

# Современные подходы к численному моделированию микросейсмических событий

А.В.Буторин, Ф.В.Краснов

**Аннотация**— Исследование рассматривает актуальный вопрос повышения точности картирования трещины гидроразрыва пласта (ГРП) с использованием микросейсмического мониторинга. Данный вопрос актуален прежде всего в связи с возрастающим объемом ГРП при разработке современных залежей УВ. В этой связи необходима выработка методических рекомендаций к проведению полевых работ с целью получения наиболее информативных результатов.

Авторы статьи использовали полномасштабное трехмерное моделирование сейсмической эмиссии от точечного источника, симулирующего излучение энергии в процессе развития трещины ГРП. Для регистрации возникающих упругих колебаний смоделированы несколько систем наблюдения поверхностного и скважинного типа, наиболее распространенных на данный момент на практике.

Моделирование единичного источника позволило получить характерные сейсмограммы для разных систем наблюдения. Анализ результатов при различных условиях приема, дает возможность рассмотреть характерные волновые поля и проанализировать основные достоинства и недостатки разных систем наблюдения.

На модельных результатах показано, что максимальная информативность достигается поверхностной патч-системой, которая обеспечивает широкую апертуру наблюдения и более высокий уровень сигнала на фоне помех.

**Ключевые слова**— Гидравлический разрыв пласта, Микросейсмический мониторинг, Полномасштабное моделирование, Тензор сейсмического момента.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Один из вызовов современной нефтяной индустрии заключается в значительном увеличении трудно извлекаемых запасов (ТРИЗ) в общем объеме разрабатываемых объектов. В общем случае под этим термином подразумеваются запасы традиционных коллекторов, которые имеют невысокую экономическую эффективность при разработке с существующим уровнем технологий, освоенности и доступности разрабатываемых территорий. Среди

геологических факторов отнесения запасов к категории ТРИЗ можно выделить низкую проницаемость отложений, а также малую мощность коллектора.

Одним из решений разработки ТРИЗ, кроме бурения высокотехнологичных горизонтальных скважин, является применение гидравлического разрыва пласта (ГРП), который выступает способом интенсификации добычи нефти. Данная технология заключается в закачке под высоким давлением смеси жидкости и специального расклинивающего агента (проппанта), что приводит к формированию трещины ГРП. Применение ГРП позволяет увеличить радиус охвата скважины, что в условиях низкопроницаемых коллекторов позволяет получить более высокий дебит.

Актуальным вопросом, связанным с проведением ГРП, является контроль параметров возникающей трещины, что определяются достаточно широким спектром факторов, как технологических – связанных с параметрами закачки, так и геологических – реологические свойства пород, напряжение, трещиноватость и т.п. Существует несколько методов определения параметров трещины, образовавшейся в процессе ГРП – их анализ приведен в таблице 1.

Анализ приведенных методов определения характеристик трещины ГРП, позволяет разделить их на три категории: косвенные, прямые в ближней зоне, прямые в дальней зоне. В целом, можно отметить, что определение параметров трещины является сложной задачей, и большинство методов не позволяют ее решить.

Одним из инструментов решения задачи картирования трещины ГРП выступают методы микросейсмического мониторинга (МСМ), которые дают возможность оценить геометрические параметры трещины, такие как длина, высота, асимметрия и азимут, по характеристикам возникающих упругих волн. Таким образом, актуальность метода МСМ обуславливается современными тенденциями в развитии нефтяной индустрии – переход к разработке нетрадиционных и трудноизвлекаемых запасов, сопровождающийся развитием инструмента ГРП. Аналогичные выводы могут быть сделаны при анализе частоты встречаемости термина “microseismic” в международных библиотеках SPE, SEG, EAGE – наблюдается резкое увеличение количества публикаций в промежутке 1996-2006 [14].

Микросейсмический мониторинг заключается в детектировании сейсмической эмиссии и последующем определении типа источника, его положения в

Статья получена 15 декабря 2018.

Ф.В.Краснов, к.т.н., эксперт, ООО «Газпромнефть НТЦ», 190000 г. Санкт-Петербург, набережная реки Мойки д.75-79., krasnov.fv@gazprom-neft.ru, orcid.org/0000-0002-9881-7371, РИНЦ 8650-1127

А.В.Буторин, к.г.-м.н., эксперт, ООО «Газпромнефть НТЦ», 190000 г. Санкт-Петербург, набережная реки Мойки д.75-79, Butorin.av@gazpromneft-ntc.ru.

пространстве и времени возникновения. В качестве источника эмиссии чаще всего рассматриваются деформации, возникающие при росте трещины, образующейся в процессе ГРП. В современных съемках МСМ можно выделить три глобальных типа систем наблюдения (рис. 2): поверхностные системы, массивы неглубоких скважин, скважинные системы. Сводная информация по методикам приведена в таблице 2.

В целом можно сделать вывод, что поверхностная система наблюдения позволяет получить максимальное количество информации, при наименьшем объеме затрат, так как отсутствует необходимость бурения мониторинговых скважин, при достаточно широкой апертуре наблюдений. Однако при этом, поверхностные наблюдения характеризуются минимальным отношением сигнал/шум (ОСШ), что накладывает ограничение на возможность выделения полезного сигнала, а также на точность решения обратной задачи. Именно данное сочетание – потенциальной высокой информативности и высокой степени неопределенности при решении обратной задачи, делает поверхностный мониторинг основным объектом исследования, описанного в данной статье.

Основной задачей данного исследования является увеличение точности решения обратной задачи – то есть определение типа, положения и времени возникновения источника упругой энергии. Возможным путем решения данной задачи является использование специализированных систем наблюдения. Кроме указанной выше задачи, актуальной остается методологическая работа – определение ключевых неопределенностей решения обратной задачи в условиях неполноты входной информации. Другими словами, определение возможных погрешностей в определении ключевых параметров трещины ГРП в зависимости от различных внешних факторов (уровень шума на месторождении, сложное распределение скоростей по разрезу, наличие многолетнемерзлых пород и т.п.)

## II. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Указанные во введении предпосылки легли в основу модельного эксперимента МСМ. Наличие априорной информации о точном решении обратной задачи является главным отличием цифрового эксперимента, от полевого. В данном случае, спектр вопросов, которые необходимо раскрыть и систематизировать достаточно широкий – начиная от оптимальной системы наблюдения, в зависимости от различных внешних факторов, заканчивая неопределенностями алгоритмов решения обратной задачи. В подобных условиях методически более верным, является изучение основных закономерностей на цифровой модели и трансляция полученного опыта на полевой эксперимент.

Одним из первостепенных вопросов, определяющих качество получаемых данных, является оптимальная система наблюдения. Ответ на данный вопрос возможно дать по результатам моделирования. Наблюдается значительное влияние геометрии системы наблюдения

на точность и качество решения обратной задачи [3], при этом в зависимости от типа системы (скважинная, поверхностная) определяется и спектр решаемых задач.

В статье рассмотрены наиболее распространенные системы регистрации (рис. 1):

- **Радиально-лучевая система:** Система наблюдения представляет собой 10-лучевую расстановку симметричную относительно положения источника, в каждом луче 36 каналов, установленных через 50 метров. Суммарное количество регистраторов – 360, радиус расстановки 2000 м.
- **Патч-система:** Представляет собой отдельные группы приемников, установленные на локальной базе. Расстановка симметрична относительно источника, параметры определены на основании публикации [19]. Всего смоделировано 17 патчей, в каждом из которых 121 приемник, установленных на базе 300 x 300 метров, радиус расстановки – 1750 метров. Расстояние между патчами варьирует от 1000 до 1500 метров.
- **Система поверхностных скважин:** Представляет собой сеть из 9 скважин, глубиной 100 метров, в каждой из которых расположены пункты приема с шагом 10 метров. Система построена симметрично относительно источника по осям X-Y («север-восток»). Расстояние между скважинами 500 метров, радиус расстановки - 1000 метров.
- **Горизонтальная скважинная система:** Система моделирует наблюдательную горизонтальную скважину (ГС), проходящую в северо-восточном азимуте. Длина ГС составляет 1225 метров, в пределах которого расположены приемники волнового поля с шагом 25 метров. ГС располагается на глубине источника, горизонтальное расстояние до источника составляет 300-700 метров.
- **Вертикальная скважинная система:** Система моделирует наблюдательную вертикальную скважину, расположенную на удалении 300 метров в юго-восточном направлении от источника. База приема симметрична относительно глубины источника и составляет 200 метров, шаг между приемниками – 10 метров.

Описанные системы приемников осуществляли одновременную регистрацию от единичного источника упругих волн, расположенного в центре поверхностных систем наблюдения. Источник помещен на глубину 2600 метров и представляет собой точечную деформацию, определяемую тензором сейсмического момента.

Вопрос выбора типа источника для моделирования событий в процессе ГРП является актуальным при постановке цифрового эксперимента и решении обратной задачи. Возможными аналогами в данном случае могут являться землетрясения, вызванные внедрением интрузии – процесс образования трещины ГРП в этом случае может рассматриваться как мелкомасштабное внедрение интрузивного тела (пропанга). Внедрение интрузии, как показывает ряд публикаций [3,11], характеризуется CLVD компонентой

TCM, что позволяет сделать предположение о возможном превалировании данного типа источников в процессе ГПП:

$$M = 1.7741 \cdot 10^{-7} \cdot \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \text{Н} * \text{м}$$

Как следует из анализа TCM, рассматриваемый тип источника описывается компенсированным линейным диполем (CLVD) с основной осью – Y, что отвечает развитию трещины в северном направлении.

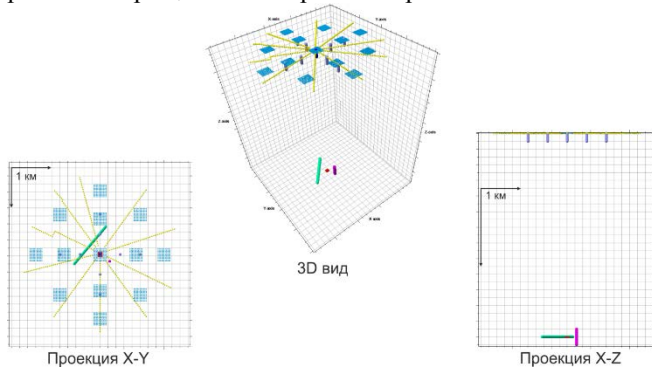


Рис. 1. Используемые в процессе моделирования системы наблюдения. Красным показана радиально-лучевая, синим – патчевая расстановка.

Модель среды задавалась как латерально-изотропная на основании имеющихся данных ВСП. Распространение значений скорости упругих волн и плотности выполнялось в рамках имеющегося структурного каркаса. Влияние верхней части разреза (ВЧР) моделировалось тонким слоем низких значений скорости переменной мощности. Изменения мощности ВЧР задавались случайно в диапазоне от 0 до 25 метров с последующим сглаживанием для получения пространственно-связанной картины.

Полученная модель среды в каждой точке характеризуется значениями скоростей упругих волн и плотности, что позволяет выполнить решение прямой задачи сейсморазведки – расчет поля смещений на определенной сетке, при заданном источнике деформации

Для моделирования были использованы библиотеки, написанные на языке программирования Fortran90, с помощью которых был произведен расчет прохождения трехмерных упругих волн через анизотропную слоистую среду с помощью метода спектральных элементов разработанный [18]. К основным достоинствам метода спектральных элементов относится точность псевдоспектральных методов [16] в сочетании с гибкостью метода конечных элементов [12,13,2]. С вычислительной точки зрения очень важным является возможность параллельных вычислений при использовании метода спектральных элементов из-за диагональной структуры матрицы жесткости [21]. Краевые эффекты обработаны с помощью метода Галеркина-Федорова [15].

Для расчетов был собран кластер из восьми серверов под управлением ОС Linux, каждый из которых имел по 32 вычислительных ядра. Общая вычислительная способность использованного кластера была 256 ядер. Для параллельных вычислений была использована библиотека MPICH [22,23].

Процесс моделирования состоял из следующих основных шагов:

- **Создание сетки.** Авторы использовали регулярные и нерегулярные сетки с 5 точками Legendre-Gauss-Lobatto (LGL) [5] в каждом ортогональном направлении. В трехмерном варианте моделирования мы имеем 125 точек на элемент;
- **Разбиение сетки на сегменты.** Для максимального использования возможностей параллельных вычислений сетка разбивалась на 32 сегмента. Для разбиения использованы эвристические подходы Minimum degree methods [24] и Nested dissection methods [10], а также архитектурные графы [17];
- **Решение уравнений движения волн в упругой среде на сетке.** Генерация сейсмограмм в соответствии с выбранной системой регистрации;
- **Пост-процессинг.** Генерация видео материалов. Конвертация сейсмограмм в формат SEG-Y;

Авторы считают целесообразным отметить, что в расчетах не использовалась популярная библиотека методов линейной алгебры Basic Linear Algebra Subroutines (BLAS). При разработке выяснено, что применение BLAS в решении данного типа задач не приводит к росту производительности и сопряжено с определенными трудностями.

### III. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В результате симуляции было смоделировано волновое поле точечного источника CLVD и сформированы сейсмограммы для каждой из систем наблюдения, которые в дальнейшем анализировались с точки зрения их информативности и возможности решения обратной задачи. Для каждой системы наблюдения сейсмограммы представлены трехкомпонентными трассами – одной вертикальной (Z) и двумя горизонтальными (Y и X).

1) *Радиальная система наблюдения представлена десятью лучами по 36 приемников в каждом (рис. 2), которые направлены по разным азимутам. Подобная конфигурация позволяет относительно равномерно изучить восходящий волновой фронт, как по оффсетам, так и по азимутам. Данная система наблюдения является одной из наиболее распространенных в современных отечественных работах МСМ.*

На полученных сейсмограммах однозначно отмечается время вступления P- и S-волн, при этом наблюдается выраженная закономерность изменения амплитуд, связанная с особенностями источника упругих волн.

На вертикальной (Z) сейсмограмме уменьшение амплитуды P-волны наблюдается от источника к краевым частям лучей. При этом уменьшение амплитуды вдоль оси X (лучи 3-4, 8-9) происходит существенно медленнее, чем по оси Y (лучи 10-1-2, 5-6-7). Для S-волн наблюдается обратная закономерность. Поперечная волна характеризуется минимальными амплитудами в точке проекции источника, по мере увеличения оффсета происходит рост амплитуды, однако данная закономерность наблюдается только в

направлении оси  $Y$  (лучи 10-1-2, 5-6-7), в направлении оси  $X$  амплитуды  $S$ -волны практически отсутствуют.

На горизонтальной  $Y$ -сейсмограмме наблюдается неравномерное распределение амплитуд – основная энергия приходится на  $S$ -волну. При этом распределение энергии, как для продольных, так и для поперечных волн, носит знакопеременный характер. Изменение знака происходит симметрично относительно оси  $X$ . Абсолютные значения амплитуд увеличиваются с оффсетом, при этом в направлении оси  $Y$  (лучи 10-1-2 и 5-6-7) амплитуды имеют более высокие абсолютные значения.

На горизонтальной  $X$ -сейсмограмме также наблюдается увеличение амплитуд с удалением от источника энергии. Продольная волна характеризуется знакопеременным распределением амплитуд относительно оси  $Y$ , при этом основная часть энергии распространяется вдоль оси  $X$ . Поперечная волна имеет сложное распределение амплитуд, изменение знака происходит относительно оси  $X$ , однако при этом наибольшая часть энергии распространяется в направлениях СЗ-ЮВ и СВ-ЮЗ. Необходимо отметить полное отсутствие распространения энергии вдоль оси  $Y$ , что может наблюдаться на сейсмограмме по лучу 6.

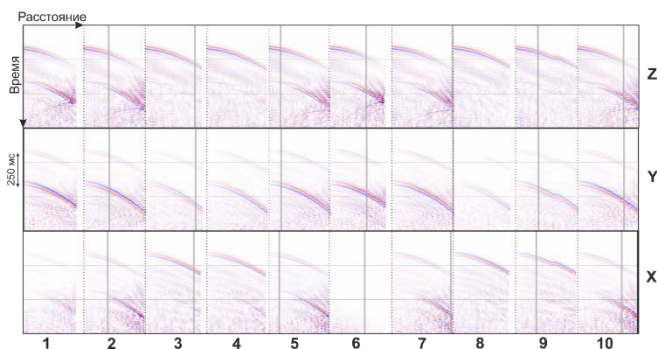
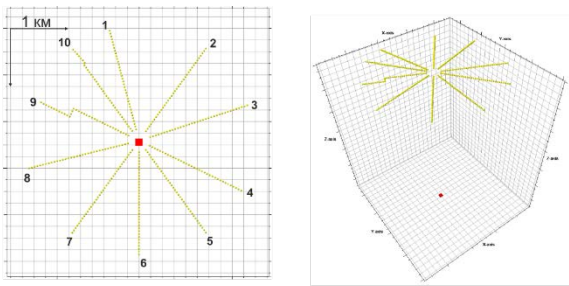


Рис. 2. Характерная запись радиально-лучевой системы наблюдения. Сверху – вид системы наблюдения, снизу – соответствующие сейсмограммы.

Изучение распределения энергии упругих волн по азимутам позволяет составить диаграммы направленности для моделируемого события – источника CLVD направленного вдоль оси  $Y$  (рис. 3).

Для  $Z$ -компоненты энергия  $P$ -волн максимальна вблизи оси  $X$  и затухает вдоль оси  $Y$  с удалением от источника, энергия  $S$ -волны не наблюдается вдоль оси  $X$ , увеличиваясь вдоль оси  $Y$ . Изменение знака отсутствует.

$Y$ -компонента характеризуется знакопеременным распределением энергии  $P$ - и  $S$ -волн относительно оси  $X$ , увеличение абсолютных значений происходит вдоль оси  $Y$ . При этом большая часть энергии наблюдается в поперечной волне.

$X$ -компонента также характеризуется знакопеременным распределением колебаний, однако изменение знака происходит относительно оси  $Y$ . Для продольной волны отсутствует распространение энергии вдоль оси  $Y$ , увеличение амплитуды колебаний происходит вдоль оси  $X$ . Поперечная волна характеризуется отсутствием распространения энергии вдоль оси  $Y$  и затуханием энергии вдоль оси  $X$ . Увеличение энергии колебаний происходит в диагональных направлениях (СЗ-ЮВ, СВ-ЮЗ).

Таким образом, можно сделать вывод, что при использовании только вертикальной компоненты  $Z$  и незначительной апертуры расстановки, характер распределения амплитуд для источника CLVD является схожим с изотропным эксплозивным источником (ISO). Корректное восстановление типа события требует привлечения горизонтальных компонент и учета поперечных волн. При этом необходимо учитывать низкое соотношение сигнал/шум в реальных поверхностных данных.

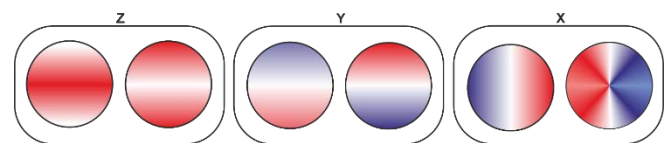


Рис. 3. Характерное излучение энергии для разных компонент поля, отдельно для  $P$ -волн (слева) и  $S$ -волн (справа).

2) Другим типом поверхностной расстановки, рассматриваемой в данной статье, является система патчей – групп приемников, расположенных на небольшой базе.

Характерные записи патчей приведены на рис. 4. При нулевом удалении, когда центр патча располагается над источником, время прихода волны на приемники оказывается практически одинаковым (рис. 4б), однако при этом наблюдается только  $P$ -волна на  $XZ$ -компоненте, остальные компоненты характеризуются слабым уровнем энергии. При увеличении апертуры разница прихода волн к приемникам внутри патчей становится существенной, что связано с кривизной восходящего фронта.

Распределение амплитуд (рис. 5) носит аналогичный характер, в этом случае система патчей позволяет повысить соотношение сигнал/шум при суммировании трасс внутри одной локальной расстановки. Однако, как видно из иллюстраций, даже при небольшом увеличении апертуры требуется учет кривизны фронта.



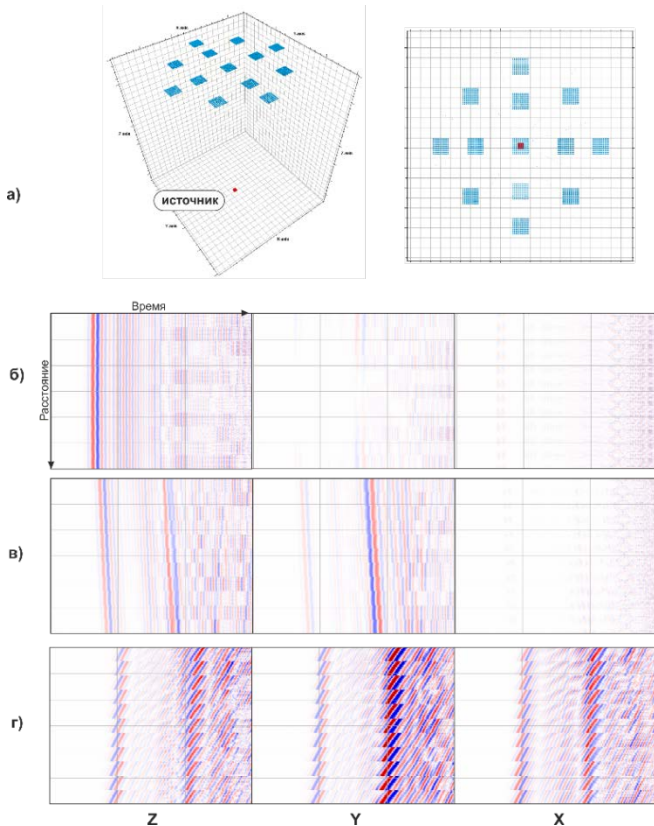


Рис. 4. Пример моделирования для патч-системы наблюдения. а) Общий вид системы наблюдения; б) сейсмограммы для центрального патча; в) сейсмограммы для патча на оси Y; г) сейсмограммы для северо-восточного патча.

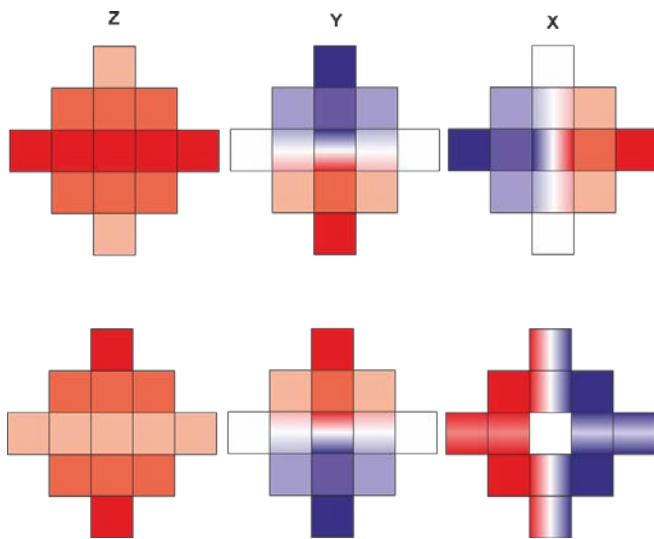


Рис. 5. Характерное излучение энергии для разных компонент поля, отдельно для P-волн (сверху) и S-волн (снизу).

3) Промежуточной системой является группа неглубоких скважин, в качестве подобной системы смоделировано 9 скважин глубиной 100 метров, расположенных вдоль осей X и Y (рис. 6).

На полученных сейсмограммах однозначно выделяются фронты восходящих волн, а также нисходящих отраженных от свободной поверхности волн, характеризующихся обратным наклоном годографа.

В данном случае полностью сохраняется закономерность изменения амплитуд P- и S-волн для различных компонент поля, описанная ранее.

Преимуществом подобной системы наблюдения является большее соотношение сигнал/шум, за счет

заглубления ниже зоны ВЧР. Однако, необходимость бурения скважин сказывается на экономической эффективности подобной расстановки.

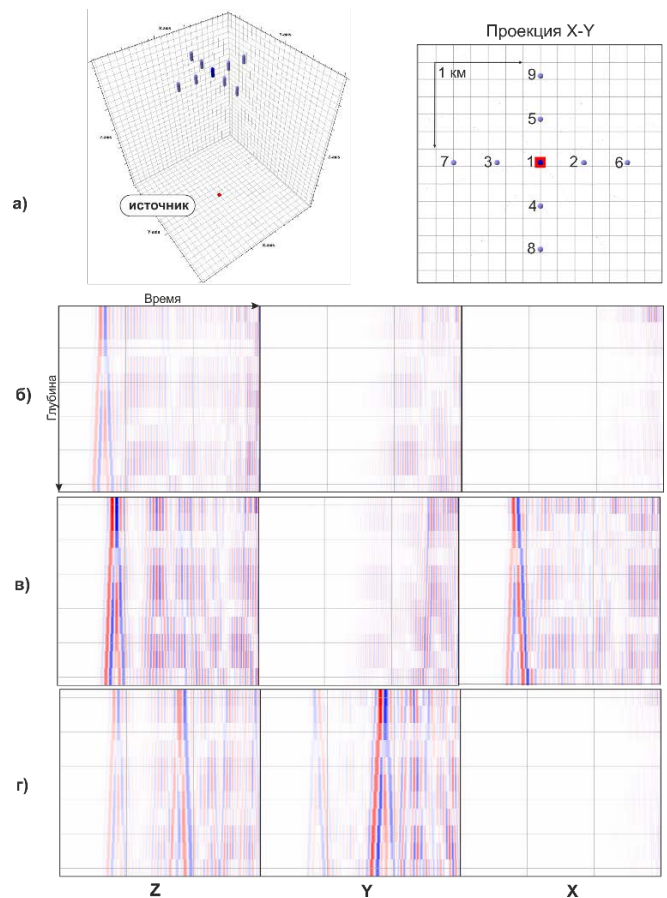


Рис. 6. Пример моделирования для системы неглубоких скважин. а) Общий вид системы наблюдения; б) сейсмограммы для скв. 1; в) сейсмограммы для скв. 6; г) сейсмограммы для скв. 8.

4) Скважинные системы наблюдения также применяются при мониторинге ГРП, однако в отечественной геофизике данный тип наблюдения менее распространен. Необходимым требованием проведения подобного мониторинга является наличие наблюдательной скважины, удаленной на незначительное расстояние от точки инициации (источника). На практике ограничением является удаление  $n \cdot 100$  метров, в зависимости от свойств геологического разреза и технического состояния скважины.

Среди скважинных систем можно выделить вертикальные и горизонтальные системы наблюдения, которые соответствуют разным типам скважин, используемых в качестве мониторинговых.

Вертикальная система мониторинга рассмотрена на рис.7 – использована база наблюдения 200 метров, симметричная относительно положения источника. Расстояние до наблюдательной скважины – 300 метров в юго-восточном направлении относительно источника. Для всех компонент сейсмограммы необходимо отметить превалирование энергии S-волны, продольная волна при этом выражается слабым первым вступлением.

В случае вертикальной сейсмограммы (Z) наблюдается изменение знака амплитуды колебания симметрично

относительно глубины источника. Для горизонтальных компонент знак колебания сохраняется неизменным на всей базе наблюдения.

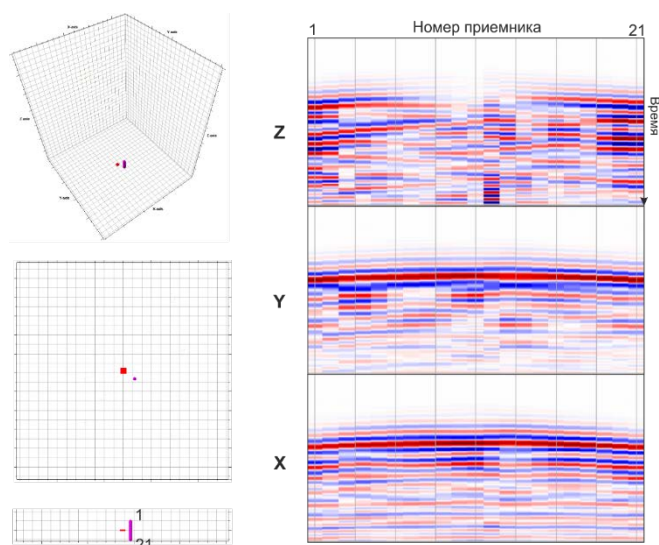


Рис. 7. Пример моделирования для вертикальной скважины. Общий вид системы наблюдения (слева) сейсмограммы для соответствующих компонент (справа).

В качестве горизонтальной системы наблюдения (рис. 8) рассмотрена приемная расстановка длиной 1225 метров, расположенная по глубине на уровне источника. Горизонтальная расстановка имеет СВ-ЮЗ простирание и расположена на расстоянии 300-700 метров от источника. Данная система моделирует ситуацию многоствольной горизонтальной скважины, в этом случае неактивные стволы (в которых не проводится в данный момент ГРП), могут использоваться в качестве наблюдательных. Подобные системы широко используются на сланцевых месторождениях Северной Америки, в отечественной практике данная система пока не получила распространения.

На полученных вертикальных (Z) сейсмограммах наблюдается отсутствие полезных волн. Отсутствие энергии в плоскости источника подтверждается также вертикальной системой наблюдения, описанной ранее. На горизонтальных компонентах (Y и X) наблюдается интенсивная S-волна, характерной особенностью является наличие зоны смены знака. Для XY-сейсмограммы область смены знака смещена к началу горизонтальной системы, что отражает границу смены знака вдоль оси X, подобная закономерность наблюдается и на поверхностных системах наблюдения. Для XX-сейсмограммы смена знака напротив, смещена в область окончания ГС, что отражает отсутствие энергии и границу смены знака вдоль оси Y, также наблюдается затухание энергии в сторону оси X. Подобная система излучения энергии также полностью согласуется с поверхностными наблюдениями, приведенными ранее.

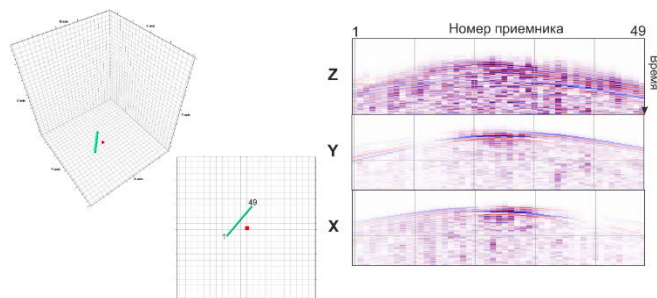


Рис. 8. Пример моделирования для горизонтальной скважины. Общий вид системы наблюдения (слева) сейсмограммы для соответствующих компонент (справа).

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Увеличение доли нетрадиционных и трудноизвлекаемых запасов приводит к необходимости применения ГРП для стимуляции притока нефти из слабопроницаемых коллекторов. Наиболее информативным методом определения параметров образовавшейся трещины ГРП является микросейсмический мониторинг, направленный на изучение упругой энергии, высвободившейся в процессе деформации.

Современное состояние вопроса МСМ требует проведения методических работ, направленных на оптимизацию как системы наблюдения и полевых работ, так и на определение наиболее устойчивых и точных методов решения обратной задачи. Наиболее оптимальным решением данной комплексной задачи является привлечение моделирования волнового поля, образующегося в процессе проведения ГРП.

В статье приведен результат подобного моделирования, а также описан процесс постановки данной задачи с целью получения наиболее качественного результата. Рассмотренные системы наблюдения позволяют сделать ряд выводов о возможности решения практических задач, связанных с мониторингом ГРП.

- При планировании скважинных систем наблюдения необходимо учитывать возможное наличие областей нулевой энергии. В случае с поверхностными системами данный фактор менее критичен.
- Полное восстановление ТСМ по единичным скважинным наблюдениям практически невозможно, в этой задаче значительное преимущество имеют поверхностные системы наблюдения, в которых имеется возможность широкого изучения поля в дальней зоне. Для восстановления ТСМ скважинной системой наблюдения необходимо использование нескольких скважин, расположенных под разными азимутами относительно источника сигнала.
- Поле источника CLVD в дальней зоне (поверхностные системы), при ориентировке диполя в плоскости X-Y, в значительной степени совпадает с изотропным эксплозивным источником.
- Система наблюдения с использованием патчей позволяет в дальнейшем использовать статистический эффект от суммирования каналов внутри одной системы с учетом кривизны фронта восходящих волн. В большинстве случаев подобное суммирование будет производиться синфазно, за

исключением областей изменения знака смещения. Данный эффект потенциально должен приводить к повышению отношения сигнал/шум, что является основной проблемой поверхностных наблюдений.

Дальнейшее развитие исследования планируется в области поиска наиболее оптимального алгоритма решения обратной задачи, а также выработки методических рекомендаций для постановки полевых наблюдений.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

1. V Aki, K., P.G. Richards, "Quantitative seismology", 2002, 700 p.
2. Bao H. et al. Large-scale simulation of elastic wave propagation in heterogeneous media on parallel computers //Computer methods in applied mechanics and engineering. – 1998. – Т. 152. – №. 1-2. – С. 85-102.
3. Behura J., F. Forghani, F. Bazargani, "Improving microseismic imaging: role of acquisition, velocity model, and imaging condition", SEG Technical Program Expanded Abstracts 2013, 5258 p. <https://doi.org/10.1190/segam2013-1073.1>
4. Belachew M., C. Ebinger, D. Cote, "Source mechanism of dike-induced earthquakes in the Dabbahu-Manda Hararo rift segment in Afar, Ethiopia: implications of faulting above dikes", Geophysical Journal International, 192, 2013, 907-917 p.
5. Brix K., Canuto C., Dahmen W. Legendre-Gauss-Lobatto grids and associated nested dyadic grids //arXiv preprint arXiv:1311.0028. – 2013.
6. Cipolla, Wright, "Diagnostic techniques to understand hydraulic fracturing: what? why? how?", Society of Petroleum Engineers, 2002. doi:10.2118/59735-MS 2002
7. Dahm T., F. Kruger, "Moment tensor inversion and moment tensor interpretation", New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2), Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, pp. 1—37. [http://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2\\_IS\\_3.9](http://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_IS_3.9)
8. Eyre T.S., M. Van Der Baan, "Overview of moment-tensor inversion of microseismic events", The Leading Edge Aug 2015, Vol. 34, No. 8, pp. 882-888
9. Eyre S. T., M. Van Der Baan, "Introduction to moment tensor inversion of microseismic events", GeoConvention 2015
10. George A. Nested dissection of a regular finite element mesh //SIAM Journal on Numerical Analysis. – 1973. – Т. 10. – №. 2. – С. 345-363.
11. Kanamori H., G. Ekstrom, A. Dziewonski, J.S. Barker, S.A. Sipkin, "Seismic Radiation by magma injection: an anomalous seismic event near Tori Shima, Japan", Journal of Geophysical research, v. 98, No. B4, pp. 6511-6522, 1993
12. Lysmer J., Drake L. A., Bolt B. A. A finite element method for seismology //Methods in computational physics. – 1972. – Т. 11. – С. 181-216.
13. Marfurt K. J. Accuracy of finite-difference and finite-element modeling of the scalar and elastic wave equations //Geophysics. – 1984. – Т. 49. – №. 5. – С. 533-549.
14. Maxwell S., J. Deere, "An introduction to this special section: Microseismic", The Leading Edge, 2010
15. Minolia A., Cesar A., DA. Kopriva. "Discontinuous Galerkin Spectral Element Approximations on Moving Meshes.", Phys, 2011
16. Orszag, Steven A., "Comparison of Pseudospectral and Spectral Approximation", 1972 Studies in Applied Mathematics. 51 (3): pp. 253–259
17. Pellegrini F., "Static mapping by dual recursive bipartitioning of process and architecture graphs". Proceedings of SHPCC'94, Knoxville, Tennessee, pp. 486-493. IEEE Press, 1994
18. Patera A. T. A spectral element method for fluid dynamics: laminar flow in a channel expansion //Journal of computational Physics. – 1984. – Т. 54. – №. 3. – С. 468-488.
19. Shuck T., D.E. Diller, B. Fish, P. Smith, K. Wallace, "Surface microseismic in an extreme environment", The Leading Edge(2015),34(8), pp.936 <http://dx.doi.org/10.1190/tle34080936.1>
20. Stanek F., J. Valenta, D. Anikeev, "Semblance for Microseismic Event Detection", SEG 2014
21. Teukolsky S. A. Short note on the mass matrix for Gauss-Lobatto grid points //Journal of Computational Physics. – 2015. – Т. 283. – С. 408-413.
22. Thakur R., W. Gropp, "Improving the Performance of Collective Operations in MPICH", Springer, 2003, pp. 257-267.
23. Thakur R., W. Gropp, B. Toonen, "Optimizing the Synchronization Operations in MPI One-Sided Communication," Int'l Journal of High Performance Computing Applications, (19)2, pp. 119-128, 2005.
24. Tinney W. F., Walker J. W. Direct solutions of sparse network equations by optimally ordered triangular factorization //Proceedings of the IEEE. – 1967. – Т. 55. – №. 11. – С. 1801-1809.

Таблица 1 Методы определения параметров трещины ГРП по материалам [6].

Тип	Метод	Возможность определения								
		Длина	Высота	Асимметрия	Ширина	Азимут	Угол	Объем	Проводимость	
Прямые в дальней зоне	Поверхностный наклономер	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Green	Green	Green	Red	Red
	Скважинный наклономер	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Red	Green	Red	Red
	Микросейсмический мониторинг	Green	Green	Green	Red	Green	Yellow	Red	Red	Red
Прямые в ближней зоне	Радиоактивные трассеры	Red	Yellow	Red	Yellow	Yellow	Red	Red	Red	Red
	Температурный каротаж	Red	Yellow	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
	ГДК	Red	Yellow	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
	Имиджеры	Red	Yellow	Red	Red	Yellow	Yellow	Red	Red	Red
	Скважинное видео	Red	Yellow	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
	Диаметр скважины	Red	Red	Red	Red	Yellow	Red	Red	Red	Red
Косвенные	Анализ давления трещин	Yellow	Yellow	Red	Yellow	Red	Red	Yellow	Yellow	Yellow
	Испытания скважин	Yellow	Red	Red	Yellow	Red	Red	Red	Yellow	Yellow
	Анализ разработки	Yellow	Red	Red	Yellow	Red	Red	Red	Yellow	Yellow



Таблица 2 Типы систем наблюдения МСМ.

<b>Название</b>	<b>Определение тензора сейсмического момента</b>	<b>Точность</b>	<b>Расстановка приборов</b>	<b>Уровень помех</b>	<b>Стоимость</b>
Наземная расстановка	+	Наибольшая при определении гор. длины и азимута трещин	Съёмная	Высокий	Наименьшая для одного куста
Массив неглубоких скважин	+	Наибольшая при определении гор. длины и азимута трещин	Постоянная	Средний	Наименьшая для нескольких кустов
Скважинные системы	Требуется 2 и более скважины	Наибольшая при определении высоты трещин	Съёмная	Низкий	Наименьшая для 1-ой скважины

# Modern Approaches to Numerical Modeling of Microseismic Events

Alexander Butorin, Fedor Krasnov

**Abstract** — The study considers the actual issue of improving the accuracy of mapping in fracturing using microseismic monitoring. The given question is first of all in connection with increasing volume of hydraulic fracturing at the development of modern hydrocarbon deposits. In this regard, it is necessary to develop methodological recommendations for conducting fieldwork in order to obtain the most informative results. The authors of the paper used full-wave three-dimensional modeling of seismic emission from a point source simulating energy radiation in the course of fracture development. Several surface and borehole monitoring systems have been modeled to register emerging elastic waves, the most common now in practice.

Simulation of a single source made it possible to obtain typical seismograms for different observation systems. Analysis of the results under different reception conditions makes it possible to examine the specific wave fields and analyze the main advantages and disadvantages of different observation systems. The model results show that the maximum informativeness is achieved by a surface patch system that provides a wide observation aperture and a higher signal level against background noise.

**Keywords**— Hydraulic fracturing, Microseismic monitoring, Full-wave modeling, Seismic moment tensor.

## REFERENCES

1. V Aki, K., P.G. Richards, "Quantitative seismology", 2002, 700 p.
2. Bao H. et al. Large-scale simulation of elastic wave propagation in heterogeneous media on parallel computers //Computer methods in applied mechanics and engineering. – 1998. – T. 152. – №. 1-2. – C. 85-102.
3. Behura J., F. Forghani, F. Bazargani, "Improving microseismic imaging: role of acquisition, velocity model, and imaging condition", SEG Technical Program Expanded Abstracts 2013, 5258 p. <https://doi.org/10.1190/segam2013-1073.1>
4. Belachew M., C. Ebinger, D. Cote, "Source mechanism of dike-induced earthquakes in the Dabbahu-Manda Hararo rift segment in Afar, Ethiopia: implications of faulting above dikes", Geophysical Journal International, 192, 2013, 907-917 p.
5. Brix K., Canuto C., Dahmen W. Legendre-Gauss-Lobatto grids and associated nested dyadic grids //arXiv preprint arXiv:1311.0028. – 2013.
6. Cipolla, Wright, "Diagnostic techniques to understand hydraulic fracturing: what? why? how?", Society of Petroleum Engineers, 2002. doi:10.2118/59735-MS 2002
7. Dahm T., F. Kruger, "Moment tensor inversion and moment tensor interpretation", New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2), Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, pp. 1–37. [http://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2\\_IS\\_3.9](http://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_IS_3.9)
8. Eyre T.S., M. Van Der Baan, "Overview of moment-tensor inversion of microseismic events", The Leading Edge Aug 2015, Vol. 34, No. 8, pp. 882-888
9. Eyre S. T., M. Van Der Baan, "Introduction to moment tensor inversion of microseismic events", GeoConvention 2015
10. George A. Nested dissection of a regular finite element mesh //SIAM Journal on Numerical Analysis. – 1973. – T. 10. – №. 2. – C. 345-363.
11. Kanamori H., G. Ekstrom, A. Dziewonski, J.S. Barker, S.A. Sipkin, "Seismic Radiation by magma injection: an anomalous seismic event near Tori Shima, Japan", Journal of Geophysical research, v. 98, No. B4, pp. 6511-6522, 1993
12. Lysmer J., Drake L. A., Bolt B. A. A finite element method for seismology //Methods in computational physics. – 1972. – T. 11. – C. 181-216.
13. Marfurt K. J. Accuracy of finite-difference and finite-element modeling of the scalar and elastic wave equations //Geophysics. – 1984. – T. 49. – №. 5. – C. 533-549.
14. Maxwell S., J. Deere, "An introduction to this special section: Microseismic", The Leading Edge, 2010
15. Minolia A., Cesar A., DA. Kopriva. "Discontinuous Galerkin Spectral Element Approximations on Moving Meshes.", Phys, 2011
16. Orszag, Steven A., "Comparison of Pseudospectral and Spectral Approximation", 1972 Studies in Applied Mathematics. 51 (3): pp. 253–259
17. Pellegrini F., "Static mapping by dual recursive bipartitioning of process and architecture graphs". Proceedings of SHPCC'94, Knoxville, Tennessee, pp. 486-493. IEEE Press, 1994
18. Patera A. T. A spectral element method for fluid dynamics: laminar flow in a channel expansion //Journal of computational Physics. – 1984. – T. 54. – №. 3. – C. 468-488.
19. Shuck T., D.E. Diller, B. Fish, P. Smith, K. Wallace, "Surface microseismic in an extreme environment", The Leading Edge(2015),34(8), pp.936 <http://dx.doi.org/10.1190/tle34080936.1>
20. Stanek F., J. Valenta, D. Anikeev, "Semblance for Microseismic Event Detection", SEG 2014
21. Teukolsky S. A. Short note on the mass matrix for Gauss-Lobatto grid points //Journal of Computational Physics. – 2015. – T. 283. – C. 408-413.
22. Thakur R., W. Gropp, "Improving the Performance of Collective Operations in MPICH", Springer, 2003, pp. 257-267.
23. Thakur R., W. Gropp, B. Toonen, "Optimizing the Synchronization Operations in MPI One-Sided Communication," Int'l Journal of High Performance Computing Applications, (19)2, pp. 119-128, 2005.
24. Tinney W. F., Walker J. W. Direct solutions of sparse network equations by optimally ordered triangular factorization //Proceedings of the IEEE. – 1967. – T. 55. – №. 11. – C. 1801-1809.