

УДК 550.834.8

**ОБРАБОТКА ДАННЫХ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА  
ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ С УЧЕТОМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ  
АНИЗОТРОПИИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД**

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

<sup>1</sup>*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: yaskevichsv@gmail.com,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*  
<sup>2</sup>*Marathon Oil, 5555 San Felipe St, Houston, TX 77056, USA*

На примере модельных и натурных данных, полученных при наблюдении гидроразрыва нефтегазового пласта формации Баккен (США), рассмотрена возможность одновременного определения местоположения гипоцентров микросейсмических событий и параметров анизотропии скоростей сейсмических волн в массиве горных пород. Показано, что учет анизотропии повышает точность определения пространственного распределения гипоцентров событий и достоверность оценки направления развития трещины.

*Микросейсмический мониторинг, массив горных пород, скоростная модель, анизотропия*

Микросейсмический мониторинг — один из наиболее эффективных современных методов дистанционного контроля техногенных геодинамических явлений при подземной разработке месторождений полезных ископаемых. Реализация этого метода предусматривает установку антенны сейсмоприемников около контролируемого объема массива горных пород и регистрацию его микросейсмической активности. Пространственное распределение (облако) гипоцентров микросейсмических событий позволяет контролировать зоны проявления геодинамических процессов, их энергетические и кинематические характеристики. Эта информация может быть использована для оценки успешности выполнения технологических операций (например, гидроразрыва горных пород [1]) и оптимизации системы разработки месторождений.

Одним из важных направлений применения микросейсмического мониторинга является контроль геометрии трещин гидроразрыва продуктивных пластов (ГРП). Информация о форме, размерах и направлении развития трещин гидроразрыва имеет большое значение для оптимизации технологий добычи углеводородов, в частности добычи газа из сланцевых формаций и угольных пластов.

При проведении микросейсмического мониторинга в настоящее время используются как скважинные [2–4], так и поверхностные системы наблюдений [5, 6]. Для достоверного определения гипоцентров событий при обработке данных микросейсмического мониторинга необходимо знать скоростную модель среды. Важность построения точной скоростной модели для микро-

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект RFMEF160414X0047), организация-исполнитель — Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, руководитель — акад. М. В. Курленя, инженеры С. В. Яскевич, А. А. Дучков — исполнители проекта.

сейсмического мониторинга широко признана [7–11], но влияние неточности используемой скоростной модели на общую ошибку локализации гипоцентров событий остается малоизученным [12]. Сложность построения скоростной модели усугубляется тем, что многие нетрадиционные углеводородные месторождения представлены сланцами, которые, как известно, обладают сильно анизотропными свойствами [13, 14]. Также на естественную анизотропию пород может накладываться анизотропия, вызванная трещиноватостью, образовавшейся в ходе самого гидро-разрыва [15], которую также следует учитывать при построении скоростной модели среды.

Обычно скоростная модель для обработки данных микросейсмического мониторинга строится на основе интерпретации данных акустического каротажа, которая затем калибруется по данным от перфорационных взрывов, для которых известно точное положение источника. Построение анизотропной скоростной модели в такой постановке является сложной задачей. В [16] определялись анизотропные параметры трансверсально изотропной среды с вертикальной осью симметрии (VTI) по данным времен прихода волн от перфорационных взрывов. Использование такого подхода к определению более сложных типов анизотропии оказывается проблематичным, а анизотропные параметры восстанавливаются только частично из-за ограниченной апертуры системы наблюдений [17–20].

В практике микросейсмического мониторинга увеличение апертуры системы наблюдений может быть обеспечено только за счет использования данных от самих микросейсмических событий для построения скоростной модели [21, 22]. При этом анизотропные параметры среды могут быть в перспективе определены одновременно с положениями гипоцентров микросейсмических событий [23, 24].

В данной статье анализируется необходимость учета сейсмической анизотропии при обработке данных скважинного микросейсмического мониторинга, приведены математическая постановка и методы решения обратной задачи для одновременного определения гипоцентров микросейсмических событий и анизотропной скоростной модели. Выполнен модельный эксперимент, имитирующий микросейсмический мониторинг в анизотропной модели. Показано, что инверсия таких данных в предположении изотропии модели может привести к ложному изображению трещины, с заметным искажением положения трещины и ее азимута.

Разработанный подход применен для обработки реальных данных микросейсмического мониторинга ГРП на месторождении Баккен (США). Поляризационный анализ данных показал устойчивое расщепление поперечных волн, что является надежным признаком сейсмической анизотропии. В результате инверсии данных удалось уточнить положение гипоцентров событий и определить анизотропные параметры слоистой модели.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе рассматривается обратная кинематическая задача подбора времен вступления прямых продольной ( $P$ ) и двух поперечных ( $S_1$  и  $S_2$ ) волн для анизотропных моделей. Вектор данных состоит из наблюдаемых времен прихода прямых волн  $\{t_{Qer}^{obs}\}$ , где  $Q$  — тип волны ( $P$ ,  $S_1$  или  $S_2$ ), пришедшей в  $r$ -й приемник для  $e$ -го микросейсмического события. Искомый вектор параметров модели имеет вид (положение горизонтальных границ между слоями считается известным и фиксированным):

$$\mathbf{m} = [\mathbf{c}_l, \mathbf{x}_e, \tau_e], \quad (1)$$

где  $\mathbf{c}_l$  — набор анизотропных параметров для  $l$ -го слоя ( $l = 1, \dots, N_l$ ),  $N_l$  — количество слоев;  $(\mathbf{x}_e, \tau_e)$  — координаты гипоцентра и время возникновения соответственно для  $e$ -го микросейсмического события ( $e = 1, \dots, N_e$ ),  $N_e$  — количество событий.

Прямая задача состоит в расчете времен прихода волн  $\{t_{Q_{er}}^{syn}(\mathbf{m})\}$  для заданной модели  $\mathbf{m}$  (рис. 1) с использованием алгоритма лучевого трассирования для слоисто-однородных анизотропных сред [25].

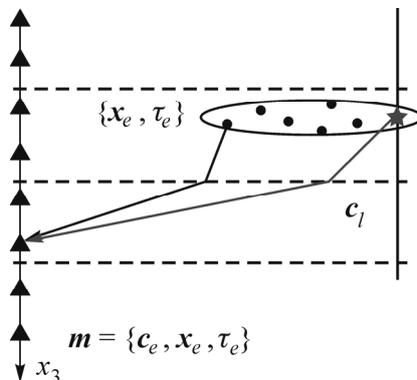


Рис. 1. Параметризация модели: ▲ — положение сейсмоприемников; ● — положение микросейсмических событий; ★ — положение перфорации; штриховые линии — границы между слоями

Обратная задача определения вектора параметров модели  $\mathbf{m}$  формулируется как минимизация функционала невязки между наблюдаемыми и расчетными временами прихода волн:

$$L(\mathbf{m}) = \sum_{Q,e,r} (t_{Q_{er}}^{obs} - t_{Q_{er}}^{syn}(\mathbf{m}))^2 \rightarrow \min. \quad (2)$$

Минимизация функционала  $L(\mathbf{m})$  выполняется с помощью градиентного метода. Соответствующий градиент (матрица производных Фреше по параметрам модели) в данной постановке может быть вычислен аналитически [26]:

$$\mathbf{F} \equiv \frac{\partial t_{Q_{er}}^{syn}}{\partial m_k}. \quad (3)$$

### ПРИМЕР СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Для моделирования микросейсмического мониторинга рассчитаны времена прихода продольной и поперечных волн от ряда микросейсмических событий, выстроенных в линию, как показано черными точками на рис. 2 (имитация трещины ГРП). Система наблюдений состоит из 12 трехкомпонентных датчиков, расположенных в двух вертикальных скважинах (расстояние между сейсмоприемниками 50 м). Рассматривалась однородная трансверсально-изотропная модель с горизонтальной осью симметрии и томпсоновскими параметрами:  $V_{p0} = 3.0$  км/с,  $V_{s0} = 2.0$  км/с,  $\varepsilon = 0.2$ ,  $\delta = 0.2$ ,  $\gamma = 0.2$ , азимут оси симметрии  $\alpha = 30^\circ$ .

Для выбранных параметров модели, расположения гипоцентров микросейсмических событий и приемников рассчитаны времена прихода волн. После добавления в них случайного шума (со стандартным отклонением 0.5 мс) эти времена считались наблюдаемыми.

Далее решалась обратная кинематическая задача, т. е. минимизация функционала невязки (2). Вначале рассматривался вектор параметров модели  $\mathbf{m}$  (см. (1)), в котором использовался правильный набор анизотропных параметров  $\mathbf{c}_1 = [V_{p0}, V_{s0}, \varepsilon, \delta, \gamma, \alpha]$ . Исследовалась ситуация, когда известен правильный тип анизотропии, но сами параметры являются неизвестными. На рис. 2а светлыми кружками показаны гипоцентры микросейсмических событий, полученные в результате решения обратной задачи. Видно, что восстановленные положения гипоцентров хорошо совпадают с истинными. Анизотропные параметры среды были также точно восстановлены по результатам решения обратной задачи.

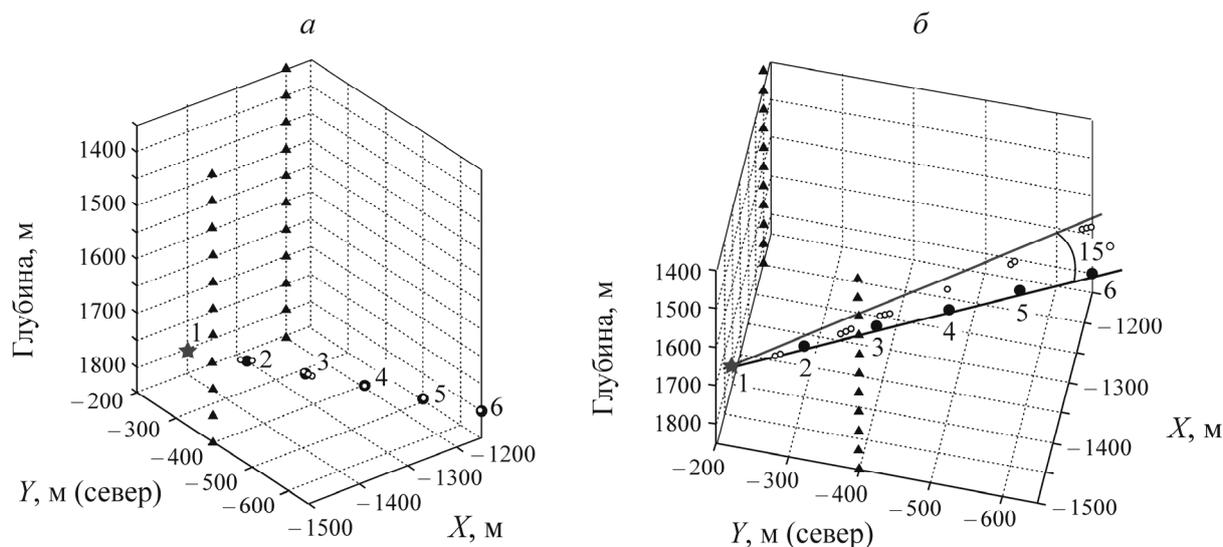


Рис. 2. Результаты локализации гипоцентров микросейсмических событий в предположении анизотропной (а) и изотропной (б) модели:  $\blacktriangle$  — положение сейсмоприемников;  $\bullet$  — истинное положение гипоцентров;  $\circ$  — гипоцентры по результатам решения обратной задачи

Затем для того же набора синтетических данных рассматривался вектор параметров модели  $m$ , в котором параметры среды брались в виде  $c_1 = [V_p, V_s]$ , т. е. рассматривалась ситуация, когда среда ошибочно предполагается изотропной. На рис. 2б светлыми кружками показаны гипоцентры микросейсмических событий, полученные в результате решения обратной задачи в такой постановке. Видно, что восстановленные положения гипоцентров также выстраиваются в линию. Однако положение и азимут этой линии отличаются от истинных значений; отклонение по азимуту в данном примере составило  $15^\circ$ .

Таким образом, можно сделать вывод, что обработка микросейсмических данных в предположении изотропии (для анизотропной реальной модели) приводит к ошибочным результатам, которые также могут интерпретироваться как изображение трещины гидроразрыва. Однако оно дает ошибочное представление о положении и азимуте развития трещины ГРП. Инверсия проводилась для большего разнообразия моделей, и были получены схожие результаты.

Аналогичный результат наблюдался для серии синтетических тестов, для разных значений анизотропных параметров, ориентации оси симметрии трансверсально-изотропной среды и других типов анизотропии.

#### ОБРАБОТКА РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Рассмотрим результаты обработки реальных данных микросейсмического мониторинга ГРП формации Баккен (США), геологическое описание которой можно найти в [27]. В исследуемой области формация Баккен делится на три части: верхняя представлена глинистыми сланцами, средняя — алевролитами, нижняя — глинистыми сланцами. Общая мощность отложений составляет примерно 36 м. Добыча нефти ведется в первую очередь из горизонта средних Баккен.

На рис. 3 приведены данные акустического каротажа, который выполнен в одной из скважин, близкой к месту проведения ГРП. Штриховой линией показана интерпретация этих данных в виде 13-слойной изотропной скоростной модели, которая далее была использована сервисной компанией для обработки данных микросейсмического мониторинга. В модели выделяются пять

контрастных слоев (см. рис. 3): слой 1 — каменноугольные отложения, слои 2, 3 и 4 — верхний, средний и нижний Баккен, слой 5 — девонские отложения. По данным изучения керна породы из слоя 4 обладают выраженными анизотропными свойствами.

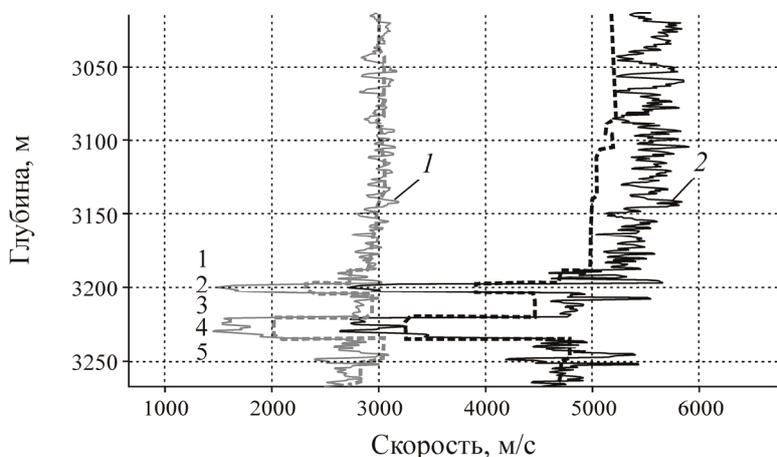


Рис. 3. Скорости продольных (1) и поперечных (2) волн по данным акустического каротажа; штриховыми линиями обозначена слоистая скоростная модель для формации Баккен [24]

Многостадийный ГРП выполнялся в горизонтальной скважине последовательно в нескольких изолированных интервалах, равномерно расположенных по всей длине горизонтальной скважины.

Наблюдения проводились трехкомпонентными сейсмоприемниками в двух субвертикальных скважинах: в одной скважине помещено 14 приемников с интервалом 12.7 м и общей длиной расстановки 160 м (далее скв. 1), в другой — 17 приемников с интервалом 12.7 м и общей длиной расстановки 200 м (далее скв. 2). Дискретизация записи составляла 0.25 мс. Обе расстановки нижней частью захватывают глубину интервала закачки. ГРП выполнялся в открытом стволе, так что перфорационных взрывов не было (не было возможности провести предварительную калибровку скоростной модели).

Всего зарегистрировано около 900 микросейсмических событий, из которых выделено 104 сейсмограммы хорошего качества. Пример одной из сейсмограмм представлен на рис. 4. На каждой сейсмограмме первые 14 трасс относятся к скв. 1, последние 17 — к скв. 2. Приведены разные компоненты записи, а также показаны времена прихода волн. Ошибки в подобранных временах прихода достаточно значительные, о чем свидетельствует среднеквадратическая невязка, равная 3.6 мс.

Кроме того, в рассматриваемых данных систематически наблюдается расщепление поперечных волн, что является надежным признаком сейсмической анизотропии. В качестве подтверждения эффекта расщепления на рис. 5 приведены несколько годограмм (траекторий смещения частиц в приемнике), построенных по трехкомпонентным записям в окне прослеживания поперечной волны. Годограммы имеют хорошо выраженную “крестообразную” форму, что подтверждает наличие двух поперечных волн ( $S_1$  и  $S_2$ ) с линейной поляризацией ортогонально друг другу.

В ходе выполнения исследований проведена дополнительная обработка данных микросейсмического мониторинга: выделены сейсмограммы, для которых волны наблюдались в обеих скважинах; определены времена прихода  $P$ ,  $S_1$  и  $S_2$  волн. Расщепление поперечных волн наблюдалось для 70 из 104 исследуемых сейсмограмм. Общее количество снятых времен вступления волн составило 4607, из них 1172 времен прихода продольной волны, 2585 — быстрой поперечной волны, 850 — медленной поперечной волны.

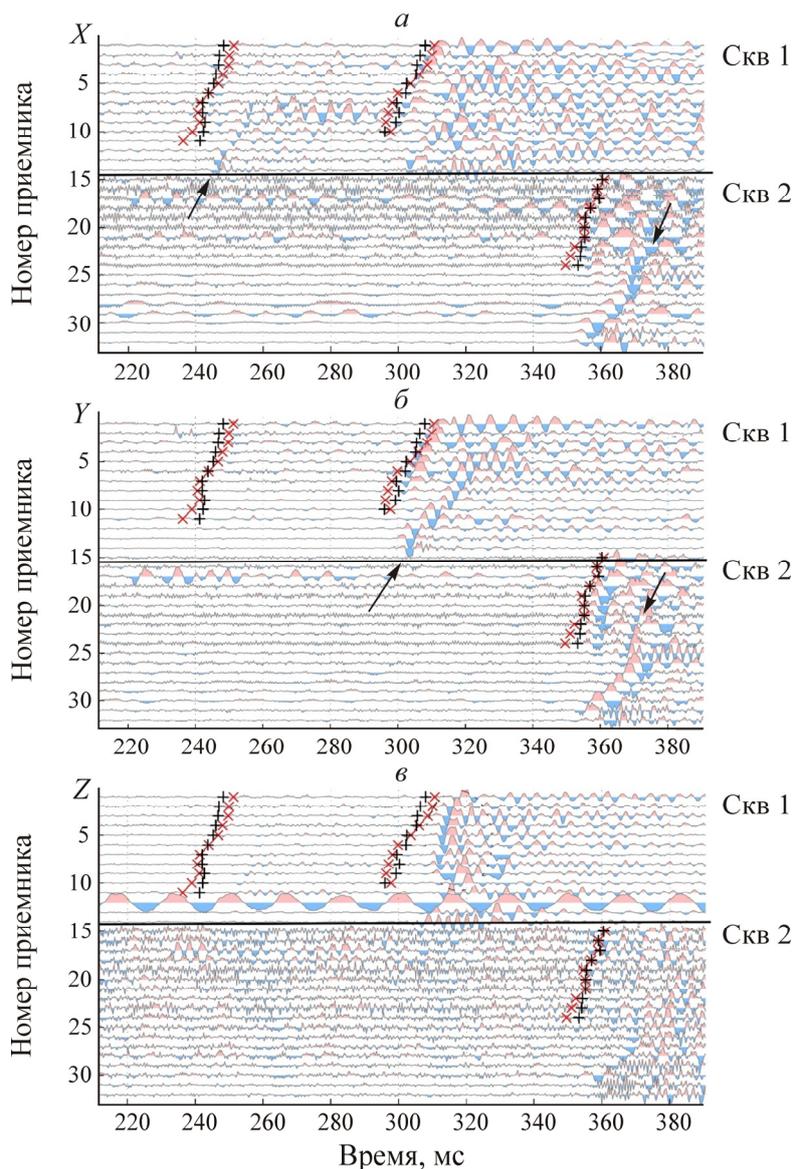


Рис. 4. Пример сейсмограммы от микросейсмического события, компоненты:  $X$  (а),  $Y$  (б),  $Z$  (в); знаком “+” отмечены фактические времена прихода продольных и поперечных волн; знаком “x” — синтетические времена, рассчитанные для изотропной модели

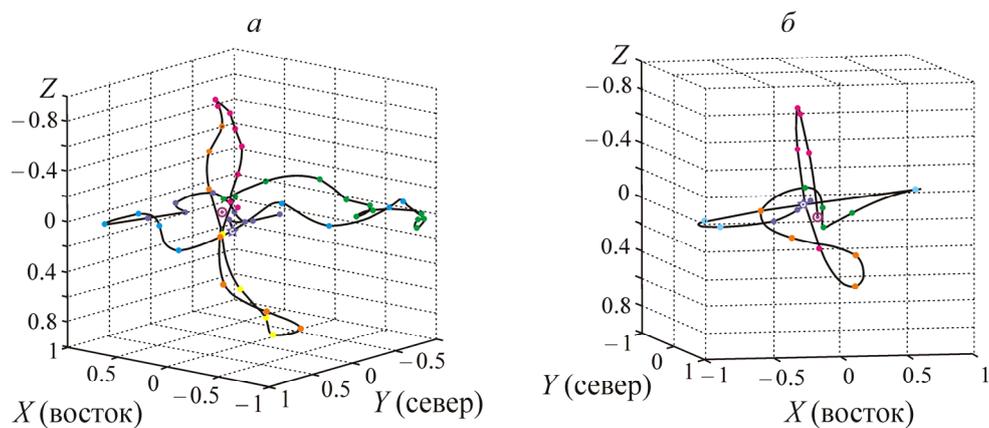


Рис. 5. Годограммы поперечных волн — траекторий смещения частиц в окне поперечной волны (цвет точек соответствует шкале времени) [24]: а — скв. 1; б — скв. 2

Предварительный анализ того, какой тип анизотропии можно восстанавливать по имеющемуся набору данных, проводился с помощью рассмотрения геометрии просвечивания среды лучами от микросейсмических событий. В изотропной модели среды для всего набора событий рассчитана лучевая схема. Направления лучей в каждом из слоев нанесены красными точками на единичные сферы (рис. 6). Основное количество событий произошло в верхнем (1-м) слое, поэтому он наиболее полно освещен с разных углов. Просвечивание 2-го и 3-го слоев также значительно, поэтому они могут рассматриваться как анизотропные (тип анизотропии вплоть до орторомбической или триклинной). В двух нижних слоях освещенность по азимутам ограничена, что делает невозможным определение азимутальной анизотропии.

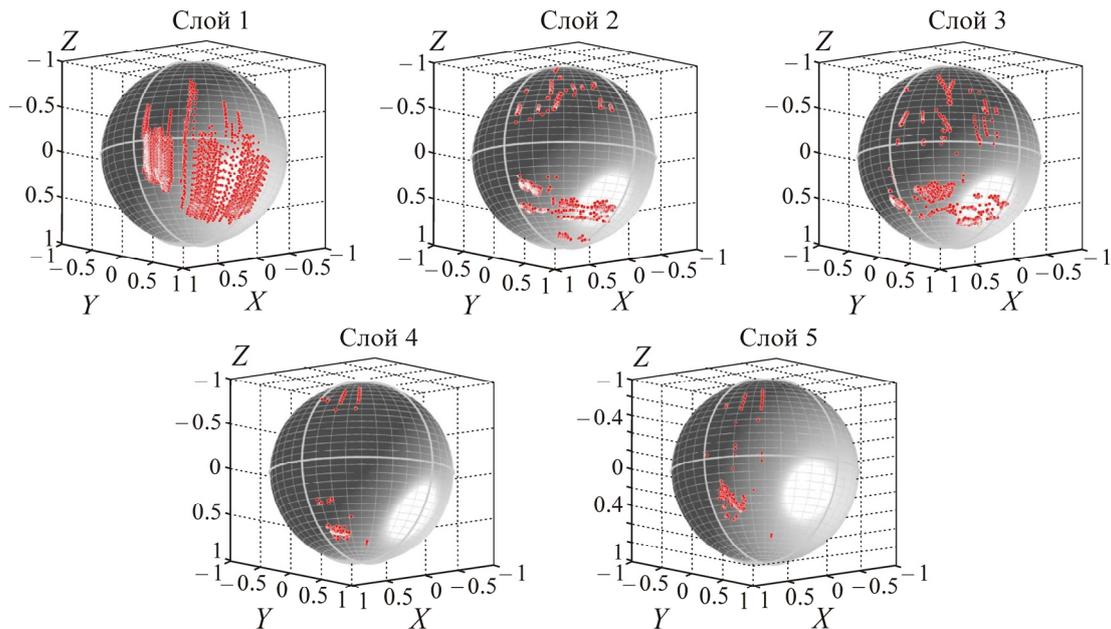


Рис. 6. Геометрия просвечивания пятислойной модели лучами от микросейсмических событий. Точки на сферах — направления лучей от всех событий в каждом из слоев для формации Баккен [24]

Таким образом, при минимизации функционала невязки времен (2) для определения параметров модели  $m$  будем представлять два нижних слоя трансверсально-изотропными с вертикальной осью симметрии (VTI), а верхние три слоя — как имеющие триклинный тип анизотропии (TRI).

Результаты решения обратной задачи приведены на рис. 7, 8. На рис. 7 показаны положения гипоцентров микросейсмических событий. Видно, что использование анизотропной скоростной модели привело к тому, что облако микросейсмических событий стало более узким, т. е. стало напоминать трещину ГРП. Кроме того, облако изменило положение (сместилось приблизительно на 40 м в сторону наблюдательных скважин), что соответствует результатам, полученным для синтетических тестов.

По результатам обработки с учетом анизотропии получена в 6 раз меньшая среднеквадратичная невязка между наблюдаемыми и рассчитанными временами пробега волн: 0.54 мс для анизотропной модели и 3.6 мс для изотропной. Такое уменьшение невязки говорит об улучшении качества обработки данных. Примеры подобранных времен пробега волн для анизотропной скоростной модели приведены на рис. 8, где показаны наблюдаемые времена прихода волн (маркеры без заливки) и рассчитанные для анизотропной модели (красные маркеры). Годографы, отвечающие  $P$ ,  $S_1$  и  $S_2$  волнам, обозначены черным, серым и синим цветом соответственно (разный тип маркеров отвечает разным событиям).

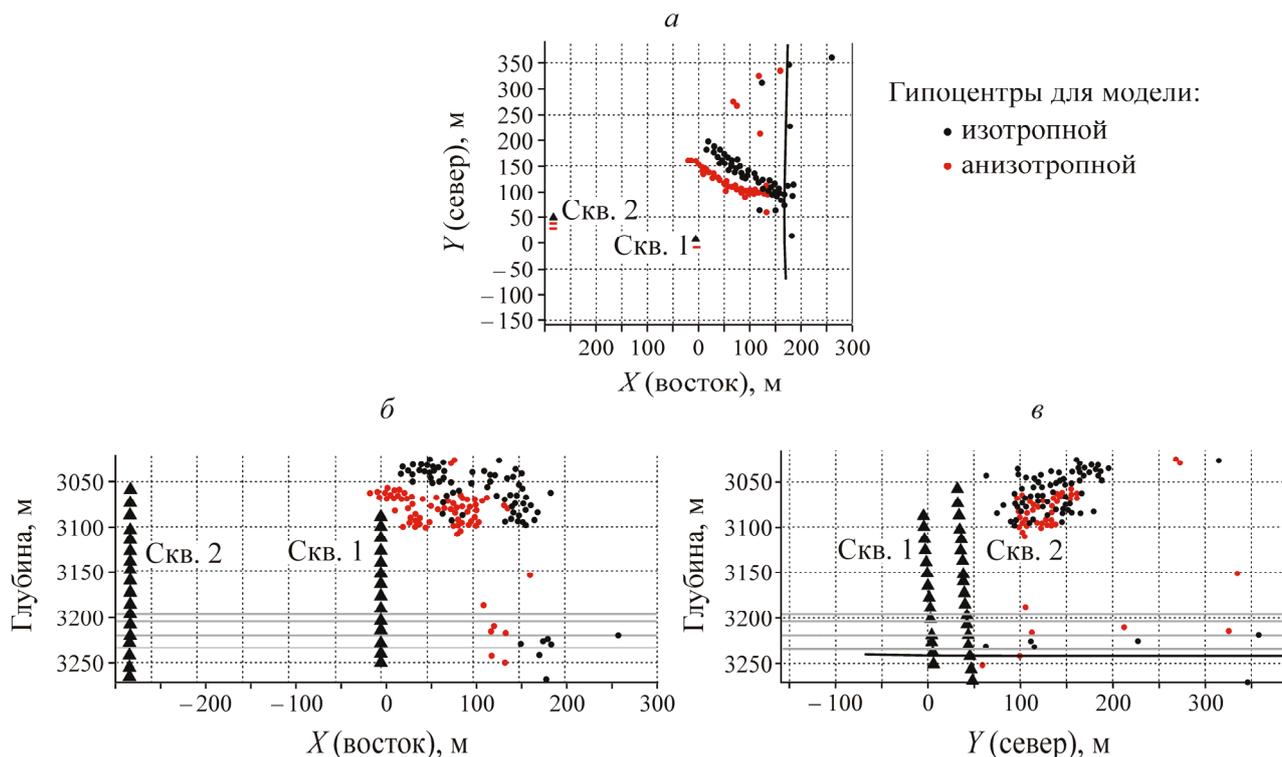


Рис. 7. Результаты локализации гипоцентров синхросейсмических событий: вид в плане (а), вид сбоку с северного (б) и восточного (в) направлений

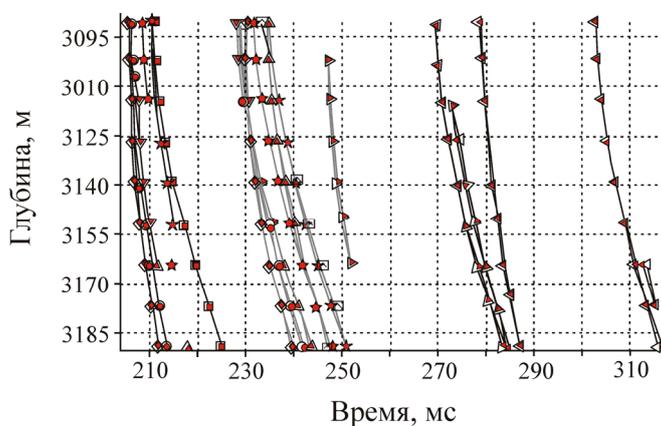


Рис. 8. Наблюдаемые времена прихода волн (пояснения в тексте)

В результате инверсии с использованием анизотропной слоистой среды восстановлены следующие тензоры модулей упругости трех верхних слоев в предположении триклинной симметрии, км<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>:

$$c_{[1]} = \begin{pmatrix} 26.57 & 12.14 & 10.00 & 0.92 & -0.27 & -0.49 \\ & 27.80 & 10.66 & 0.89 & -0.86 & -0.53 \\ & & 22.11 & 0.94 & -0.54 & -0.10 \\ & & & 7.32 & -0.14 & -0.12 \\ & & \text{симметрично} & & 6.95 & 0.20 \\ & & & & & 6.49 \end{pmatrix},$$

$$c_{[2]} = \begin{pmatrix} 15.78 & 1.15 & 1.82 & 0.09 & -0.04 & -0.08 \\ & 15.52 & 1.98 & 0.12 & -0.05 & 0.08 \\ & & 9.42 & -0.04 & 0.00 & -0.14 \\ & & & 3.88 & 0.35 & -0.21 \\ & & \text{симметрично} & & 4.06 & 0.03 \\ & & & & & 6.83 \end{pmatrix},$$

$$c_{[3]} = \begin{pmatrix} 19.81 & 8.62 & 9.00 & -2.37 & -1.44 & 0 \\ & 25.79 & 9.09 & 0.57 & -0.99 & -0.89 \\ & & 20.68 & 2.10 & 0.43 & -0.08 \\ & & & 3.88 & 0.35 & -0.21 \\ & & \text{симметрично} & & 4.06 & 0.03 \\ & & & & & 6.49 \end{pmatrix}$$

и параметры двух нижних слоев с VTI анизотропией:

$$c_{[4]}: V_{P0} = 2.81 \text{ км/с}, V_{S0} = 1.97 \text{ км/с}, \varepsilon = 0.27, \delta = 0.19, \gamma = 0.35,$$

$$c_{[5]}: V_{P0} = 4.17 \text{ км/с}, V_{S0} = 2.38 \text{ км/с}, \varepsilon = 0.09, \delta = -0.16, \gamma = 0.13.$$

Затем обратная задача решалась для случая, когда симметрия верхних трех слоев была упрощена, они рассматривались как орторомбические (ORT) или трансверсально-изотропные с вертикальной осью симметрии (VTI). Восстановленные анизотропные параметры слоев приведены в таблице. Из этих результатов можно делать вывод о том, что слои 2, 3 и 4 формации Баккен являются сильно анизотропными. Это соответствует результатам исследования керна для слоя 4.

Восстановленные параметры анизотропных моделей

Параметры ORT/VTI модели (невязка 0.64 мс)									
$V_{P0}$	$V_{S0}$	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\alpha$
4.69	2.66	0.13	0.11	0.06	0.11	-0.01	0.3	0.04	149°
3.11	2.12	0.34	0.31	-0.04	0.07	0.01	0.36	0.48	145°
4.54	2.69	-0.05	0.04	0.25	0.20	0.11	-0.01	0.01	141°
Параметры VTI/VTI модели (невязка 0.94 мс)									
$V_{P0}$	$V_{S0}$	$\varepsilon$	$\delta$	$\gamma$					
4.56	2.72	0.10	0.07	0.02					
3.16	2.01	0.37	-0.01	0.33					
4.63	2.83	0.01	0.17	-0.12					

Заметим, что выбор типа анизотропии для верхних трех слоев не оказал заметного влияния на положение облака гипоцентров микросейсмических событий, представленного на рис. 7.

Оценка устойчивости решения обратной задачи выполнена по числу обусловленности матрицы производных Фреше  $F$  времен пробега по параметрам модели (см. (3)). Логарифм числа обусловленности составляет 3.08, что, исходя из опыта численных экспериментов, позволяет устойчиво решить обратную задачу локализации микросейсмических событий и определить вид анизотропной скоростной модели.

Устойчивость решения также подтверждается исследованием задачи на предмет необходимости ее регуляризации. Рассмотрим регуляризацию по Тихонову, в которой предлагается решать обратную задачу определения параметров модели  $m_\lambda$ , минимизируя модифицированный функционал невязки:

$$\|Fm_\lambda - d\|_2^2 + \lambda^2 \|m_\lambda\|_2^2,$$

где  $\lambda$  — параметр регуляризации;  $\|\cdot\|_2^2$  — квадрат евклидовой нормы вектора, т. е.  $\|v\|_2^2 = \sum_k g_k^2$ .

Метод  $L$ -кривой [28] позволяет выбрать оптимальный параметр регуляризации, если построить для разных значений  $\lambda$  и соответствующих  $m_\lambda$  кривую с координатами  $(\log_{10}\|Fm_\lambda - d\|, \log_{10}\|m_\lambda\|)$ . В задачах, нуждающихся в регуляризации, эта кривая имеет характерную  $L$ -образную форму, вогнутую в сторону начала координат. Кривая  $L(\lambda)$ , построенная для рассматриваемой задачи, представлена на рис. 9. Она имеет выпуклую форму, т. е. обратная задача может быть решена устойчиво без регуляризации.

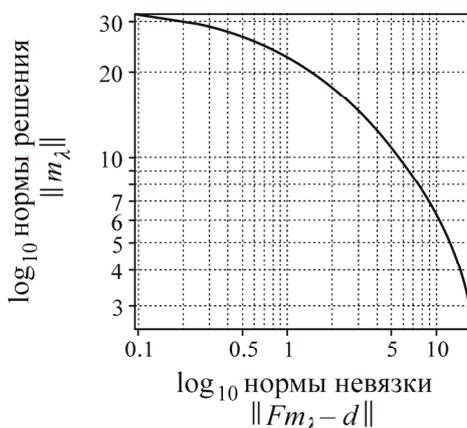


Рис. 9.  $L$ -кривая для выбора регуляризирующего параметра по Тихонову

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты показывают, что данные о временах пробега прямых волн от микросейсмических событий дают достаточно информации, чтобы определить положения их гипоцентров и параметры анизотропной скоростной модели. Такой подход одновременной локализации микросейсмических событий и уточнения скоростной модели отличается от стандартной практики обработки данных скважинного мониторинга, когда для калибровки скоростной модели используются только записи от перфорационных событий с известными координатами источника. Подход приобретает особую важность при проведении ГРП в открытом стволе, когда нет данных от перфорационных взрывов или других событий с известными координатами.

Даже при наличии перфораций использование данных по микросейсмическим событиям позволяет улучшить охват среды сейсмическим просвечиванием, что повышает надежность построения скоростной модели, особенно при определении параметров азимутально-анизотропных сред. Показано, что при улучшении охвата среды сейсмическим просвечиванием могут быть восстановлены упругие модули для анизотропных слоев вплоть до триклинной симметрии. Установлено, что для определения параметров таких сред необходима скважинная система наблюдений достаточно большой длины, которая пересекает по глубине интервал возникновения сейсмических событий.

В приведенных примерах наблюдается также улучшение результатов локализации гипоцентров микросейсмических событий при их обработке с учетом анизотропии. Это связано не только с использованием более точной скоростной модели, но и с привлечением новой кинематической информации о временах прихода двух поперечных волн. В частности, определены положения гипоцентров микросейсмических событий, для которых отсутствовала *P*-волна, но хорошо прослеживались вступления двух поперечных волн.

Использование анизотропной скоростной модели позволило также значительно уменьшить невязки между наблюдаемыми и расчетными временами пробега волн по сравнению с использованием изотропной скоростной модели.

### ВЫВОДЫ

Предложен способ обработки данных микросейсмического мониторинга, который обеспечивает локализацию гипоцентров событий с одновременным определением параметров слоистой азимутально-анизотропной скоростной модели массива горных пород.

Разработанный способ повышает точность локализации гипоцентров микросейсмических событий в анизотропной среде за счет использования времен прихода двух поперечных волн. Экспериментально показано, что неучет анизотропии при мониторинге гидроразрыва горных пород приводит к смещению пространственной локализации трещины относительно истинного ее положения и к ошибкам определения радиуса трещины.

Эффективность предложенного способа подтверждена данными, полученными при мониторинге гидроразрыва формации Баккен (США). Выполненные оценки анизотропных параметров согласуются с их значениями, полученными для образцов керна из нижнего продуктивного пласта.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Доброскок А. А., Линьков А. М.** Моделирование течения, напряженного состояния и сейсмических событий в породах при сбросе давления в трещине гидроразрыва // ФТПРПИ. — 2011. — № 1.
2. **Rutledge J. and Soma N.** Using reflected phases to improve depth resolution of microseismic source locations from single-well observations, Presented at Unconventional Resources Technology Conference, 2013, URTEC 1578994.
3. **Hayles K., Horine R. L., Checkles S., and Blangy J. P.** Comparison of microseismic results from the Bakken Formation processed by three different companies, SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2011.
4. **Александров С. И., Мишин В. А., Буров Д. И.** Наземный микросейсмический мониторинг гидроразрыва пласта: контроль качества и перспективы // Экспозиция Нефть Газ. — 2014. — № 2.
5. **Chambers K., Kendall M., Brandsberg-Dahl S. Rueda J.** Testing the ability of surface arrays to monitor microseismic activity, Geophysical Prospecting, 2010, 58.
6. **Шмаков Ф. Д.** Методика обработки и интерпретации данных наземного микросейсмического мониторинга месторождений углеводородов // Технологии сейсморазведки. — 2012. — № 3.
7. **Eisner L., Duncan P., Heigl W. M., and Keller W. R.** Uncertainties in passive seismic monitoring, The Leading Edge, 2009, Vol. 28, doi: 10.1190/1.3148403.
8. **Zhang H., Sarkar S., Toksoz M. N., Kuleli H. S., and Al-Kindy F.** Passive seismic tomography using induced seismicity at a petroleum field in Oman, Geophysics, 2009, Vol. 74, No. 6, doi: 10.1190/1.3253059.
9. **Zimmer U., Bland H., Du J., Warpinski N., Sen V., and Wolfe J.** Accuracy of microseismic event locations recorded with single and distributed downhole sensor arrays, SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2009.

10. **Jansky J., Plicka V., and Eisner L.** Feasibility of joint 1D velocity model and event location inversion by the neighbourhood algorithm, *Geophysical Prospecting*, 2010, Vol. 58, doi: 10.1111/j.1365-2478.2009.00820.x.
11. **Abel J. S., Coffin S., Hur Y., and Taylor S.** An analytic model for microseismic event location estimate accuracy, *First Break*, 2011, Vol. 29.
12. **Usher P. J., Angus D. A., and Verdon J. P.** Influence of a velocity model and source frequency on microseismic waveforms, Some Bakken microseismic implications for microseismic locations: *Geophysical Prospecting*, 2013, Vol. 61, doi: 10.1111/j.1365-2478.2012.01120.x.
13. **Vernik L. and Nur A.** Ultrasonic velocity and anisotropy of hydrocarbon source rocks, *Geophysics*, 1992, Vol. 57, doi: 10.1190/1.1443286.
14. **Vernik L., and Liu X.** Velocity anisotropy in shales: A petrophysical study, *Geophysics*, 1997, Vol. 62, doi: 10.1190/1.1444162.
15. **Tsvankin I. and Grechka V.** Seismology of azimuthally anisotropic media and seismic fracture characterization, SEG, *Geophysical References*, 2011, Series No. 17.
16. **Maxwell S., Shemeta J., and House N.** Integrated anisotropic velocity modeling using perforation shots, passive seismic and VSP data, CSPG-CSEG-CWLS Convention, 2006.
17. **Verdon J. P., Kendall J.-M., and Wustefeld A.** Imaging fractures and sedimentary fabrics using shear wave splitting measurements made on passive seismic data, *Geophysical Journal International*, 2009, Vol. 179, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04347.x.
18. **Verdon J. P. and Kendall J.-M.** Detection of multiple fracture sets using observations of shear-wave splitting in microseismic data, *Geophysical Prospecting*, 2011, Vol. 59, doi: 10.1111/j.1365-2478.2010.00943.x.
19. **Grechka V. and 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, Vol. 76, No. 6, doi: 10.1190/geo2010-0408.1.
20. **Grechka V., Singh P., and Das I.** Estimation of effective anisotropy simultaneously with locations of microseismic events, *Geophysics*, 2011, Vol. 76, No. 6, doi: 10.1190/geo2010-0409.1.
21. **Li J., Rodi W., Toksoz M. N., and Zhang H.** Microseismicity location and simultaneous anisotropic tomography with differential traveltimes and differential back azimuths, SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2012, pp. 1-5, doi: 10.1190/segam2012-1382.1.
22. **Li J., Toksoz N., Li C., Morton S., Dohmen T., and Katahara K.** Locating Bakken microseismic events with simultaneous anisotropic tomography and extended double-difference method, SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2013.
23. **Grechka V. and Yaskevich S.** Inversion of microseismic data for triclinic velocity models, *Geophysical Prospecting*, 2013, Vol. 61, doi: 10.1111/1365-2478.12042.
24. **Grechka V. and Yaskevich S.** Azimuthal anisotropy in microseismic monitoring: A Bakken case study, *Geophysics*, 2014, Vol. 79, No. 1.
25. **Оболенцева И. Р., Гречка В. Ю.** Лучевой метод в анизотропной среде (алгоритмы, программы). — Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1989.
26. **Cerveny V.** *Seismic ray theory*: Cambridge University Press, 2001.
27. **Meissner F. F.** Petroleum geology of the Bakken Formation Williston Basin, North Dakota, and Montana: Presented at Montana Geological Society 24th Annual Conference, 1991.
28. **Hansen P. C., Pereyra V., and Scherer G.** *Least squares data fitting with applications*, Johns Hopkins University Press, 2012.

*Поступила в редакцию 21/X 2014*