

*С. В. Яскевич,<sup>1,2\*</sup> А. А. Дучков<sup>1</sup>*

## **Отраженные волны в скважинном микросейсмическом мониторинге для локализации событий**

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск,  
Российская Федерация

\* e-mail: yaskevichsv@ipgg.sbras.ru

**Аннотация.** Скважинный микросейсмический мониторинг – это активная технология, применяемая для описания трещин, возникающих при гидроразрыве пласта. В нашей работе мы работаем с набором данных в которых установили наличие в волновой картине наличие отраженных волн. Данные были получены в рамках реального геофизического мониторинга короткой расстановкой скважинных трехкомпонентных сейсмоприемников. Стадии гидроразрыва, который был объектом наблюдений существенно отличались по количеству микросейсмических событий, и на стадиях с аномально большим количеством микросейсмических событий мы отмечаем отсутствие отраженных волн. В работе мы используем отраженные волны там, где они есть и показываем улучшение точности локализации. Там, где их нет мы используем как интерпретационным признак того, что события находятся ниже отражателя.

**Ключевые слова:** микросейсмический мониторинг, отраженные волны, локация, модель

*S. V. Yaskevich<sup>1,2\*</sup>, A. A. Duchkov<sup>1</sup>*

## **Reflected waves in downhole microseismic monitoring for event localization**

<sup>1</sup> Institute of petroleum geology and geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

\* e-mail: yaskevichsv@ipgg.sbras.ru

**Abstract.** Downhole microseismic monitoring is an active technology used to characterize fractures that occur during hydraulic fracturing. In our work, we work with a data set in which we have established the presence of reflected waves in the wave pattern. The data were obtained in the framework of real geophysical monitoring by a short spacing of borehole three-component seismic receivers. The stages of hydraulic fracturing, which was the object of observation, differed significantly in the number of microseismic events, and at stages with an anomalously large number of microseismic events, we note the absence of reflected waves. In this work, we use reflected waves where they are and show an improvement in localization accuracy. Where there are none, we use it as an interpretive sign that the events are below the reflector.

**Keywords:** microseismic monitoring, reflected waves, location, model

### ***Введение***

Скважинный микросейсмический мониторинг является широко используемым методом оценки геометрии трещины гидроразрыва пласта (ГРП). Метод основан на наблюдении, что микросейсмические события могут происходить вме-

сте с ростом трещины гидроразрыва, а интерпретация локаций гипоцентров и связанных атрибутов дает информацию о трещине [1]. Для технологии необходима расстановка трехкомпонентных (3С) сейсмоприемников в скважине близкой к трещине ГРП (<500м) для регистрации микросейсмических событий. Технология также применяется в России [2]. Хотя в записях скважинного микросейсмического мониторинга обычно преобладают вступления прямых Р- и S-волн, можно найти несколько упоминаний об отраженных волнах в опубликованных работах. В работе [1] использовали для локаций гипоцентров времена прихода отраженной S-волны, и показали значительное улучшение качества локализации. Для работ на формации Вудфорд [3] времена прихода отраженных волн использовались аналогичным образом в рамках кинематической инверсии, моделирование и пример полевых данных доказывают, что времена прихода отраженных волн являются важным источником более точной локализации.

Бывает, что отраженные волны не наблюдаются как четкие фазы в записанных данных, предполагается, что их энергия существует в записях и неявно использовалась в подходах, основанных на миграции такой пример известен для данных, полученных в обсерватории Сан-Андреас, сфокусированная при миграции энергия была связана с областями разломов [4]. Затем для набора скважинных микросейсмических данных Вудфорд аналогичный подход, основанный на миграции, был представлен в [5], где авторы использовали миграцию S-волн для извлечения геометрии трещин из атрибутов изображения. Вероятно, наиболее подробные данные и результаты миграции были представлены в [6] для набора данных DAS, представленные записи с особенно широкой апертурой и плотной пространственной дискретизацией предоставляют читателю четкие отражения S-волн, которые интерпретируются как отражения от трещин гидроразрывов и затем используются для их отображения. Аналогичный результат был показан в [7]. Подходы, основанные на миграции, очевидно, более применимы для длинных расстановок с плотной пространственной дискретизацией. С другой стороны, подходы, основанные на определении дополнительных времен прихода, требуют, чтобы отраженная волна четко наблюдалась.

В нашей работе данные записываются достаточно ограниченным числом сейсмоприемников. Для набора данных мы наблюдаем значительное разнообразие с точки зрения количества событий на стадию и для интерпретации этого эффекта было необходимо использование наблюдаемых отраженных волн, как источника дополнительной информации о местоположении событий.

### *Метод*

В нашей работе используются три метода, первый из которых — двухточечная трассировка лучей для вычисления времен пробега. В качестве входных данных ему нужны: скоростная модель, координаты источника и приемника и идентификация типа волны.

Второй метод - инверсия - мы формулируем обратную задачу в виде минимизации методом наименьших квадратов. Мы используем стандартные процедуры Matlab, чтобы свести к минимуму разницу между «наблюдаемыми» и син-

тетическими вступлениями. Под «наблюдаемыми» мы здесь также подразумеваем вычисленные времена прихода, но рассматриваем их как полученные в реалистичном наборе данных с реалистичной расстановкой.

Третий метод — это оценка единственности и устойчивости обратной задачи. Чтобы обеспечить такую оценку, мы вводим шум в времена прихода и начинаем инверсию с произвольного начального приближения. Параметры шума стандартное отклонение 0,5 мс и среднее, что характерно для скважинных микросейсмических данных. Начальное приближение выбирается каждый раз случайно заданным образом (в рамках реалистичных ограничений). Повторив описанные операции получаем набор распределений параметров модели.

### *Результаты*

Мы начнем с представления набора данных, показав две сейсмограммы, которые являются типичными для обсуждаемого набора данных (см. Рисунок 1). Набор данных в целом характеризуется 10-15 событиями на стадию и большинство сейсмических записей включают третью волну или фазу, приходящую после прямых P- и S-волн (рис. 1, а)). Мы интерпретируем эту волну как отражение S-волны от кровли нижележащего высокоскоростного слоя. С другой стороны, стадии ГРП 12-14 характеризуются чрезвычайно большим количеством событий (более 500 событий на стадию) и в большинстве из них отсутствует наблюдаемая отраженная волна (типичная запись представлена на рис. 1, б). Запись осуществляется восемью ЗС сейсмоприемниками, первый приемник верхний, все волны подходят к расстановке условно снизу так как расстановка расположена выше скважины гидроразрыва.

Наша интерпретация типов волн подтверждается вычислением вступлений. Кривизна годографов и временные задержки частично подтверждают наше предположение о типе волн, отраженная S-волна наблюдается через 60 мс после прямой S-волны, что близко к наблюдению на зарегистрированных сейсмограммах.

Следующим шагом в нашей статье является численная оценка эффекта учета отраженных волн, в реалистичной геометрии наблюдений. Для этого мы рассчитали синтетику для набора микросейсмических событий и перфорационного выстрела, геометрия показана на рисунке 3. Идея также заключалась в том, чтобы разместить события в разных областях по отношению к перфорации. Известно, что включение перфорации в инверсию значительно уточняет локацию микросейсмических событий, которые близки по расположению к перфорации, для удаленных событий уточнение локации зависит от того как перфорации освещают скоростную модель. Скоростная модель считалась неопределенной, но была ограничена 5% вокруг правильной скоростной модели, в реальных данных она определялась относительно данных кросс-дипольного акустического каротажа.

Результаты инверсии зашумленных данных показаны на рисунке 2. На левом рисунке при локации времена прихода отраженных волн не используются, а на правом используются. Крупными непрозрачными синими маркерами показаны действительные положения гипоцентров событий. Прозрачными круглыми

мелкими маркерами показаны результаты инверсии зашумленных данных, цвет маркеров атрибутирован к разным событиям: красным первое, зеленым, синим, салатовым и фиолетовым 2-5 события. Эффект очевидно значителен для всех событий. Система наблюдений с достаточно ограниченной апертурой приводит к большим погрешностям локализации, даже при наличии перфорационного события, но для глубокого (пятого) события эффект имеет решающее значение для достоверного определения глубины гипоцентра. Большой разброс локаций нижнего события в основном связан с тем, что скорость в нижнем слое не калибруется перфорацией, которая находится в вышележащем слое, что в сочетании с ограниченной системой наблюдений приводит к большим ошибкам локализации. Фактически наблюдается значительный обмен между локацией гипоцентра и параметрами скоростной модели.

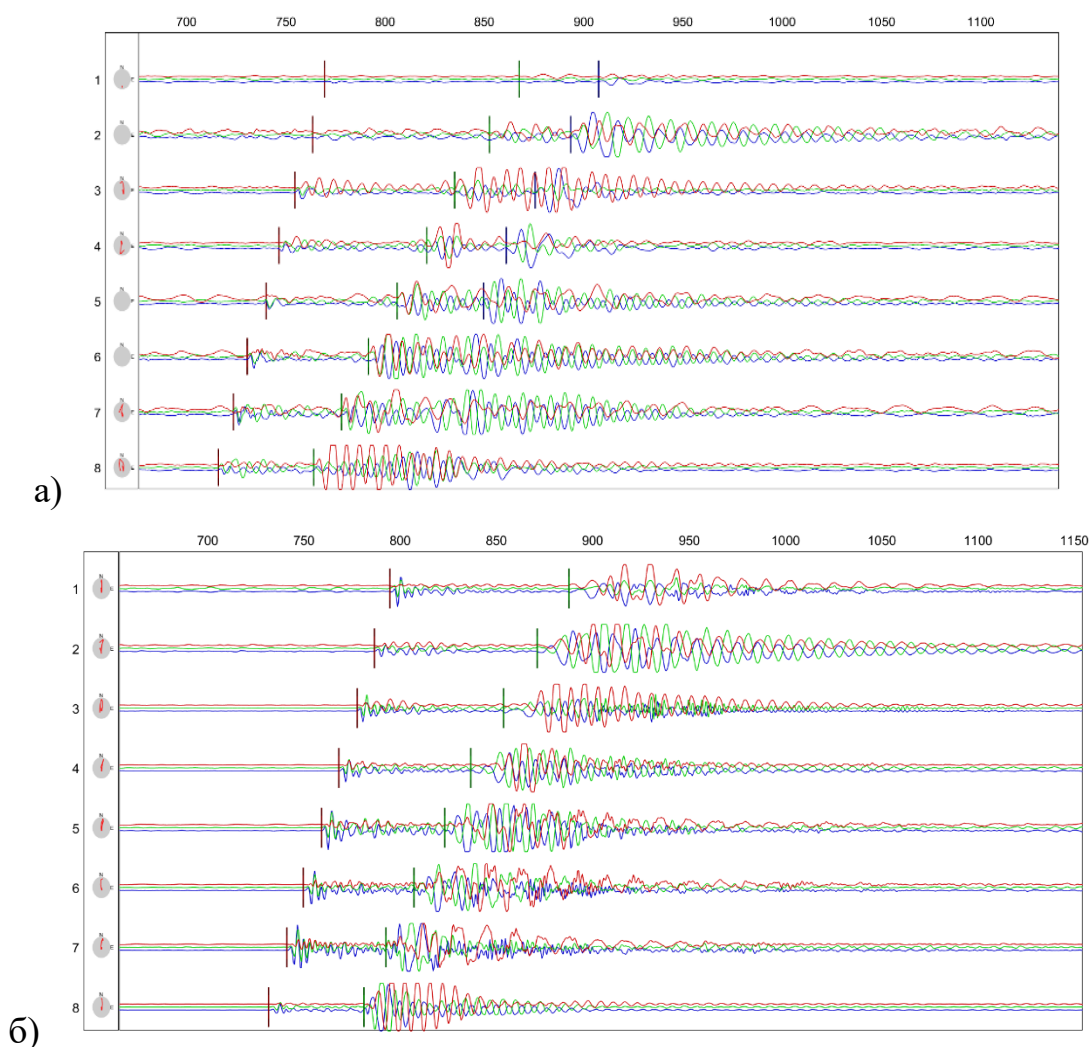


Рис. 1. Типичная микросейсмическая запись (а) для всех стадий, кроме 12-14: красными, зелеными, синими линиями показаны ортогональные восточная, северная, глубинная составляющие записи. Моменты прихода показаны вертикальными цветными маркерами: красным, зеленым для прямой Р-, S- и синим для отраженной волны (мы предполагаем, что эта волна является отраженной SS-волной); б) - типичная запись для этапов 12-14.

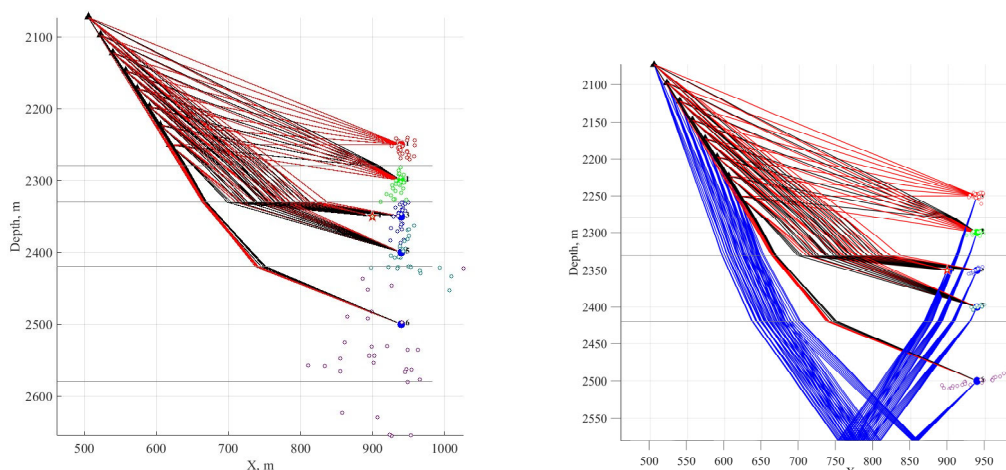


Рис. 2. Результаты инверсии синтетических времен прихода. Синие круглые маркеры показывают истинное местоположение микросейсмических событий, пустые круглые маркеры соответствуют местоположению инвертированных зашумленных вступлений, цветовое кодирование отражает идентичность события. Маркер в форме звезды (красного цвета) показывает перфорацию (событие с известным местоположением источника). Серые горизонтальные линии отмечают границы между слоями, цветные линии для геометрии лучей, синие линии для отраженных волн, красные линии для прямых Р-волн, черные линии для прямых S-волн.

### *Заключение*

Используемая ограниченная система наблюдений вносит неопределенность в интерпретацию типа волны и точной природы отражения. В нашей статье мы предполагаем, что отражение S-волны происходит на определенной границе, и оно основано на наблюдении времен прихода волны. Использование приходов отраженных волн для локации дает нам ценную информацию:

- отсутствие отраженных волн для большинства событий на стадиях 11-12 свидетельствует о нисходящем распространении микросейсмических событий, связанных с ГРП, и, таким образом, о нисходящей миграции порового давления;
- отраженные волны предоставляют нам ценные данные для уменьшения неопределенности локации. Для конкретной системы наблюдений наблюдаемый эффект значителен, что было показано в нашей работе.

### *Благодарности*

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-00201).

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rutledge J. T., Phillips W. S. Hydraulic stimulation of natural fractures as revealed by induced microearthquakes, Carthage Cotton Valley gas field, east Texas Hydraulic Stimulation of Natural Fractures // *Geophysics*. – 2003. – Т. 68. – №. 2. – С. 441-452.

2. Yaskevich S. V. et al. Downhole microseismic data interpretation for media anisotropy evaluation with limited acquisition geometry in Western Siberia // Interpretation. – 2022. – T. 10. – №. 3. – C. T461-T468.
3. Belayouni N. et al. Microseismic Event Location Using the Direct and Reflected Waves-A Woodford Case Study // 79th EAGE Conference and Exhibition 2017. – EAGE Publications BV, 2017. – T. 2017. – №. 1. – C. 1-5.
4. Reshetnikov A., Buske S., Shapiro S. A. Seismic imaging using microseismic events: Results from the San Andreas Fault System at SAFOD // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2010. – T. 115. – №. B12.
5. Grechka V. et al. Microseismic imaging of unconventional reservoirs // 2018 SEG International Exposition and Annual Meeting. – OnePetro, 2018.
6. Ma Y., Eaton D. W., Wang C. Fracture imaging using DAS-recorded microseismic reflections // Second International Meeting for Applied Geoscience & Energy. – Society of Exploration Geophysicists and American Association of Petroleum Geologists, 2022. – C. 587-591.
7. Staněk F., Jin G., Simmons J. Fracture imaging using DAS-recorded microseismic events // Frontiers in Earth Science. – 2022. – T. 10. – C. 907749.

© С. В. Яскевич, А. А. Дучков, 2023