



## СРАВНЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЛОКАЦИИ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАЗЕМНЫХ И СКВАЖИННЫХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЙ

С.В. Яскевич, А.А. Дучков

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. академика Коптюга, 3, e-mail: YaskevichSV@ipgg.sbras.ru*

В последнее десятилетие микросейсмический мониторинг гидроразрыва пласта стал развитой технологией в нефтегазовой промышленности и активно используется при определении параметров образующейся трещины. В настоящее время существуют два основных подхода в микросейсмическом мониторинге: наземный и скважинный. В первом случае сейсмоприемники располагаются на поверхности над исследуемой областью, во втором – в вертикальных скважинах вблизи этой области. Причем в российской практике чаще используются наземные системы. В данной статье проводится сравнительный анализ точности локации микросейсмических событий при использовании наземных и скважинных систем наблюдения. Основной вывод состоит в том, что глубина микросейсмических событий (горизонт, в котором реально образуется трещина) определяется только при использовании скважинных наблюдений, а наземная система (однокомпонентные данные) наблюдений позволяет определять только горизонтальные координаты (эпицентры) микросейсмических событий.

*Микросейсмический мониторинг, точность локации микросейсмических событий, системы наблюдений, мониторинг гидроразрыва пласта*

### COMPARISON OF ACCURACY OF MICROSEISMIC EVENT LOCATION USING SURFACE AND DOWNHOLE ACQUISITION SYSTEMS

S.V. Yaskevich, A.A. Duchkov

*Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Pr. Ac. Koptyuga, 3, e-mail: YaskevichSV@ipgg.sbras.ru*

In the last decade microseismic monitoring of hydraulic fracturing has become a popular technology in the oil and gas industry. It is actively used for estimating geometric parameters of hydraulic fracture. For microseismic monitoring one can use surface or downhole seismic arrays. The former needs a number of geophones deployed at the earth surface above the place of hydraulic fracturing, the latter needs one or several downhole geophone arrays placed close to the area of interest. In this paper we compare accuracy of event location for both downhole and surface monitoring systems. It is shown that vertical coordinates of the event hypocenters (correct depth of the horizon being treated) can be properly estimated using downhole arrays. Surface monitoring array provides reliable estimates of horizontal positions of microseismic events.

*Microseismic, monitoring, event location, accuracy, acquisition, hydraulic fracturing*

### ВВЕДЕНИЕ

Гидроразрыв пласта (ГРП) является распространенной методикой интенсификации добычи углеводородов. С его помощью в слабопроницаемом массиве пород создается трещина (или система трещин), которая обеспечивает увеличенный приток газа или флюида в скважину. Для ряда нетрадиционных залежей – это практически единственный способ обеспечить экономически выгодный приток углеводородов. В целях оптимального планирования разработки важно знать геометрию образующихся при ГРП трещин: их геометрические размеры, направление и пр.

Считается, что наиболее полную информацию о параметрах трещины можно получить с помощью микросейсмического мониторинга, который все более активно и успешно применяется для мониторинга ГРП [Александров и др., 2010; Rutledge, Phillips, 2003; Warginski, 2009; Maxwell et al., 2010] или мониторинга разработок месторождений [Morosini et al., 2012]. Метод основан на предположении, что постепенный

рост трещины при ГРП состоит из образования большого количества мелких разрывов – микросейсмических событий, волны от которых можно наблюдать с помощью сейсмических систем наблюдений. Основным результатом обработки данных, как правило, является локация микросейсмических событий, т. е. определение их гипоцентров.

Кроме самой локации событий, весьма важной информацией является оценка ее точности (см., напр., [Eisner et al., 2009]). К основным факторам, которые влияют на точность локации, можно отнести геометрию системы наблюдений, адекватность используемой скоростной модели среды, возможность выделения целевых волн. Известно, что для скважинных систем основным источником ошибок является поляризационный анализ [Ibid], а для поверхностных систем основной вклад в ошибку дает низкое отношение сигнал-помеха и использование только фазы *P*-волны [Thronton, Eisner, 2011]. Дополнительно

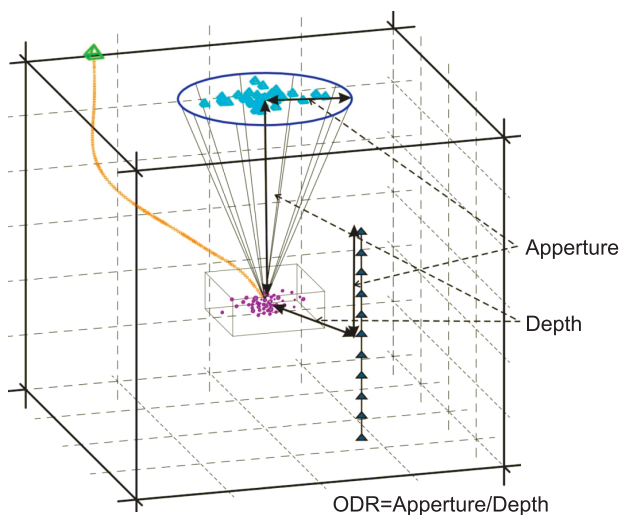
ные факторы ошибок перечислены в [Eisner et al., 2011a].

В настоящее время активно применяются два типа систем наблюдений – скважинная и наземная (схематически представлены на рис. 1). В первом случае система наблюдений представляет собой расстановку трехкомпонентных сейсмоприемников расположенных в вертикальной скважине, находящейся в непосредственной близости от скважины, в которой делается ГРП. Реальные примеры локации в таких системах наблюдений приведены в работах [Александров и др., 2010; Rutledge, Phillips, 2003; De Meersman et al., 2009]. Во втором случае сейсмоприемники (как правило, однокомпонентные) располагаются по площади на поверхности земли над тем местом, где предположительно будет происходить ГРП [Eisner et al., 2009; Chambers et al., 2010].

Важными направлениями развития микросейсмического мониторинга являются использование совмещенных поверхностных и скважинных систем наблюдения [Diller, Gardner, 2012] и наблюдения в двух скважинах [Warpinski et al., 2005; Grechka, 2010], а также более детальная интерпретация данных мониторинга: рассмотрение анизотропных моделей [Grechka et al., 2011; Eisner et al., 2011b; Grechka, Duchkov, 2011; Grechka, Yaskevich, 2013] и разных типов волн (головные, отраженные и т. д.).

Ниже мы проведем количественную оценку точности локации событий для типичных систем наземного и поверхностного микросейсмического мониторинга. Сравнение точности для этих двух типов систем проводилось в работе [Eisner et al., 2010], где было отдано предпочтение наземным системам с большим разносом приемников. При этом рассмотренная скважинная система имела по современным меркам достаточно ограниченную апертуру. По этой причине мы решили провести сравнение точности для более широкого диапазона систем наблюдений, которые встречаются в отечественной и зарубежной практике микросейсмического мониторинга. В статье

- проведен анализ точности для малоапертурных систем, часто используемых в российской практике;



**Рис. 1.** Схематическое изображение наземной и скважинной систем наблюдений.

Треугольники – сейсмоприемники, расположенные на поверхности (голубые) и в вертикальной скважине (синие), розовые точки – гипоцентры микросейсмических событий при ГРП.

- показано, насколько сужается область неоднозначности при использовании двух типов волн ( $P$  и  $S$ ) в скважинных системах, в отличие от использования только  $P$ -волн в наземных системах;

- оценена точность определения скоростной модели для скважинных систем наблюдений. В статье будет показано, что в этом случае при использовании двух типов волн ( $P$  и  $S$ ) скоростная модель среды может быть определена непосредственно по микросейсмическим данным;

- выполнен анализ применяемых на практике систем наблюдения, обозначенных в публикациях.

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЙ

*Скважинная система наблюдений* представляет собой расстановку трехкомпонентных сейсмоприемников, расположенных в вертикальной скважине, находящейся недалеко от скважины, в которой делается ГРП (см. рис. 1). Длина расстановки варьирует от сотни до нескольких сотен метров, а ее положение рассчитывается так, чтобы по глубинам сейсмоприемники перекрывали тот интервал, в котором предполагается возникновение микросейсм.

Основным преимуществом скважинной системы наблюдений является расположение сейсмоприемников в относительно малозумных условиях (в скважине). Чаще по сейсмограммам можно снимать времена прихода  $P$ - и  $S$ -волн. Частоты наблюдаемых сигналов варьируют от 200 до 500 Гц; точность снятия времен прихода  $P$ - и  $S$ -волн предполагается не хуже 1 мс [Eisner et al., 2009; Warpinski, 2009], а средняя оценка точности составляет 0.5 мс [Pei et al., 2009].

Основным недостатком при использовании только одной скважины является отсутствие пространственного разрешения [Grechka, 2010]. Времена прихода  $P$ - и  $S$ -волн позволяют лоцировать в вертикальной плоскости, проходящей через скважину. Азимут на событие необходимо определять из поляризационного анализа продольной волны. Ошибка определения азимута подхода продольной волны является основным источником ошибки в локации событий; общепринятая оценка ошибки составляет  $5^\circ$  [Eisner et al., 2009]. Для скважинных систем наблюдений важным фактором точности локации является также адекватность используемой скоростной модели (для  $P$ - и  $S$ -волн), которая строится по данным акустического каротажа и калибруется по записям перфорационных взрывов в стволе скважины.

*Наземная система наблюдений.* При такой системе сейсмоприемники (как правило, однокомпонентные) располагаются по площади на поверхности земли над тем местом, где предположительно будет происходить ГРП (см. рис. 1). При этом часто сейсмоприемники расположены в виде расходящихся лучей [Chambers et al., 2010], достаточно регулярно по площади [Birkelo et al., 2012] либо в виде малоапертурных групп [Шмаков, 2012]. В современных системах наблюдений линейные размеры расстановок сопоставимы с ожидаемой глубиной образования трещины ГРП.

Характерные видимые частоты микросейсмических сигналов, доходящие до системы наблюдений на поверхности, составляют порядка 20–30 Гц. Основными факторами, ухудшающими точность локации событий, в этом случае являются низкое отношение сигнал–помеха и большое расстояние от источника

**Геометрические характеристики типичных систем микросейсмического мониторинга ГРП  
и соответствующие значения ODR**

Апертура $l$ (м)	Расстояние до событий $d$ (м)	ODR	Система наблюдений	Публикация
500	50–400	1.2–10	Скважинная (2 скважины)	[Rutledge, Phillips, 2003]
250	200–300	1	Скважинная	[Meersman et al., 2009]
70	350	0.2	Скважинная	[Александров, 2010]
700	100–700	1–7	Скважинная (4 скважины)	[Hayles et al., 2011]
150	100–300	0.5–1.5	Скважинная	[Warpinski, 2012]
3300	3000	1.1	Наземная	[Chambers et al., 2010]
2500	2000	1.2	Наземная	[Eisner et al., 2011a]
500	2500	0.2	Наземная	[Шмаков, 2012]

(несколько километров). По этой причине полезный сигнал в большинстве случаев на записях не виден, так что пикировка времен пробега не возможна. Для выделения сигнала и подавления помех в этих условиях используются методы когерентного суммирования или эмиссионной томографии [Николаев и др., 1986] и большое количество приемников – до нескольких тысяч. При этом обработка ведется только для  $P$ -волн, так как  $S$ -волны на вертикальной компоненте не регистрируются (и быстрее затухают в процессе распространения), а многокомпонентные приемники используются редко.

Использование площадной поверхностной системы наблюдений позволяет хорошо определять горизонтальное положение (эпицентр) микросейсмических событий, расположенных под ней. Однако для успешного использования когерентного суммирования необходимо провести калибровку скоростной модели по перфорационным взрывам. Такая калибровка позволяет учитывать также неоднородности верхней части разреза при условии, что гипоцентры микросейсмических событий расположены близко к калибровочным взрывам по сравнению с расстоянием до приемников.

*Сведение к двумерной задаче.* Схематическое изображение описанных систем наблюдений приведено на рис. 1. Заметим, что скважинная система является существенно двумерной. Как уже говорилось, положение гипоцентра события в радиальном (относительно вертикальной косы) направлении может быть определено только из поляризационного анализа продольной волны и не является частью обратной кинематической задачи. Для поверхностной системы наблюдений обе горизонтальные координаты определяются одинаково хорошо, если эпицентры событий расположены около центра системы наблюдений. Так что в обоих случаях можно проводить двумерный анализ систем, в котором основной характеристикой для единичного события является отношение апертуры к расстоянию до события:

$$ODR = l/d,$$

где  $l$  – эффективная апертура косы,  $d$  – расстояние от косы до гипоцентров микросейсмических событий; они проиллюстрированы на рис. 1.

Под эффективной апертурой  $l$  нами понимается: для наземной системы наблюдений – половина радиального размера всей расстановки, поскольку ее центр, как правило, располагается над предполагаемой трещиной ГРП; для скважинной системы берется вся длина косы, так как обычно по глубине она располагается непосредственно над областью проведения

ГРП. Расстояние до событий от поверхностной косы  $d$  соответствует глубине этих событий, а для скважинной – радиальным расстояниям до скважины.

Заметим, что понятие ODR используется в сейсморазведке как отношение максимального разноса к глубине отражающего горизонта. Оно характеризует возможность проведения скоростного анализа по сейсмограммам общей средней точки. В таблице приведены характерные размеры типичных скважинных и наземных систем наблюдений, используемых для микросейсмического мониторинга ГРП, и соответствующие значения ODR. Заметим, что расстояние  $d$  до событий почти постоянно для поверхностных систем, но может значительно меняться для скважинных наблюдений, так как события могут возникать на разных расстояниях от наблюдающей скважины по мере роста трещины. В этом случае можно рассматривать среднее значение ODR либо самое большое (наилучший вариант локации).

Из таблицы видно, что с точки зрения увеличения апертуры в настоящее время динамично развиваются именно скважинные системы наблюдений, достигая значений ODR, значительно превышающих 1. В то же время стандартные работы по микросейсмическому мониторингу проводятся небольшими косами (порядка 120 м), обеспечивающими ODR = 0.5 и менее. Для наземных систем предел апертуры соответствует ODR = 1, а в российской практике используются системы, обеспечивающие ODR = 0.2.

После анализа данных таблицы было принято решение оценить точность локации событий для систем с ODR = 0.2 (малоапертурные системы при наземных и скважинных наблюдениях), с ODR = 1 (распространено в наземных наблюдениях) и с ODR = 2 (распространено в скважинных наблюдениях).

#### МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ

Основной целью данной статьи является изучение влияния размеров системы наблюдений на надежность интерпретации результатов микросейсмического мониторинга. Далее мы ограничимся рассмотрением однородной изотропной модели. Анализ влияния скоростных неоднородностей на локацию событий является важной и более реалистичной задачей. Но даже рассмотрение однородных моделей позволяет сделать ряд простых выводов, которые могут учитываться не только специалистами сервисных компаний, но и заказчиками при выборе систем мониторинга ГРП.

Для этого мы будем использовать решение обратной кинематической задачи. Этот подход предполагает, что было проведено пикирование времен вступле-



ний целевых волн, но также справедлив для оценки методик типа когерентное суммирование. Времена регистрации (прямая кинематическая задача) в однородной среде вычисляются по формуле

$$t_{Qij}^{syn}(x_j, z_j, \xi_i, \tau_0, V_Q) = \tau_0 + \frac{1}{V_Q} \sqrt{(x_j + \xi_i)^2 + (z_j - \zeta_i)^2}, \quad (1)$$

где  $Q$  обозначает тип волны ( $P$  или  $S$ ),  $t_{Qij}^{syn}$  – время пробега волны из  $j$ -го источника (микросейсмического события) с координатами гипоцентра  $(x_j, z_j)$  в  $i$ -й приемник с координатами  $(\xi_i, \zeta_i)$ ,  $V_Q$  – сейсмическая скорость для волны типа  $Q$ ,  $\tau_0$  – время возникновения события. Координаты приемников считаются известными.

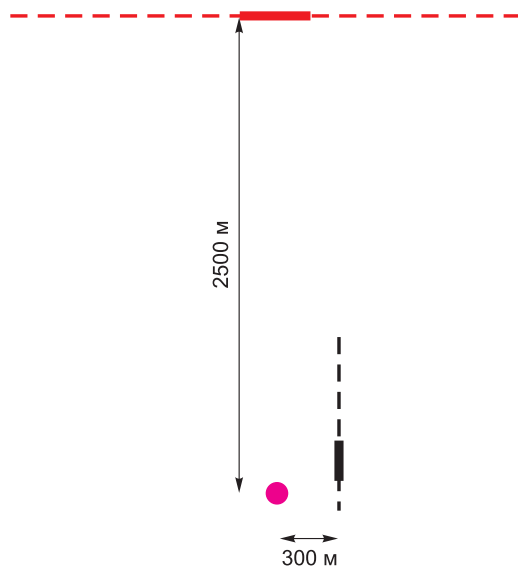
Обратная кинематическая задача локации микросейсмических источников может быть поставлена как минимизация функционала невязки:

$$L(\bar{m}) = \sqrt{\frac{1}{N_i N_j} \sum_j \sum_i (t_{Qij}^{obs} - t_{Qij}^{syn}(\bar{m}))^2} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $t_{Qij}^{obs}$  – времена прихода волн типа  $Q$  из  $j$ -го источника в  $i$ -й приемник,  $N_i$  – количество приемников,  $N_j$  – количество источников (далее будем брать  $N_j = 1$ ),  $t_{Qij}^{syn}(\bar{m})$  – теоретические времена, рассчитанные по формуле (1),  $\bar{m}$  – вектор неизвестных параметров.

Вектор неизвестных параметров  $\bar{m}$  будет зависеть от постановки обратной задачи. В общем случае, когда из данных необходимо определить скорости и провести локацию микросейсмического события,  $\bar{m} \equiv (V_p, V_s, \tau_0, x_j, z_j)$ .

Устойчивость и область неединственности решения обратной задачи (2) определяется формой функционала невязки  $L(\bar{m})$  в окрестности минимума (в неоднородных моделях может быть несколько минимумов). Ниже мы рассмотрим два подхода к визуализации этой формы и количественной оценке точности.



**Рис. 2.** Системы наблюдений, используемые в примерах. Большая точка – гипоцентр события; красным цветом обозначена наземная коса, черным – скважинная; пунктир – система с большой апертурой  $l$ , сплошные линии – с малой.

*Подход 1. Линии уровня функционала невязки.* Функционал невязки  $L(\bar{m})$  сформулирован в форме среднеквадратического отклонения теоретических времен от наблюдаемых. Поэтому, задавшись точностью определения времен вступлений  $\varepsilon$ , можно в качестве оценки области эквивалентности решения обратной задачи взять контур линии уровня  $L(\bar{m}) = \varepsilon$ . Проекция такой области эквивалентности на координатные оси, соответствующие отдельным параметрам из  $\bar{m}$ , дает оценку их индивидуального интервала эквивалентности.

Этот подход удобен для визуализации и может быть использован в рамках данной статьи, так как вектор неизвестных параметров  $\bar{m}$  имеет небольшую размерность. Для более реалистичных постановок изображение линий уровня многомерной функции  $L(\bar{m})$  становится затруднительным.

*Подход 2. Метод Монте-Карло (внесение синтетического шума в данные).* Как упоминалось ранее, решение обратной кинематической задачи сводится к поиску минимума функционала  $L(\bar{m})$  для времен вступлений  $t_{Qij}^{obs}$ . Задаввшись точностью их определения  $\varepsilon$ , можно добавлять в времена  $t_{Qij}^{obs}$  несколько реализаций гауссовского случайного шума  $n_k(\varepsilon)$  с дисперсией  $\varepsilon$ . Для каждой реализации зашумленных данных определяется точка  $\bar{m}_k$  минимума функционала невязки. Полученное облако решений  $\bar{m}_k$  характеризует точность решения обратной задачи. Этот подход является удобным, когда нужно рассчитать средние значения  $\bar{m}_0$  и дисперсию  $\sigma_{\bar{m}}$  определения большого числа параметров модели:

$$\bar{m}_0 = \frac{1}{K} \sum_k \bar{m}_k, \quad \sigma_{\bar{m}} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_i (\bar{m}_k - \bar{m}_0)^2}. \quad (3)$$

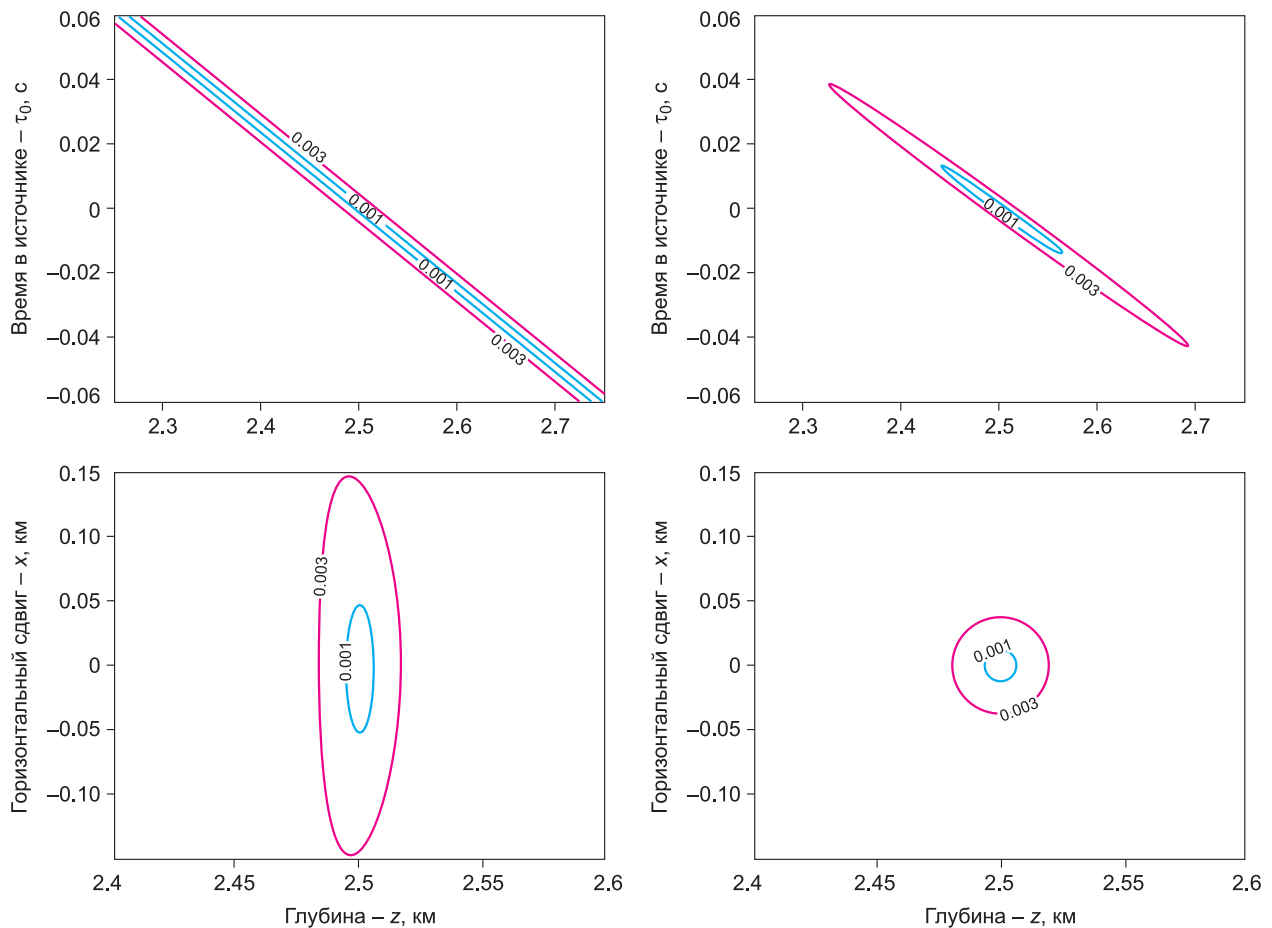
В обоих подходах необходимо знать оценку точности определения времен пробега волн  $\varepsilon$ . Стандартный граф обработки данных скважинного мониторинга включает пикировку времен, поэтому достаточно просто оценить точность данной процедуры. Граф обработки данных поверхностного мониторинга основан на когерентном суммировании и не содержит явной пикировки времен, что затрудняет оценку для этого случая. В [Eisner et al., 2010] такая оценка была проведена для нескольких сильных событий, которые были хорошо видны на сейсмограммах. Для дальнейшего анализа мы взяли точности определения времен из [Ibid], которые составляют 1 мс для скважинных систем (эта оценка является завышенной, поэтому мы также рассматриваем точность 0.5 мс для этого случая) и 3 мс для наземных систем.

Мы также будем считать, что для скважинной системы имеются времена вступлений  $P$ - и  $S$ -волн, а для наземной системы – только  $P$ -волн.

### ПРИМЕРЫ. УРОВНИ ФУНКЦИОНАЛА НЕВЯЗКИ

В качестве модели использована однородная изотропная среда с параметрами:  $V_p = 4$  км/с,  $V_s = 2$  км/с. Рассматриваемые системы наземного и скважинного мониторинга схематически приведены на рис. 2. Для наземной системы наблюдений глубина события  $d$  взята 2.5 км, для скважинной системы – 300 м.

В данном разделе мы рассматриваем стандартный подход к локации микросейсмических событий, т. е.



**Рис. 3.** Изолинии функционала невязки (2) для значений 1 и 3 мс для наземной системы наблюдений.

Слева показаны изолинии для  $ODR = 0.2$ ; справа – для  $ODR = 1$ ; сверху приведены изолинии в плоскости  $\{z, \tau_0\}$ , внизу – в плоскости  $\{x, z\}$ .

скорость считается известной. Поэтому вектор неизвестных параметров будет иметь вид  $m \equiv \{x, z, \tau_0\}$ , где  $(x, z)$  – координаты гипоцентра события.

Для наземной системы наблюдений проанализируем два случая. На рис. 3 показаны изолинии функционала невязки (2) для значений 1 и 3 мс.

Видно, что функционал (2) имеет овражную форму в плоскости  $\{z, \tau_0\}$ , т. е. эти параметры оказываются зависимыми и не определяются независимо друг от друга. Для короткой расстановки ( $ODR = 0.2$ ) глубина фактически не определяется (см. рис. 3, вверху слева); для длинной расстановки ( $ODR = 1$ ) область эквивалентности по глубине составляет почти 400 м в предположении, что точность снятия времен составляет 3 мс (см. рис. 3, вверху справа): проекция изолинии 3 мс на горизонтальную ось.

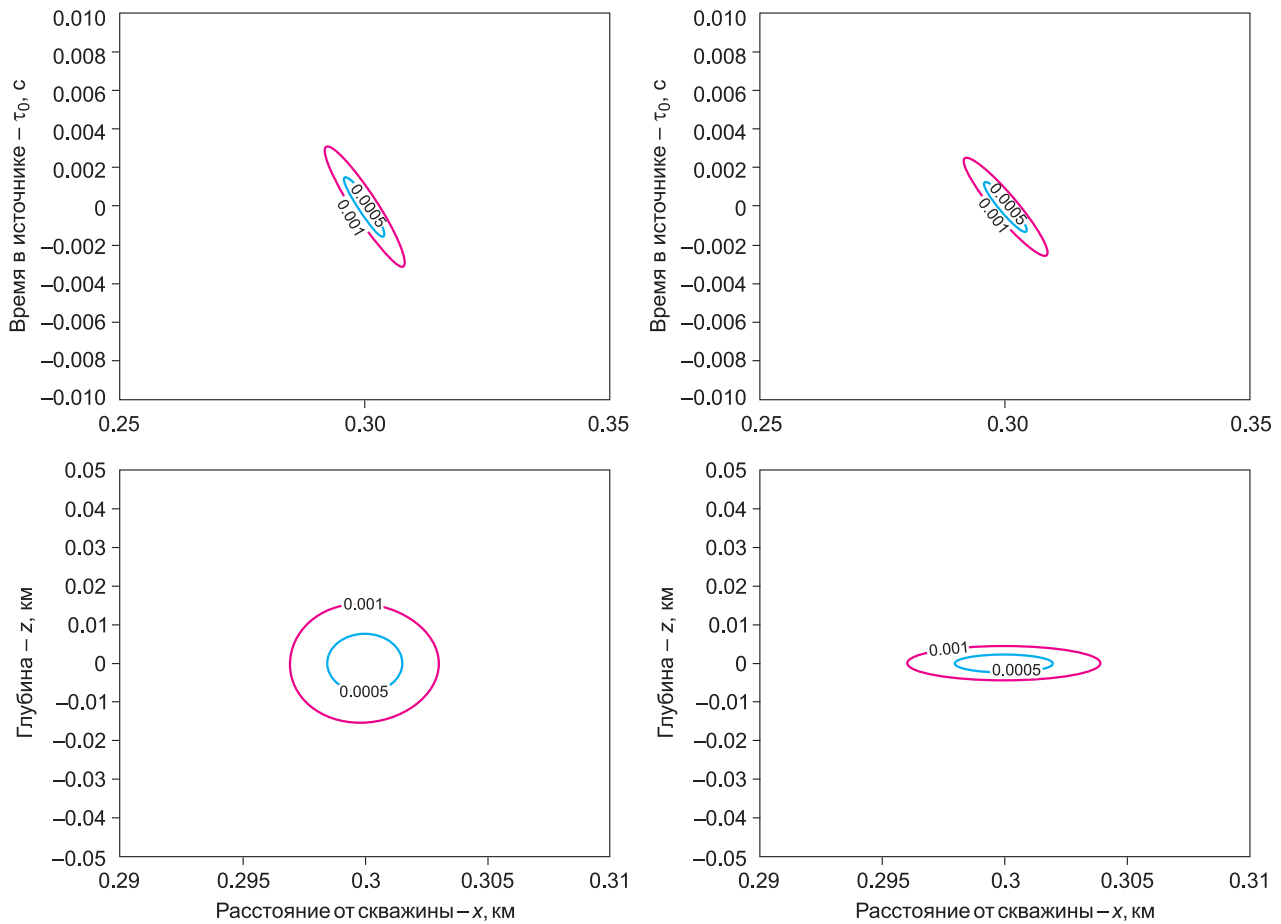
Так же можно оценить разрешающую способность по определению горизонтальных координат (см. рис. 3, внизу). Для длинной расстановки ( $ODR = 1$ ) интервал эквивалентности по горизонтальной координате  $x$  составляет первые десятки метров, в то время как для короткой расстановки ( $ODR = 0.2$ ) – может достигать первых сотен метров.

Для скважинной системы наблюдений характерен другой масштаб расстояний, что обусловлено расположением расстановки приборов в непосредственной

близости к зоне ГПП. Здесь расстояние от скважины до события мы взяли равным 300 м.

На рис. 4 показаны изолинии функционала невязки (2) для значений 0.5 и 1 мс. Напомним (см. рис. 3), что здесь  $x$  обозначает радиальную координату от оси скважины (аналог глубины для наземной системы), а  $z$  – вертикальную координату вдоль скважинной косы (аналог горизонтальной координаты для наземной системы). Видно, что область эквивалентности определения радиального расстояния от скважины  $x$  составляет менее 20 м и практически не зависит от  $ODR$ . Это следует из проекции изолинии 1 мс на горизонтальную ось (см. рис. 4, вверху). Область эквивалентности для глубины  $z$  уменьшается по мере увеличения длины расстановки и сокращается с 30 м для  $ODR = 0.3$  до первых метров для  $ODR = 2$  (см. рис. 4, внизу). Заметим, что такая точность достижима, когда скважинная расстановка достигает уровня проведения ГПП (если значительно отнести ее по глубине от этого уровня, то глубина события будет определяться плохо).

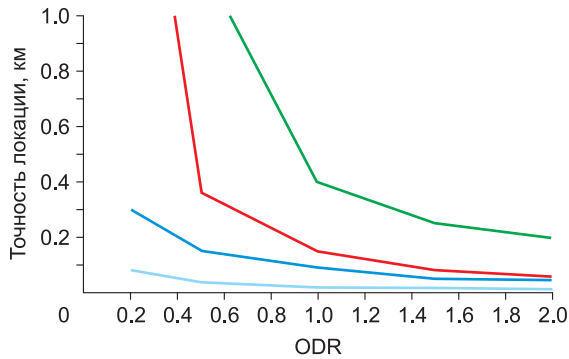
Можно провести более систематический анализ точности определения параметров, если построить изолинии уровня  $\varepsilon$  функционала (2) для большего количества  $ODR$  и для каждого случая измерить интервал эквивалентности для интересующих параметров.



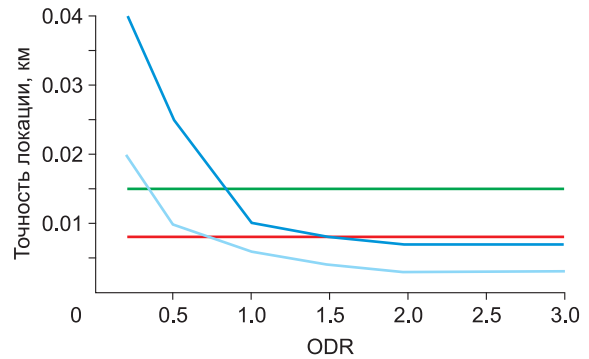
**Рис. 4.** Изолинии функционала невязки (2) для значений 0.5 и 1 мс для скважинной системы наблюдений. Слева показаны изолинии для  $ODR = 0.3$ ; справа – для  $ODR = 2$ ; сверху приведены изолинии в плоскости  $\{x, \tau_0\}$ , внизу – в плоскости  $\{x, z\}$ .

Так, на рис. 5 приведена точность определения (интервал эквивалентности) координат гипоцентра события  $(x, z)$  для наземной системы наблюдения. На основании рисунка можно сделать следующие выводы. Во-первых, увеличение апертуры значительно влияет на точность определения глубины при использовании

наземных систем наблюдения. Системы с  $ODR < 1$  не позволяют определять глубину гипоцентра. Во-вторых, горизонтальная координата определяется значительно лучше и меньше зависит от длины расстановки. Таким образом, можно проводить мониторинг короткими расстановками, если интересует только оп-



**Рис. 5.** Точность локаций единичного события для наземной системы наблюдения. Приведены размеры области функционала невязки, ограниченной изолиниями 3 и 1 мс (области эквивалентности), в осях: глубина – зеленым и красным; горизонтальное положение – синим и голубым.



**Рис. 6.** Точность локаций единичного события для скважинной системы наблюдения. Приведены размеры области функционала невязки, ограниченной изолиниями 1 и 0.5 мс (области эквивалентности), в осях: расстояние до события – зеленым и красным; глубина – синим и голубым.

ределение эпицентров событий, а глубина считается известной.

На рис. 6 приведена точность определения (интервал эквивалентности) координат гипоцентра события ( $x, z$ ) для скважинной системы наблюдения. Видно, что радиальное расстояние от скважины  $x$  определяется довольно хорошо (не хуже 15 м) и не зависит от ODR. Это связано с тем, что при скважинных наблюдениях используются как  $P$ -, так и  $S$ -волны. Точность определения вертикальной координаты не хуже 40 м даже при использовании малых апертур, а при  $ODR > 1$  достигает 10 м (в предположении, что скважинная расстановка нижним концом касается глубины гипоцентра события).

### МОДЕЛИРОВАНИЕ. ИНВЕРСИЯ ЗАШУМЛЕННЫХ ДАННЫХ

В предыдущем разделе было показано, что апертура мало влияет на определение гипоцентров событий в известной модели для скважинных наблюдений. Рассмотрим теперь вопрос о том, можно ли определить не только гипоцентр событий, но и неизвестные скорости. Поскольку в этом случае количество неизвестных параметров модели увеличивается, то будет использован второй подход к оценке точности – метод Монте-Карло с многократной инверсией зашумленных данных.

Рассмотрим несколько постановок обратной задачи:

1) микросейсмическое событие в однородной среде с неизвестной скоростью, в этом случае вектор параметров имеет вид  $\bar{m} \equiv \{V_p, V_s, \tau_0, x, z\}$ ;

2) калибровочный, или перфорационный, взрыв, для которого координата источника считается известной, а вектор параметров имеет вид  $\bar{m} \equiv \{V_p, V_s, \tau_0\}$ ;

3) событие с неизвестным гипоцентром, но известным временем в источнике  $t_0$ , а вектор параметров имеет вид  $\bar{m} \equiv \{V_p, V_s, x, z\}$ ; такая задача приводится для сравнения с традиционной сейсморазведкой, в которой время в источнике известно, а неизвестные координаты ( $x, z$ ) имитируют неизвестное положение отражающей границы.

Синтетические данные были рассчитаны для среды с  $V_p = 4$  км/с,  $V_s = 2$  км/с и события, удаленного от скважины на 300 м. Затем к этим данным добавлялся случайный шум с гауссовым распределением и дисперсией 1 мс и проводилась минимизация функционала (2) для решения обратной задачи. Использовано 50 реализаций случайного шума с последующим решением обратной задачи для разных ODR – от 0.3 до 2.5. Для полученных результатов рассчитывались средние значения и стандартное отклонение для всех параметров модели из  $\bar{m}$ . На рис. 7 показана зависимость стандартного отклонения скорости  $V_p$  от ODR. Хорошо видно, что знание времени в источнике (что соответствует активным сейсмическим методам) очень важно для определения параметров модели. Так, постановка задачи 3 позволяет получить наилучшие результаты для определения  $V_p$  при заданном ODR (красные кресты). Вместе с тем, при увеличении ODR точность результатов пассивных сейсмических методов растет, следовательно, имеет смысл наращивать длину расстановок при микросейсмическом мониторинге, так как скоростная модель никогда не может быть точно определена.

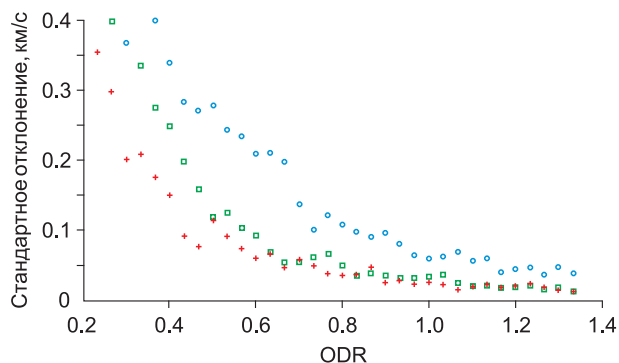


Рис. 7. Стандартное отклонение определения  $V_p$  для разных ODR и постановок обратной задачи.

Синие круги – задача 1 (микросейсмическое событие), зеленые квадраты – задача 2 (перфорационный взрыв), красные кресты – задача 3 (известно время в источнике, но не его положение).

Исходя из рис. 7, можно сказать, что в случае перфораций (задача 2) точность определения  $V_p = 0.2$  км/с (5 %) достигается, если  $ODR = 1$ . Если  $ODR = 0.8$  и больше, то точность определения  $V_p$  составляет 0.05 км/с (1.25 %) и соответствует точности в сейсморазведочной постановке (задача 3). Для случая микросейсмического события (задача 1) точность определения  $V_p$  тоже достаточно высока – при  $ODR > 0.8$  она составляет 2.5 %, хотя в целом уступает точности в задаче с наличием перфорации. Следует отметить, что неправильно определенная скоростная модель приводит к систематическим погрешностям в локациях микросейсмических событий. При расстоянии до события 300 м ошибка  $V_p$  на 5 % приводит к смещению события на 15 м от его действительного положения.

### ВЫВОДЫ

В статье на модельных примерах проанализирована точность локации гипоцентров событий для систем скважинного и наземного микросейсмического мониторинга. Рассмотрены типичные системы наблюдений, которые в настоящее время применяются на практике при мониторинге ГРП. Моделирование проводилось для самой простой модели однородной изотропной среды. Такая постановка позволила единообразно рассмотреть оба типа систем наблюдений и провести их сравнение. Понимание основных факторов, влияющих на точность локации для разных систем, дает возможность геофизику-практику (например, представителю заказчика) участвовать в обсуждении и выборе системы наблюдения для микросейсмического мониторинга ГРП.

Для сравнения систем предложена характеристика ODR (отношение длины расстановки сейсмоприемников к удалению событий от этой расстановки). На наш взгляд, это отношение удачно описывает геометрию системы наблюдения с помощью одного числа и позволяет делать грубые оценки разрешающей способности системы при ее проектировании.

Главной проблемой для такого рода задач является неразрешенность между глубиной и временем возникновения события. Это приводит к тому, что глу-



бина как параметр локации определяется очень плохо. Считается, что точность определения глубины составляет первые сотни метров (это согласуется с известными работами в этой области), а для систем наблюдений с малой апертурой – хуже, чем первые сотни метров.

Приведем некоторые основные выводы из проведенного анализа численных экспериментов. В первую очередь отметим, что при скважинном микросейсмическом мониторинге при хорошей апертуре (длине) расстановки, перекрывающей по глубинам предполагаемую зону ГРП, глубина микросейсмических событий определяется достоверно с точностью до первых метров. Для наземных систем наблюдения, даже при больших апертурах, глубина микросейсмических событий определяется плохо, обычно область эквивалентности составляет первые сотни метров, для систем наблюдений с малой апертурой определение глубины источника не представляется возможным.

Заметим, что глубина событий может являться важным параметром, определяющим правильность процесса гидроразрыва. В литературе описан ряд случаев, когда трещины развивались не на уровне закачки, а уходили в вышележащий (или нижележащий) горизонт. В связи с этим можно рекомендовать наземные системы для мониторинга массовых работ ГРП в близких условиях, если периодически проверять корректность развития трещин по глубине альтернативными наблюдениями.

Горизонтальные координаты микросейсмических событий хорошо определяются (первые десятки метров) как скважинной, так и наземной системой наблюдений. Наземные системы с большой апертурой могут иметь преимущества перед скважинными, когда используется только одна наблюдательная скважина (из-за ошибки поляризационного анализа). При использовании двух наблюдательных скважин и более поляризационный анализ не применяется, и горизонтальные координаты определяются хорошо.

Для определения горизонтальных координат источников при использовании наземных систем можно ограничиться  $ODR = 0.5$  (если она находится над местом проведения ГРП). Такие же размеры скважинной расстановки позволяют с высокой точностью определять как горизонтальную координату, так и глубину гипоцентра (если она расположена близко к глубине проведения ГРП). Для наземных систем необходимо увеличивать длину расстановки, если требуется оценить глубину гипоцентров. Для скважинных систем необходимо увеличивать длину расстановки, чтобы иметь возможность уточнять скоростную модель, наряду с локацией гипоцентров микросейсмических событий.

Неточное знание скоростной модели приводит к систематическим ошибкам локации микросейсмических источников. В статье показана принципиальная возможность определения скоростной модели среды непосредственно из микросейсмических данных при использовании скважинных систем с большой длиной расстановки (большие ODR). Помимо уточнения скоростной модели для лучшей локации источников это открывает возможность для изучения анизотропных свойств среды и мониторинга изменений, происходящих в процессе гидроразрыва.

Авторы выражают благодарность В. Гречке и В.Д. Суворову за плодотворное обсуждение вопросов, 50

связанных с точностью локации микросейсмических событий.

*Работа частично поддержана Минобрнауки РФ (ГК 14.515.11.0071) и СО РАН (интеграционный проект № 127).*

## Литература

- Александров С.И., Бандов В.П., Гогоненков Г.Н.** Контроль геометрии гидроразрыва пласта при помощи скважинного микросейсмического мониторинга. Технологические риски и факторы успеха // *Геофизика*. 2010. № 1. С. 23–28.
- Николаев А.В., Троицкий П.А., Чеботарева И.Я.** Изучение литосферы сейсмическими шумами // *Докл. АН СССР*. 1986. Т. 282, № 9. С. 586–591.
- Шмаков Ф.Д.** Методика обработки и интерпретации данных наземного микросейсмического мониторинга месторождений углеводородов // *Технологии сейсморазведки*. 2012. № 3. С. 65–72.
- Birkelo B., Cieslik K., Witten B. et al.** High-quality surface microseismic data illuminates fracture treatments: A case study in the Montney // *The Leading Edge*. November 2012. N 31 (11). P. 1318–1325.
- Chambers K., Kendall M., Brandsberg-Dahl S., Rueda J.** Testing the ability of surface arrays to monitor microseismic activity // *Geophysical Prospecting*. 2010. V. 58. P. 821–830.
- Diller D.E., Gardner S.P.** Observations and implications from simultaneous recording of microseismic surface and borehole data // *The Leading Edge*. November 2012. № 31 (11). P. 1310–1317.
- Eisner L., Duncan P., Heigl W., Keller W.** Uncertainties in passive seismic monitoring // *The Leading Edge*. 2009. N 28 (6). P. 648–655.
- Eisner L., Hulsey B.J., Duncan P. et al.** Comparison of surface and borehole locations of induced seismicity // *Geophysical Prospecting*. 2010. V. 58. P. 809–820.
- Eisner L., Thornton M., Griffin J.** Challenges for microseismic monitoring // *SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts*. 2011a. P. 1519–1523.
- Eisner L., Zhang Y., Duncan P. et al.** Effective VTI anisotropy for consistent monitoring of microseismic events // *The Leading Edge*. 2011b. N 30 (7). P. 772–776.
- Grechka V.** Data-acquisition design for microseismic monitoring // *The Leading Edge*. 2010. N 29 (3). P. 278–282.
- Grechka V., Duchkov A.A.** Narrow-angle representations of the phase and group velocities and their applications in anisotropic velocity-model building for microseismic monitoring // *Geophysics*. 2011. V. 76, N 6. P. WC127–WC142.
- Grechka V., Singh P., Das I.** Estimation of effective anisotropy simultaneously with locations of microseismic events // *Geophysics*. 2011. V. 76, N 6. P. WC141–WC157.
- Grechka V., Yaskovich S.** Inversion of microseismic data for triclinic velocity models // *Geophysical Prospecting*. 2013 (в печати).
- Hayles K., Horine R., Checkles S., Blangy J.P.** Comparison of microseismic results from the Bakken Formation processed by three different companies: Integration with surface seismic and pumping data // *SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts*. 2011. P. 1468–1472.
- Maxwell S., Rutledge J., Jones R., Fehler M.** Petroleum reservoir characterization using downhole microseismic monitoring // *Geophysics*. 2010. V. 75, N 5. P. 75A129–75A137.
- De Meersman K., Kendall J.-M., Van der Baan M.** The 1998 Valhall microseismicity: An integrated study of relocated sources, seismic multiplets and S-wave splitting // *Geophysics*. 2009. V. 74, N 5. P. B183–B195.



**Morosini M., Daley T., Eales M. et al.** Continuous deep microseismic monitoring of the Karachaganak Field // *Petroleum Geoscience*. 2012. V. 18. P. 279–287.

**Pei D., Quirein J.A., Cornish B.E. et al.** Velocity calibration for microseismic monitoring: A very fast simulated annealing (VFSA) approach for joint-objective optimization // *Geophysics*. 2009. V. 74, N 6. P. WCB47–WCB55.

**Rutledge J., Phillips W.** Hydraulic stimulation of natural fractures as revealed by induced micro earthquakes, Carthage Cotton Valley gas field, East Texas // *Geophysics*. 2003. V. 68, N 2. P. 441–452.

**Thronton M., Eisner L.** Uncertainty in surface microseismic monitoring // *SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts*. 2011. P. 1524–1527.

**Warpinski N.** Microseismic Monitoring: Inside and Out // *J. Petrol. Technol.* November 2009. V. 61 (11). P. 80–85.

**Warpinski N., Kramm R.C., Heinze J.R., Waltherman C.K.** Comparison of single- and dual-array microseismic mapping techniques in the Barnett shale // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 2005. SPE-95568. P. 1–10.

*Поступила в редакцию 11 июля 2013 г.,  
в окончательном варианте – 5 августа 2013 г.*

#### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

**ЯСКЕВИЧ Сергей Владимирович** – аспирант, младший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.  
E-mail: yaskevichsv@gmail.com

**ДУЧКОВ Антон Альбертович** – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.  
E-mail: DuchkovAA@ipgg.sbras.ru