

Применение метода максимального правдоподобия для микросейсмического мониторинга гидроразрыва пласта

■ Биряльцев Е.В., Рыжов В.А., Мокшин Е.В., ЗАО «Градиент», г. Казань

Введение

Гидроразрыв пласта (ГРП) является одной из технологий интенсификации добычи нефти, представляя собой механический метод воздействия на продуктивный пласт, при котором за счет поднятия давления жидкости гидроразрыва выше горного давления образуется искусственная трещина большой протяженности. В процессе образования трещины происходит высвобождение энергии упругих деформаций, сопровождающееся излучением сейсмических волн, что может служить геофизической основой для контроля (мониторинга) реальной геометрии трещины. Данное излучение может быть зафиксировано сейсмическими датчиками и использовано для локализации местоположения источников сейсмических событий, вызванных проведением ГРП, и позволяет оценить пространственно-временной характер развития трещин [1].

Хорошо известен метод мониторинга ГРП при наблюдениях из соседних скважин. Регистрация производится скважинными трехкомпонентными сенсорами, аналогичными сенсорам, применяемым при ВСП. Импульсы от микросейсм трещинообразования пикируются на каждом сенсоре по приходу Р и S волн, что позволяет, при известной скоростной характеристике, определить методом наименьших квадратов положение очага каждого зарегистрированного импульса. Данный метод позволяет локализовать трещину ГРП как в плане, так и по вертикали. Наблюдения в скважинах свободны от поверхностных помех, что позволяет достигать удовлетворительных результатов с применением относительно про-

стых аппаратных средств и методов обработки микросейсмических сигналов.

Однако скважинный мониторинг ГРП невозможен при отсутствии соседних скважин, а при их наличии требует остановки добычи или нагнетания, что приводит к существенным экономическим потерям. Таким образом, скважинный мониторинг ГРП обладает некоторыми ограничениями по применимости. Альтернативный метод наблюдения при расположении датчиков на дневной поверхности не требует использования скважин, что делает этот метод потенциально более универсальным, чем скважинный мониторинг.

Условия наблюдения микросейсм с поверхности существенно отличаются от скважинных наблюдений, в первую очередь, по уровню шумов. Даже естественный уровень микросейсм на поверхности существенно выше, чем в скважинах с глубиной расположения сенсоров более 500 метров. При мониторинге ГРП к естественному уровню шумов добавляется мощный источник помех в виде флота ГРП, находящегося, как правило, непосредственно над зоной ГРП. Уровень полезного сигнала напротив значительно ниже, чем в случае скважинных наблюдений, за счет большей длины пробега микросейсм и повышенного поглощения в ВЧР, особенно в высокочастотной составляющей сигнала.

Данные факторы приводят к тому, что локализация очагов микросейсм различными методами засечек, которые используются в скважинном мониторинге, при наземном мониторинге невозможна, так как отношение сигнал/шум на

каждом конкретном сенсоре ниже единицы и сигнал визуально не выделяется. Таким образом, обработка данных наземного микросейсмического мониторинга ГРП является значительно более сложной задачей по сравнению со скважинным мониторингом.

Задача локализации микросейсмических источников является хорошо известной в радиотехнике [2] задачей обнаружения сигналов при многоканальном приеме и решается разными методами. Применительно к задаче локализации источника микросейсм они обладают различной точностью локализации, устойчивостью к шумам и вычислительной сложностью. Наиболее часто для восстановления местоположения очагов микросейсм используется метод дифракционного суммирования и его разновидности, например, метод фокусирующего преобразования [3], позволяющий динамически отбраковывать наименее информативные сенсоры. Метод дифракционного суммирования относительно прост в реализации, однако, как будет показано далее, он плохо устойчив к поверхностным шумам. Известен также метод Time Reverse Modelling [4, 5], который по устойчивости к поверхностным шумам и точности локализации превосходит метод дифракционного суммирования [6].

Сущность подхода метода максимального правдоподобия

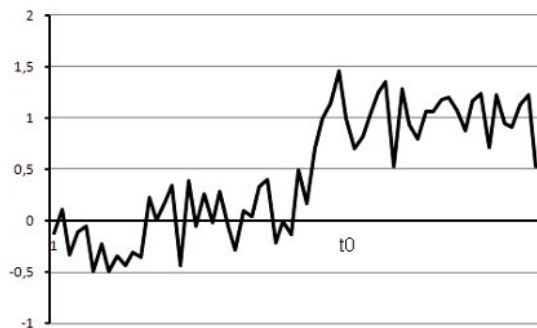
Из теории передачи сигналов [7] известно, что наиболее эффективным методом обнаружения сигналов является метод на принципе максимума правдоподобия. Его суть заключается в следующем.

Рассмотрим сначала простую задачу выделения ступенчатого импульса в момент $s(t-t_0)$ который может возникнуть в приемном устройстве в известный

момент времени t_0 с известной амплитудой A на фоне гауссовских шумов $n(t)$. Приемное устройство регистрирует смесь шума и импульса:

$$z(t) = n(t) + s(t) \quad (1)$$

График процесса z изображен на рис. 1. Распределение плотности вероятности гауссовского шума в отсутствии сигнала есть нормальное распределение с математическим ожиданием 0 и некоторой дисперсией D . В присутствии сигнала s с амплитудой A распределение остается нормальным, но математическое ожидание становится равным A , а дисперсия сохраняется.



▲ Рис. 1. Пример случайного процесса с появлением единичной ступеньки в момент t_0

Предположим пока, что мы имеем возможность сделать только одно измерение процесса в момент t_0 . Таким образом, задача выявления такого сигнала сводится к оценке вероятности принадлежности конкретного отсчета сигнала z к одному из двух распределений $f(0,D)$, $f(A,D)$, где f – функция плотности вероятности нормального распределения. Функция правдоподобия наличия сигнала в момент времени t для рассматриваемой задачи выглядит следующим образом:

$$L = \exp\left(-\frac{(z(t_0)-A)^2}{2D}\right) / \exp\left(-\frac{z(t_0)^2}{2D}\right) \quad (2)$$

В (2) мы рассчитываем значения плотности вероятности для обоих распределений – исходного распределения шума без сигнала и распределения шума с сигналом. Функция правдоподобия является их отношением. Если она больше 1, то более вероятно, что есть сигнал, если меньше – то более вероятно, что нет. Такое решающее правило носит в радиотехнике название «идеальный наблюдатель». Если мы можем сделать более одного отсчета измерения в моменты времени t_i в интервале появления сигнала, то мы можем рассчитать совместную функцию правдоподобия для всех сделанных отсчетов:

$$L = \prod_i \left[\exp\left(-\frac{(z(t_i) - A)^2}{2D}\right) / \exp\left(-\frac{z(t_i)^2}{2D}\right) \right] \quad (3)$$

Основываясь на данном подходе, мы можем решать более сложные задачи. Например, если сигнал имеет более сложную форму, чем ступенька, т.е. он имеет различные амплитуды $s(t_i)$ в различные моменты времени t_i , то формула (3) преобразуется в

$$L = \prod_i \left[\exp\left(-\frac{(z(t_i) - s(t_i))^2}{2D}\right) / \exp\left(-\frac{z(t_i)^2}{2D}\right) \right] \quad (4)$$

Наконец, мы можем принимать сигнал s одновременно по нескольким каналам с различными характеристиками, как канала, так и самого сигнала. В этом случае формула (4) преобразуется в

$$L = \prod_k \prod_i \left[\exp\left(-\frac{(z_k(t_i) - s_k(t_i))^2}{2D_k}\right) / \exp\left(-\frac{z_k(t_i)^2}{2D_k}\right) \right] \quad (5)$$

Где k – индекс канала приема, имеющего индивидуальные характеристики сигнала $s_k(t)$ и дисперсию шума D_k .

Формула (5) описывает ситуацию, когда мы знаем время возникновения сигнала, так называемый синхронный прием. Если мы не знаем это время, то

возникает задача так называемого асинхронного приема. Она заключается в последовательном решении задачи синхронного приема для последовательных моментов времени, т.е. мы вычисляем функцию правдоподобия как функцию от времени и для каждого момента определяем, есть во входной последовательности сигнал или нет.

$$L(t_j) = \prod_k \prod_i \left[\exp\left(-\frac{(z_k(t_j+t_i) - s_k(t_i))^2}{2D_k}\right) / \exp\left(-\frac{z_k(t_j+t_i)^2}{2D_k}\right) \right] \quad (6)$$

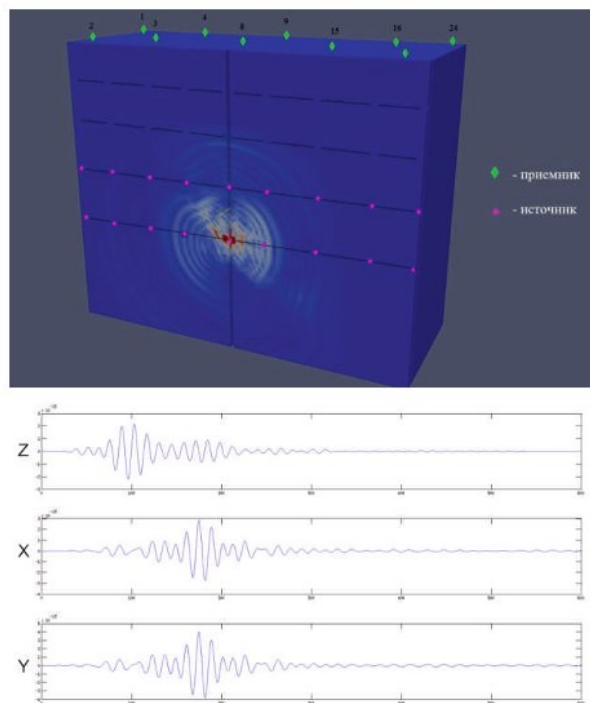
Рассмотрим применение данного подхода к мониторингу ГРП. При микросейсмическом мониторинге ГРП нам необходимо зарегистрировать пространственное положение микросейсм в окрестности ствола скважины, которые сопровождают образование трещины ГРП. Мы можем рассматривать каждую точку в пространстве, окружающую ствол скважины как источник специфических сигналов, а сейсмологического оборудования мониторинга – как каналы их приема. Будем восстанавливать микросейсмическую активность в некотором наборе дискретных точек околоствольного пространства (точки восстановления), например по регулярной сетке, с достаточно малым шагом, так, чтобы покрыть всю область возможного развития трещины гидроразрыва.

Для каждой такой точки требуется рассчитать вид импульса на каждом из датчиков. В отличие от более простых методов, например, дифракционного суммирования, метод максимума правдоподобия требует знания формы сигнала, ожидаемого на сенсорах от микросейсмического события в той или иной точке, а не только времени первого вступления. Применяемые в дифракционном суммировании методы трассировки лучей в этом случае непригодны, и

единственным методом позволяющим решить эту задачу является полноволновое численное моделирование.

Полноволновое численное моделирование позволяет рассчитать форму волны, пришедшей на сенсор в условиях геологии любой сложности, учитывая все возможные волны, образовавшиеся при прохождении сейсмического импульса от источника к приемнику, правильно учесть его геометрическое расхождение с учетом реальной траектории распространения в неоднородном пространстве. Расчет может производиться одним из известных методов, например методом конечных элементов. Учитывая, что необходимо рассчитать амплитуды сигнала с учетом отражений, обменных волн, затуханий и геометрического расхождения расчет лучше вести в трехмерной постановке (рис. 2).

Полноволновой расчет в трехмерной постановке является исключительно



▲ Рис. 2. Пример полноволнового моделирования и рассчитанные сигналы от некоторой точки восстановления для трех компонент датчика на поверхности.

ресурсоемкой задачей, однако он хорошо поддается распараллеливанию, в том числе на современных графических кластерах. С использованием специализированных программных средств полноволнового моделирования и суперкомпьютерных комплексов на GPGPU [8] такой расчет вполне возможен за практически приемлемое время уже сейчас. Тенденции развития вычислительной техники и особенно устройств GPGPU позволяют прогнозировать общедоступность данных видов расчетов в горизонте 3-5 лет.

Очевидно, что сигналы на датчиках от различных точек восстановления будут отличаться друг от друга, однако нам желательно рассчитать не только место возникновения, но и амплитуду возникших микросейсм. К счастью нет необходимости рассчитывать сигналы для каждой точки с различными амплитудами. В отсутствие нелинейных эффектов в среде очевидно, что достаточно рассчитать один сигнал с единичной амплитудой исходного воздействия. При изменении этой амплитуды сигнал на датчиках будет меняться пропорционально амплитуде исходного воздействия, сохраняя форму. Таким образом, формула (6) для правдоподобия будет выглядеть следующим образом:

$$L(t_j|A) = \prod_k \prod_i \left[\exp \left(-\frac{(z_k(t_j+t_i) - A \cdot s_k(t_i))^2}{2D_k} \right) / \exp \left(-\frac{z_k(t_j+t_i)^2}{2D_k} \right) \right] \quad (7)$$

Или логарифмируя (7) для целей дальнейшего анализа и отбрасывая член, не зависящий от A получаем

$$\ln L(t_j|A) = \sum_k \sum_i \left[\exp \left(-\frac{(z_k(t_j+t_i) - A \cdot s_k(t_i))^2}{2D_k} \right) \right] \quad (8)$$

Где A – амплитуда исходного импульса в точке восстановления, а $s_k(t_i)$ – форма импульса на k-м канале для единичного

импульса. Таким образом, мы можем восстановить наиболее правдоподобные амплитуды импульса в каждый момент времени $A(t)$, решая задачу максимизации по A функции правдоподобия (7) или его логарифма (8) для упрощения расчетов

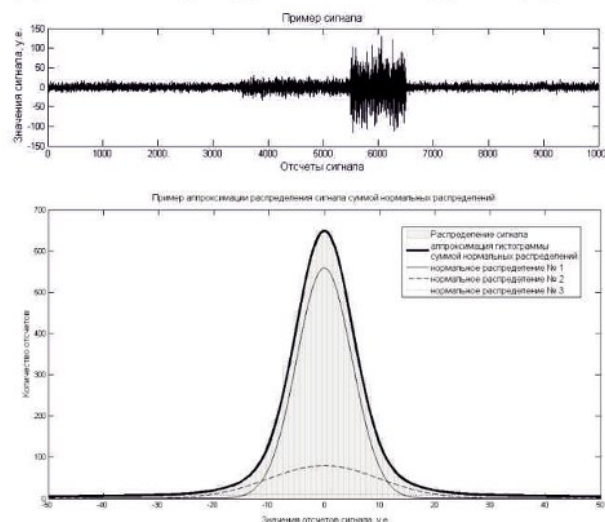
$$A(t) | \max_A \ln L(t|A) \quad (9)$$

Решая задачу (9) для каждой точки восстановления мы получаем наиболее правдоподобную амплитуду по всем точка восстановления для интересующего нас набора моментов времени.

Изложенный выше подход является некоторым упрощением реальной ситуации, в первую очередь из-за предположения нормальности шума в точках приема. В действительности микросейсмический шум не является нормально распределенным, особенно в зонах с высокой техногенной нагрузкой. Включение-выключение работающих механизмов, проезд транспорта и другие нестационарные шумы отклоняют шум от нормального. Получаются так называемые распределения с «толстыми хвостами». Такого рода распределения могут быть представлены, в частности смесью нормальных распределений с различной дисперсией. На рис. 3 представлен типичный вид сигнала в зонах с высокой техногенной активностью, гистограмма амплитуд микросейсмических сигналов и аппроксимация гистограммы смесью нормальных распределений.

В случае аппроксимации негауссовского шума смесью нормальных распределений формулы (2)-(7) несколько усложняются, но принципиально не меняются, вместо одной гауссианы появляется их сумма. Кроме того, для логарифмического вида правдоподобия (8) под суммой получается логарифм от

суммы экспонент. Несколько усложняется также процедура восстановления распределения, в случае аппроксимации гистограммы одним нормальным распределением вычисление параметров распределения, математического ожидания и дисперсии производится через вычисление их несмещенных оценок, для аппроксимации суммой нормальных распределений требуется выполнять оптимизационные вычисления, что также является хорошо известной, хотя и достаточно ресурсоемкой задачей [9].



▲ Рис. 3. Пример негауссовского сигнала и аппроксимации его распределения суммой гауссиан

Сопоставление методов восстановления микросейсмического сигнала

Как мы видим, применение метода максимального правдоподобия является значительно более ресурсоемкой задачей, чем вычисления методами дифракционного суммирования и сопоставимо по сложности с вычислениями Time Reverse Modelling, которые также выполняются методами полноволнового численного моделирования. Оценим, стоит ли использовать такой трудоемкий метод.

Как известно, дифракционное суммирование является простым усреднением

сигналов в моменты времени, соответствующие первым вступлениям волны, распространяющейся из некоторой точки пространства. Результирующую формулу можно записать как

$$A(t) = \sum z_i(t + \Delta t_i) \quad (10)$$

где Δt_i – пробег до первых вступлений на i -й датчик.

В предположении приблизительно одинаковой амплитуды полезного сигнала и независимости помех получается синфазное сложение полезного сигнала и асинфазное – помехи, в результате чего сумма полезного сигнала растет пропорционально N , где N – число каналов (датчиков), а сумма помеховой составляющей – пропорционально $\sqrt{N}$. Отношение сигнал/шум, таким образом, возрастает пропорционально $\sqrt{N}$.

Данный алгоритм не учитывает следующих факторов, существующих при обработке реальных данных. Во-первых, полезный сигнал имеет для различных точек пространства неодинаковую амплитуду. Для более дальних датчиков амплитуда полезного сигнала мала, тогда как амплитуда помехи, определяемого собственными шумами датчика и посторонними шумами в точке приема остается постоянным. Таким образом, дальние датчики делают больший вклад в рост шумовой составляющей, чем в рост полезного сигнала.

Этот недостаток отчасти исправляется методами динамической коррекции набора датчиков, по которым производится суммирование для каждой точки исследуемого пространства, например в методах фокусирующего преобразования. Также от этого недостатка свободен метод Time Reverse Modeling.

Метод Time Reverse Modeling, как известно, заключается моделировании

возбуждений, распространяющихся в численной модели среды от точек, соответствующих точкам установки датчиков на местности. Возбуждаемый сигнал является обращенным во времени принятым в этой точке сигналом. От точек приема/возбуждения сигнал распространяется во все стороны, но в точке, соответствующей положению в среде источника микросейсма все волны пересекаются одновременно и складываются синфазно. Амплитуда каждой из волн в этой точке равна амплитуде зарегистрированного сигнала деленного на пройденное расстояние, т.е.

$$A(t) = \sum z_i(t + \Delta t_i) \quad (11)$$

Таким образом, и сигнальная, и шумовая компоненты убывают пропорционально пройденному сигналом расстоянию. Более близкие точки в этом случае дают больший вклад в восстановление амплитуды микросейсм, причем это происходит автоматически без участия человека.

Однако оба этих метода не полностью используют доступную информацию. В реальности достаточно часто каналы приема имеют различную степень зашумления. Если в наборе датчиков имеется канал с сильным уровнем шума, то в вычисленной по формулам (10) и (11) амплитуде микросейсмической активности зашумленный канал будет вносить непропорционально большой вклад.

Проиллюстрируем это следующим примером. Допустим, у нас имеются 10 датчиков, на одном из которых среднеквадратичное отклонение шума в 10 раз больше чем на любом из остальных. Вычислим амплитуду помехи, возникающей в некоторой точке восстановления методом дифракционного суммирования в отсутствии полезного сигнала.

Пусть в зашумленном канале возникает выброс, равный 10 СКО на тихих каналах, а на остальных (тихих) каналах амплитуда равна 0. Тогда амплитуда возникшей помехи будет равна $A = (1 \times 10 + 9 \times 0) / 10 = 1$ в единицах среднеквадратичного отклонения тихих каналов.

Для вычислений по методу Time Reverse Modeling добавляется учет расстояний до приемников, и при одинаковом расстоянии принципиальной разницы с методом дифракционного суммирования не будет.

Другая ситуация возникает при вычислениях по методу максимального правдоподобия. Для случая нормального шума поиск максимума правдоподобия по (9) эквивалентен методу наименьших квадратов с нормированным на дисперсию квадратом отклонения отдельных компонент, т.е. нам нужно найти такое A при котором $(10 - A)^2 / 10^2 + 9 \cdot (0 - A)^2 \rightarrow \min$. Решая это уравнение, мы получаем $A \approx 0.01$. В методе дифракционного суммирования у нас получалось 1, т.е. в 100 раз больше!

Зашумленный канал не оказывает практически никакого влияния на восстановление сигнала именно из-за большой дисперсии, которую учитывает метод максимального правдоподобия. В случае негауссовского распределения помехи преимущество перед методом дифракционного суммирования и методом Time Reverse Modeling может быть еще больше, так как для распределений с «толстыми хвостами» характерны большие выбросы.

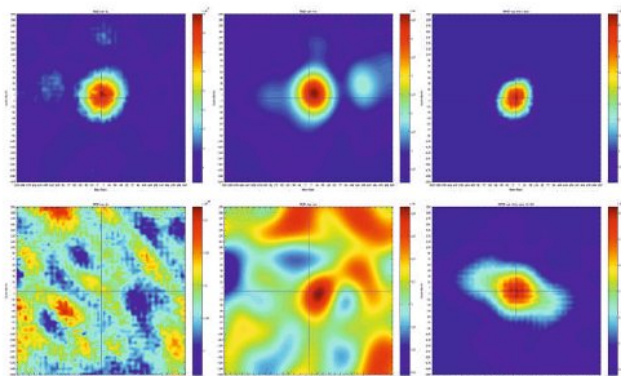
Проиллюстрируем восстановление модельного сигнала наглядным численным примером. Для сравнения методов было произведено восстановление микросейсмического сигнала в среде с

реальной скоростной характеристикой. Для получения модельных сигналов проводилось полноволновое численное моделирование распространения сейсмической волны от модельного источника на глубине 1600 м. Сигналы регистрировались на модельной дневной поверхности в 40 точках, расположенных равномерно в пределах кольца с центром в гипоцентре источника. Сигналы регистрировались в трех компонентах.

По модельным сигналам было проведено восстановление местоположения источника тремя методами - методом дифракционного суммирования, методом Time Reverse Modeling и методом максимума правдоподобия. Восстановления производилось как в отсутствии шума, так и при добавлении нормально распределенного шума со среднеквадратичным отклонением равным 3 максимальным амплитудам модельного сигнала на поверхности.

На рис. 4 приведен результат восстановления сигналов в плоскости источника. Реальное местоположение источника - перекрестия осей. Можно отметить, что при отсутствии шума методы демонстрируют сопоставимую точность, однако максимум восстановленной амплитуды для дифракционного суммирования и Time Reverse Modeling смещены в первый квадрант, что может быть вызвано некоторой асимметричностью точек наблюдения.

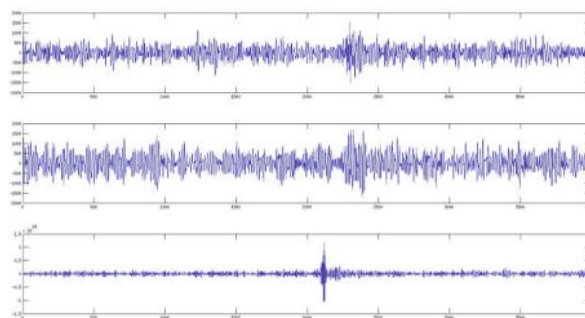
При добавлении шума восстановление микросейсмического события методом дифракционного суммирования не произошло. Метод Time Reverse Modeling восстановил источник приблизительно в правильном месте, однако одновременно в плоскости восстановления возникли артефакты сопоставимой амплитуды, что в реальных условиях



▲ Рис. 4. Пример восстановления местоположения модельного микросейсмического источника сопоставляемыми методами. Цветом выделена амплитуда восстановленного сигнала (слева направо - метод дифракционного суммирования, метод Time Reverse Modelling, метод максимального правдоподобия). Верхний ряд - шум отсутствует, нижний ряд - добавлен нормально распределенный шум со среднеквадратичным отклонением в 3 раза большим максимальных амплитуд модельных сигналов на поверхности.

затруднит идентификацию действительного местоположения. Метод максимума правдоподобия восстановил положение источника абсолютно точно без видимых артефактов.

На рис. 5 представлен пример работы с реальными данными восстановления микросейсмического импульса по полевым наблюдениям (расстановка из 38 трехкомпонентных датчиков СМЕ-4111). Приведен восстановленный с помощью метода максимального правдоподобия временной ряд амплитуды микросейсм в забое скважины, включающий в себя момент перфорации. Для сравнения приведены типичные сигналы, зарегистрированные на полевых датчиках. Несмотря на то, что амплитуда достигшего датчиков микросейсмического импульса сопоставима с поверхностными шумами, импульс в точке забоя восстанавливается более чем уверенно.



▲ Рис. 5. Пример восстановления амплитуды микросейсмического события по реальным данным. По горизонтальной оси - время в миллисекундах, по вертикальной - амплитуда в у.е. Верхние графики - зарегистрированные полевые сигналы, нижний график - амплитуда восстановленного микросейсмического события в точке забоя скважины.

Выводы

Метод максимального правдоподобия является теоретически наиболее информативным и помехоустойчивым методом восстановления сигналов. В статье приведен подход, основанный на частном случае применения метода максимального правдоподобия для восстановления амплитуд микросейсмических событий, сопровождающих трещинообразование при ГРП.

На примерах модельных и реальных данных показано восстановление сигналов методом максимального правдоподобия и его преимущества перед методами дифракционного суммирования и Time Reverse Modeling.

Преимущества метода заключаются в большей помехоустойчивости и большей точности восстановления амплитуды и местоположения микросейсмических событий в условиях сильных помех. В условиях слабых помех точность и достоверность методов сопоставимы.

Метод максимального правдоподобия требует значительных вычислительных ресурсов и более полного набора исходных данных, чем метод дифракционного суммирования. Таким образом,

его применение оправданно в тех случаях, когда проявляются его преимущества – наибольшая помехоустойчивость. Сильные помехи наиболее характерны для поверхностных наблюдений, таким образом, для мониторинга ГРП с дневной поверхности применение метода максимального правдоподобия наиболее оправданно по сравнению со скважинными исследованиями.

Литература

1. Александров С.И., Гогоненков Г.Н., Мишин В.А. Применение пассивных сейсмических наблюдений для контроля параметров гидроразрыва пласта // Нефт. хоз-во. 2005. ? 5. С. 64–66.
2. Howland, P. E. Passive radar systems // IEE Proc. Radar Sonar Navig. 2005. V. 152. No. 3. P. 105–106.
3. Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Волков А.В. и др. Сейсмическая локация очагов эмиссии – новая технология мониторинга добычи УВ. Тезисы докладов Межд. Конф. EAGE, EAGO, SEG, С-Петербург, 16-19 октября, 2006г.
4. Levin S.A. 1984. Principle of reverse-time migration. Geophysics 49, 581–583. doi:10.1190/1.1441693
5. Steiner B., Saenger E.H., Schmalholz S.M. Time reverse modeling of low-frequency microtremors: A potential method for hydrocarbon reservoir localization // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. L03307.
6. Мокшин, Е.В. Сопоставление метода "TIME REVERSE MODELING" и метода дифракционного суммирования [Текст] / Е.В. Мокшин, Д.В. Бережной, Е.В. Биряльцев // Научно-технический журнал "ЭКСПОЗИЦИЯ НЕФТЬ ГАЗ", 2012. Т.2, С. 26-28.
7. Зюко А.Г. и др. Теория передачи сигналов. М. Связь. 1980–288 с, илл.
8. Галимов М.Р., Биряльцев Е.В. Некоторые технологические аспекты применения высокопроизводительных вычислений на графических процессорах в прикладных программных системах // Вычислительные

методы и программирование, 2010. Т. 11, С. 77-93.

9. Чабдаров Ш.М. Полигауссовы представления случайных явлений в радиотехнике. Юбилейный сборник избранных трудов членов Академии наук Республики Татарстан, под ред. Н.А. Сахибуллина. Казань, Фолиантъ, 2002, с.59-100

Подробнее об авторах



Биряльцев
Евгений Васильевич

Зам. ген.директора
по науке, к.т.н.,
ЗАО «Градиент»



Рыков
Василий Александрович

Руководитель информа-
ционно-аналитического
центра, к.ф.-м.н.,
ЗАО «Градиент»



Мокшин
Евгений Владимирович

Инженер,
ЗАО "Градиент"