению к Р-волнам. Определить направление прихода волн зачастую непросто, особенно в условиях большого количества микроземлетрясений. Для надежного решения необходимо использовать приемники в нескольких скважинах.

Мы предположили, что большое количество микросейсмических событий малой интенсивности создают шумы с широким частотным диапазоном. Вначале реальный уровень интенсивности этих шумов не был очевиден, как и их потенциальная ценность для картирования зон растрескивания при гидроразрыве. Впоследствии было высказано предположение, что суммарный сигнал от множества микроземлетрясений достаточно силен для регистрации на больших удалениях.

В 2000 году “Хантымансийскгеофизикой” совместно с рядом исследовательских организаций были проведены работы по регистрации шумов в процессе гидроразрыва скважины на Восточно-Сургутском площади. Однако сильных событий обнаружить не удалось.

С тех пор основные усилия были направлены на разработку методов выявления слабых, но многочисленных сигналов на фоне сильных помех. Кроме существующих методов коррекции статики, фильтрации и отбраковки каналов (особенно тех, где были зарегистрированы сильные волны от поверхностных источников), мы разработали и применили специальные методы накопления сигналов низкой интенсивности. Метод позволил нам успешно обнаружить зоны растрескивания и визуализировать процесс развития трещин.

**Теория**

Среда предполагается горизонтально-слоистой. Для определения времен прихода волн используется нулевое приближение лучевого метода с интерполяцией для промежуточных лучей. Общая идея алгоритма накопления сигналов низкой интенсивности следующая. Сначала определим целевую зону поиска источников. Зона покрывается сеткой с постоянным шагом узлов. Для каждого узла сетки вычисляется параметр когерентности  $P_j$ :

<sup>1</sup>Russian Academy of Sciences. <sup>2</sup> Khanty-mansiiskgeofizika.

\*Correspondence: kochnev@icm.krasn.ru.

© 2007 EAGE

$$P_j = \frac{\left( \sum_{i=1}^N A(t_{ij}) \right)^2}{N \sum_{i=1}^N A(t_{ij})^2} \quad (1)$$

где  $N$  – общее число приемников,  $i$  – номер приемника,  $j$  – номер узла сетки,  $t_{ij}$  – время прихода волны, рассеянной в узле на приемник  $j$ ,  $A$  – амплитуда,

зарегистрированная на сейсмограмме.

Для улучшения стабильности алгоритма необходимо применить некоторое осреднение параметра  $P_j$  по времени. При известной форме сигнала можно построить оптимальный алгоритм осреднения. Однако в случае гидроразрыва форма сигнала неизвестна. Таким образом, можно построить лишь субоптимальный алгоритм осреднения. Параметры  $P_j$  будут максимальны, когда время прихода для данного узла сетки совпадет со временем прихода для точки рассеяния. Следовательно, пространственное распределение  $P_j$  соответствует распределению источников слабых сигналов.

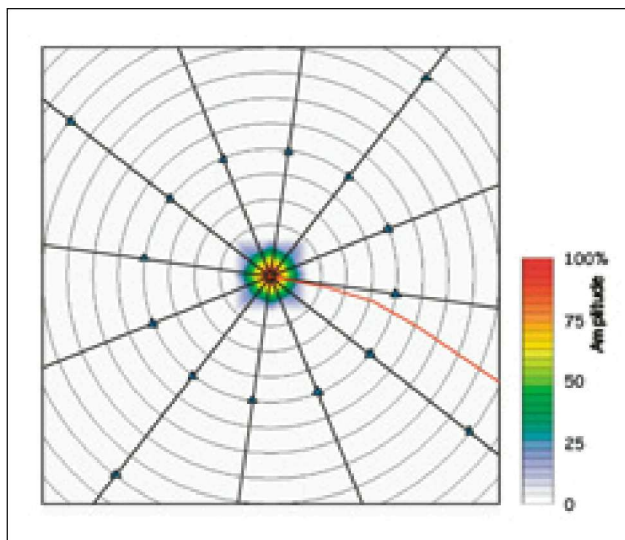
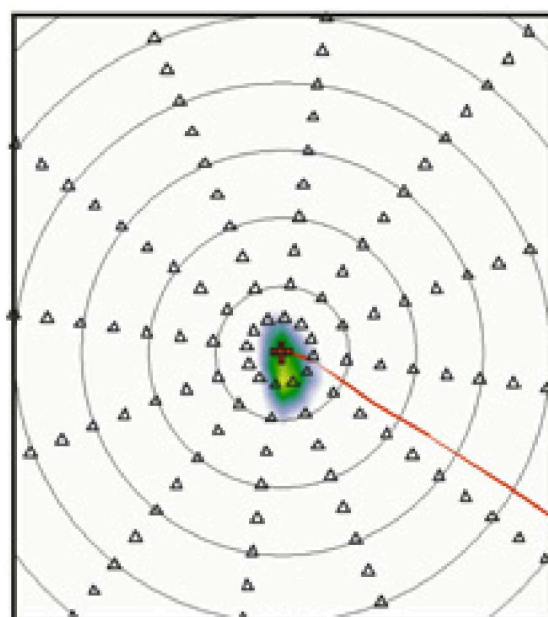
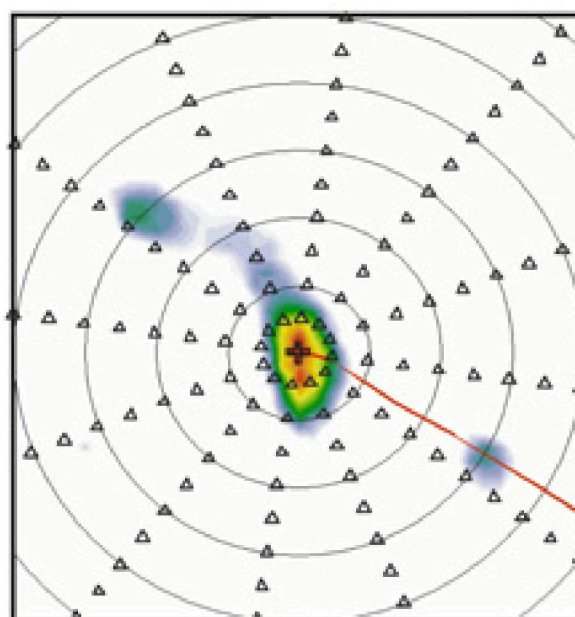


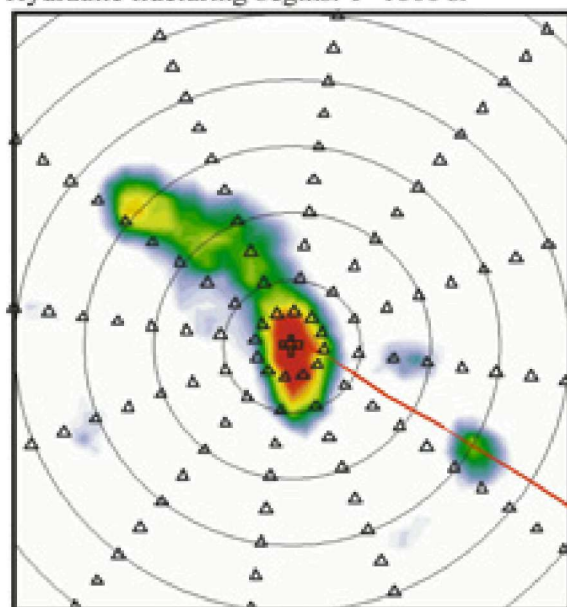
Рисунок 1 Калибровка алгоритма суммирования по перфорации скважины. Оранжевая линия – проекция ствола скважины.



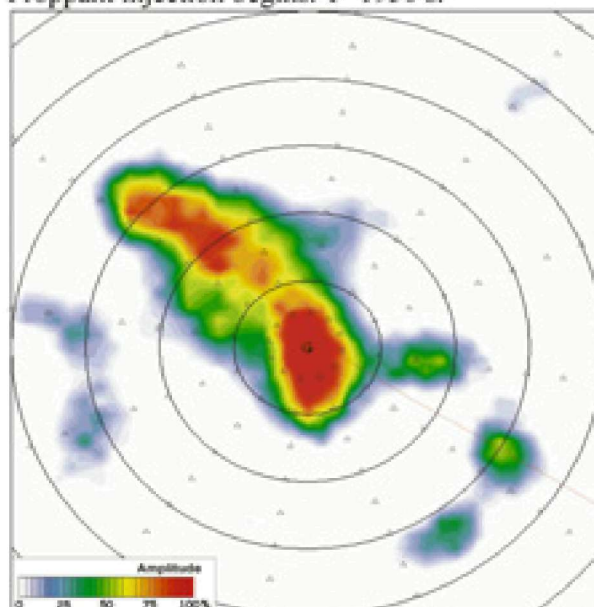
Hydraulic fracturing begins. T=1600 s.



Proppant injection begins. T=1950 s.



Proppant is forced into the layer. T=2300 s.



Map of the fully developed fracture. T=5200 s.

Рисунок 2 Пассивный сейсмический мониторинг гидроразрыва на глубине 2445 м., Западная Сибирь. Обратите внимание на асимметрию зоны растрескивания. а) Начало гидроразрыва, T=1600 с.; б) Начало нагнетания пропанта, T=1950 с; в) Пропант нагнетается в слой, T=2300 с; г) Окончательное изображение зоны растрескивания, T=5200 с.

### Практическое применение

Анализ результатов предыдущих исследований и численного моделирования показывает, что оптимальная система наблюдений должна быть симметрична относительно точки закачки и иметь достаточное количество приемников. Обработав данные, полученные при наблюдениях на скважине Конитлорской площади, мы смогли определить зону растрескивания и направление развития трещин. (В

докладе была продемонстрирована динамическая визуализация процесса). Необходимо заметить, что исходные данные выглядят, как шум, и волн на них выделить не удастся. события удалось обнаружить только с использованием специальных методов накопления сигналов низкой интенсивности, которые резко повышают отношение сигнал-шум.

## Геофизика и инжиниринг коллектора

На качество результатов сильно влияют скоростная модель, статические поправки и другие параметры. Алгоритм суммирования, таким образом, должен быть откалиброван и параметры адаптированы к конкретным условиям. В качестве калибровочного сигнала с большой интенсивностью и известным положением можно использовать перфорацию скважины перед гидроразрывом. Как показано на рис.1, алгоритм точно помещает источники сигналов вблизи точки перфорации. После проверки алгоритма

таким методом, мы можем перейти к обработке записей, сделанных во время закачки жидкости. На рис.2 показан пример обработки данных гидроразрыва на одной из скважин Восточной Сибири. Трещины распространяются в основном в северо-западном направлении. Опыт показывает, что зоны трещин, как правило, асимметричны относительно точки закачки.

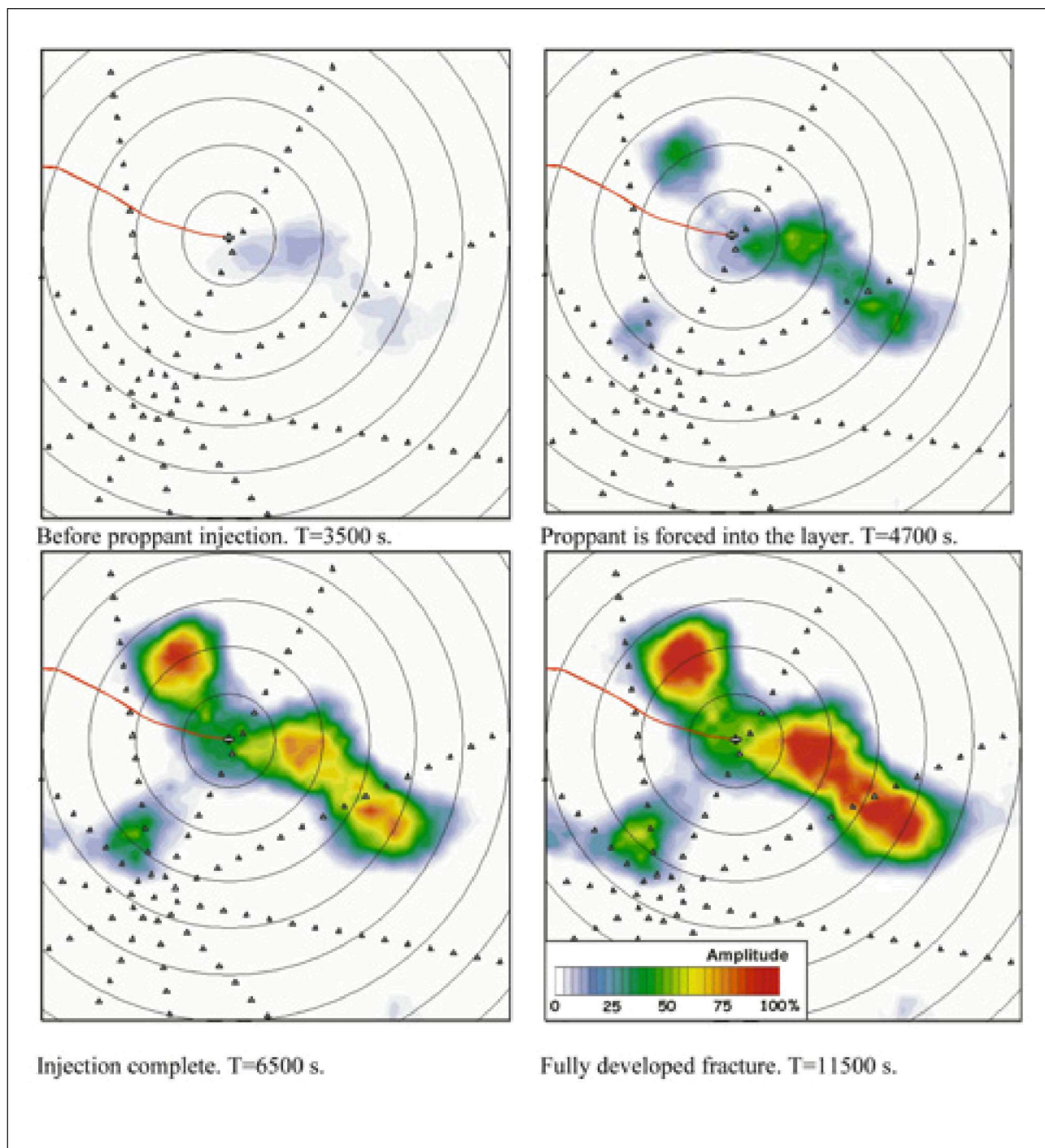


Рисунок 3 Еще один пример пассивного сейсмического мониторинга гидроразрыва на глубине 2490 м., Западная Сибирь. а) До введения пропантa, T=3500 с.; б) Пропант нагнетается в слой, T=4700 с; в) Нагнетание пропантa завершено, T=6500 с; г) Окончательное изображение зоны растрескивания, T=11500 с.





## Геофизика и инжиниринг коллектора

Причиной этого могут быть геологические условия – проницаемость, плотность и другие свойства пород вблизи скважины.

Еще один пример показан на рис.3. Любопытно отметить, что в данном случае имеются две интенсивных зоны микросейсмической активности: одна на некотором расстоянии к северо-западу от точки закачки, другая к юго-востоку. Можно предположить, что из-за хорошей проницаемости пород закачанная жидкость распространяется на некоторое расстояние, не вызывая существенного растрескивания. Следует отметить также, что сейсмическая активность в зоне растрескивания продолжается в течение существенного времени после окончания закачки жидкости.

**Заключение**

Мы показали возможность регистрации микросейсмических событий во время гидроразрыва на дневной поверхности с использованием стандартного сейсморегистрирующего оборудования. Эти данные можно анализировать и использовать для определения положения источников. Оптимальная система наблюдений должна быть симметрична по отношению к точке закачки. Метод позволяет учитывать скоростную модель и статические поправки, что увеличивает надежность картирования зон растрескивания.

**Литература**

- Block, L.V., Cheng, C.H., Fehler, M.C., and Phillips, W. S. [1994] Seismic imaging using microearthquakes induced by hydraulic fracturing. *Geophysics*, 59, 11. Kochnev, V.A., Polyakov V.S., Goz I.V., Murtayev I.S., Savin V.G., and Zommer B.K. [2005] The method of seismic exploration for locating rock fracture zones during hydraulic fracturing. *Patent 2282876, Russian Federation*.
- Li, Y., Cheng, H.C., and Toksoz, M.N. [1998] Seismic monitoring of the growth of a hydraulic fracture zone at Fenton Hill, New Mexico. *Geophysics*, 63, 1.
- Meadows, M.A. and Winterstein D.F. [1994] Seismic detection of a hydraulic fracture from shear-wave VSP data at Lost Hills Field, California. *Geophysics*, 59, 11.
- Rutledge, J. T. and Phillips, W. S. [2003] Hydraulic stimulation of natural fractures as revealed by induced micro-earthquakes, Carthage Cotton Valley gas field, east Texas. *Geophysics*, 68.