

УДК 550.83, 004.925.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНЫ ТРЕЩИНОВАТОСТИ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОМ РАЗРЫВЕ ПЛАСТА

Е. В. Рабинович^{1,2}, П. И. Вайнмастер¹, Ю. Л. Новаковский³,
А. С. Туркин¹

¹Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

²Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86

³ЗАО «Научно-производственное предприятие «Сибнефтегаз»»,
630117, г. Новосибирск, а/я 651
E-mail: Erabinovich1952@gmail.com

Исследованы и применены известные и оригинальные методы спектральной фильтрации сейсмических помех, имеющих место при гидравлическом разрыве пласта. Они позволяют бороться с помехами искусственного происхождения и естественными помехами, появляющимися из-за нелинейности условий распространения сейсмического сигнала и резонансных свойств породы коллектора. Для устранения избыточности данных локации применена оригинальная пространственная фильтрация. Предложена и построена трёхмерная модель зоны трещиноватости продуктивного пласта, возникающей при его гидравлическом разрыве.

Ключевые слова: гидравлический разрыв пласта, зона трещиноватости, локация точечных источников сейсмических сигналов, частотная фильтрация, частотно-временная фильтрация, пространственная фильтрация, триангуляция Делоне.

Введение. Гидравлический разрыв пласта (ГРП) является одним из основных методов увеличения темпа отбора нефти из продуктивных пластов и более полной выработки месторождения [1].

Суть метода ГРП заключается в том, что на забое скважины путём закачки жидкости создаётся высокое давление, за счёт которого продуктивный пласт разрывается по направлениям минимальных напряжений горного давления. Длительная закачка жидкости под давлением образует в продуктивном пласте зону трещиноватости. Вместе с жидкостью в трещины транспортируется расклинивающий агент, который удерживает их в закреплённом состоянии после снятия избыточного давления. Закреплённые трещины продуктивного пласта у забоя образуют высокопроводящий канал для поступления в скважину дополнительного флюида.

Для оценки перспектив дальнейшей разработки продуктивного пласта, притока добываемого флюида и других производственных целей осуществляется мониторинг ГРП, задачами которого являются картирование пространственного расположения, оценка размеров и динамики зоны трещиноватости, возникающей при поведении ГРП [2].

Разрыв пласта сопровождается кратковременными микросейсмическими колебаниями частиц породы — микроземлетрясениями. Колебания на границах возникающих трещин излучают упругие сейсмические волны, которые регистрируются сейсмическими приёмниками. Сейсмические антенны, осуществляющие локацию точечных источников сейсмических сигналов, выявляют трёхмерное «облако» микроземлетрясений, из которого восстанавливается зона трещиноватости продуктивного пласта [3].

Оценить расположение и размеры, выявить динамику зоны трещиноватости, возникающей при ГРП, позволяет динамическая пространственная модель трещины. Задача

моделирования заключается в локализации гипоцентров источников сейсмических сигналов и восстановлении по ним динамических и пространственных характеристик модели. Естественные и искусственные помехи, действующие в среде и на поверхности Земли во время ГРП, затрудняют построение модели.

В представленной работе приведены результаты исследования и применения известных и оригинальных методов спектральной и пространственной фильтрации сейсмических данных, зарегистрированных при ГРП. Предложена пространственная модель зоны трещиноватости, в которой учтены погрешности метода локации, построена триангуляционная поверхность Делоне [4], аппроксимирующая модель.

Цель исследования — создание модели зоны трещиноватости продуктивного пласта, являющейся результатом микросейсмического мониторинга ГРП, а также необходимой для оценки перспектив разработки залежей и планирования бурения новых скважин.

Методика моделирования. Моделирование зоны трещиноватости, возникающей при гидравлическом разрыве пласта, основано на локации точечных источников сейсмических сигналов наземной нерегулярной системой приёма [5]. Используются реальные данные мониторинга ГРП нефтяного коллектора [6].

Сейсмическая антенна системы фокусируется на узлах виртуальной трёхмерной прямоугольной координатной сетки, заданной в плоскостях сечения продуктивного пласта. Регулярный шаг этой сетки мониторинга ГРП, заданной в области локации, определяется частотой дискретизации сейсмотрасс (1000 Гц) и оценкой скорости распространения сейсмических колебаний в среде.

В точно позиционированных точках установки сейсмоприёмников антенны в течение всего процесса ГРП производится запись сейсмотрасс. Для каждого узла сетки мониторинга ГРП с учётом топологии системы приёма вычисляются временные поправки распространения сейсмических сигналов и определяются суммарные сейсмотрассы, получающие вклад от всех 48 сейсмоприёмников. Тем самым осуществляется накопление сигналов для улучшения отношения сигнал/шум примерно в 7 раз.

В ходе сканирования суммарных сейсмотрасс выделяются узлы сетки мониторинга ГРП с амплитудой колебания сейсмического сигнала, превышающей заданный порог. Если порог превзойдён, то узлу сетки приписывается точечный источник сейсмического сигнала. Источник характеризуется координатами в горизонтальной плоскости пласта, глубиной расположения относительно поверхности Земли, амплитудой колебания и моментом времени фиксации колебания.

Исследование полевых и синтетических данных показало, что распределение сейсмической активности источников в горизонтальной плоскости среднего по высоте сечения продуктивного пласта надёжно выявляется. Это распределение позволяет грубо моделировать форму зоны трещиноватости и следить за динамикой её распространения [7].

Однако при трёхмерной локации точечных источников сейсмических сигналов, которая позволяет восстановить особенно важные параметры модели зоны трещиноватости, такие как расположение и размеры зоны, возникают серьёзные трудности.

Это связано с тем, что образование трещин при ГРП скачкообразно, но имеет почти непрерывный характер вдоль линий разрыва в пространстве продуктивного пласта. Порождённые раскрытием трещины микроземлетрясения наблюдаются на расстояниях, меньших разрешающей способности метода локации. В результате происходит расфокусировка сейсмической антенны, что ведёт к размытию восстановленных границ трещин. Во многих близкорасположенных узлах трёхмерной сетки обнаруживаются источники сигналов. Поэтому локация точечных источников сейсмических сигналов приводит к получению избыточного количества активных узлов сетки мониторинга ГРП.

Кроме того, точному обнаружению и локализации точечных источников сейсмического сигнала препятствует нелинейное искажение спектра сигнала при его распространении в

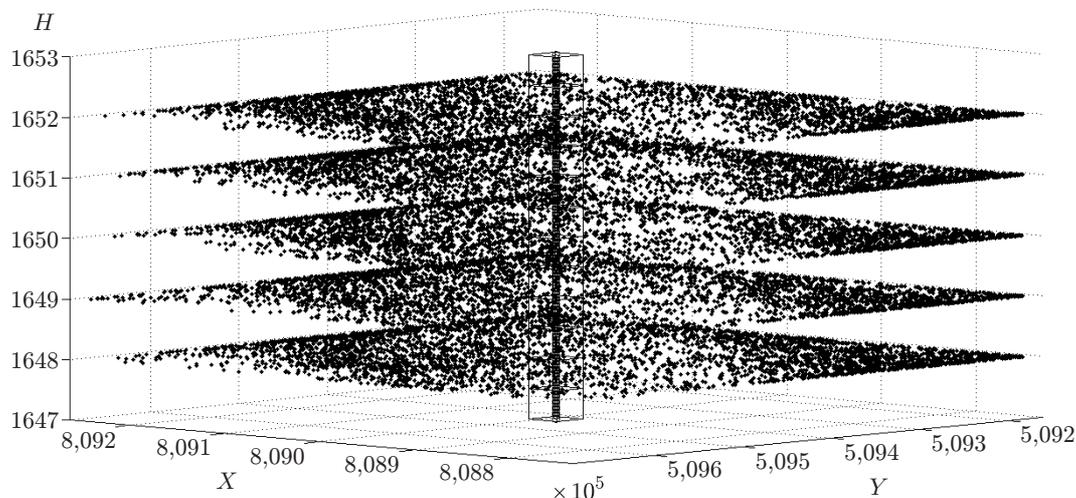


Рис. 1

среде, а также действие естественных и искусственных шумов и помех.

Эти и другие факторы приводят к появлению лишних узлов сетки мониторинга ГРП, затрудняющих корректное моделирование зоны трещиноватости.

На рис. 1 представлены пять горизонтальных плоскостей сечения трёхмерного облака точечных микросейсмических событий. Заметна высокая плотность источников сейсмических сигналов в области локации. Следует обратить внимание, что на рисунке масштаб по высоте примерно в 100 раз больше, чем масштаб в горизонтальной плоскости.

Для построения модели зоны трещиноватости эти плоскости необходимо корректно объединить в одно- или многолистную поверхность. Более реалистической моделью, по-видимому, является не поверхность, а тонкий слой неравномерной толщины*.

В зависимости от глубины залегания и свойств породы коллектора, расположения нагнетающих скважин и других факторов зона трещиноватости продуктивного пласта имеет различный вид. Для месторождения, данные мониторинга ГРП которого используются в предлагаемой работе, применена одна из достаточно адекватных моделей зоны трещиноватости продуктивного пласта в виде тонкой неровной однолистной поверхности. Будем называть её распрямлённым листом смятой бумаги (РЛСБ).

Постановка задачи. Для моделирования зоны трещиноватости продуктивного пласта, возникающей при ГРП, необходимо решить следующие задачи:

- исключить из обработки источники сигналов, появляющиеся в результате действия сейсмических помех;
- определить при избыточности данных и низкой разрешающей способности метода локации набор узлов сетки мониторинга ГРП, обеспечивающий построение модели РЛСБ;
- построить триангуляционную поверхность Делоне, аппроксимирующую модель РЛСБ.

Методы решения. Решение первых двух задач моделирования трёхмерной зоны трещиноватости продуктивного пласта, образующейся при ГРП, возможно при использовании методов спектральной и пространственной фильтрации.

Спектральная фильтрация обеспечивает подавление сейсмических сигналов, зарегистрированных в результате действия мешающих факторов. Это позволяет облегчить выде-

* Рассмотрение вопроса о толщине зоны трещиноватости, определяемой энергетическими характеристиками (амплитудами колебания) сейсмических источников, представляет предмет отдельной публикации и здесь не приводится.

ление из трёхмерного облака узлов сетки мониторинга ГРП точечных источников сейсмических сигналов, возникших в результате образования и развития трещин, исключив из процесса моделирования ложные узлы.

Пространственная фильтрация позволяет извлечь из избыточных данных мониторинга ГРП набор узлов, пригодный для построения моделирующих поверхностей.

Частотная фильтрация. Для подавления искусственных помех в спектрограммах суммарных сейсмотрасс, возникающих от мощной вибрации нагнетательной аппаратуры ГРП (диапазон частот 30–33 Гц), и сетевой помехи (50 Гц), спектры которых располагаются выше диапазона частот полезного сигнала, применяется полосовая фильтрация. Подавление высокочастотной помехи расширяет динамический диапазон смеси полезного сигнала, сейсмических шумов и помех.

Энергетическое накопление сигнала при суммировании сейсмотрасс снижает уровень случайных сейсмических шумов.

Из-за нелинейности процессов распространения сейсмических колебаний от трещиноватой среды, характерной для области гидроразрыва, до поверхности Земли в спектрограммах суммарных сейсмотрасс имеют место паразитные частотные составляющие. Причина этого в том, что в спектре регистрируемого сейсмоприёмником сигнала, пришедшего от разрываемого пласта, обнаруживаются частоты, кратные частоте исходного микросейсмического колебания. Такие дополнительные частоты называются гармоническими обертонами опорной частоты. Например, для опорной частоты 4 Гц обертонами будут 8, 12, 16 Гц и т. д.

Для выделения опорных частот строится гистограмма частот спектрограммы, на которых происходят колебания наибольшей амплитуды. Для обнаружения обертонов применён алгоритм [8], выявляющий все цепочки (длиной не менее трёх) кратных частот спектрограммы. Обнаруженные обертоны удаляются из спектра режекторными фильтрами.

Частотно-временная фильтрация. Специфические естественные помехи возникают вследствие возбуждения в процессе ГРП собственных упругих колебаний в резонансных структурах коллектора. Подтверждением наличия этих помех является то, что при мониторинге ГРП часто обнаруживаются сейсмические источники на больших удалениях от забоя скважины, где появление трещины, соединённой с забоем, в данный момент маловероятно. Резонансные колебания медленно затухают, их длительность измеряется от десятков секунд до сотен минут. Исследуемые же микросейсмические события, представляющие колебания частиц породы разрываемого нефтяного коллектора, имеют длительность от долей секунды до нескольких секунд.

Оконное дискретное преобразование Фурье (ОкДПФ) позволяет разделять частотные фрагменты сигнала по их длительности [9]. Для этого длительность сигнала разбивается на подынтервалы, в пределах которых сигнал считается стационарным, а затем для каждого подынтервала выполняется дискретное преобразование Фурье. Разбиение суммарных сейсмограмм на подынтервалы производится с помощью окна постоянной ширины, сдвигаемого с равномерным шагом по времени. Оконное дискретное преобразование Фурье осуществляет переход к частотно-временному представлению суммарной сейсмограммы и вычисляется по формуле

$$F(m, \omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(n)w(n-m)e^{-jn\omega},$$

где $w(n-m)$ — функция окна, в котором производится ДПФ по дискретному времени n , параметром m задаются значения сдвига окна от начала суммарной сейсмограммы $f(n)$.

С помощью ОкДПФ-спектрограмм можно разделить по длительности частотных фрагментов суммарные сейсмотрассы, отображающие сейсмическую активность резонанс-

ных помех, и колебания, вызванные разрывом пласта. Такая частотно-временная фильтрация трёхмерного облака узлов сетки мониторинга ГРП позволяет исключить из процесса моделирования узлы, в которых зарегистрированы резонансные колебания [10].

В силу принципа неопределённости разрешающая способность ОкДПФ ограничена: невозможно одновременно обеспечить хорошее разрешение по времени и по частоте. Чем уже окно, тем выше разрешение по времени и ниже разрешение по частоте. Речь может идти только о диапазонах частот и времён. Некоторое повышение точности преобразования достигается перекрытием окон и использованием гладкой оконной функции.

На двумерных ОкДПФ-спектрограммах амплитуды спектров задаются градациями серого цвета (чем выше амплитуда, тем темнее оттенок) каждого фрагмента спектрограммы.

На рис. 2 изображена ОкДПФ-спектрограмма 1 (размер окна 5000 отсчётов, перекрытие окон 200 отсчётов, минимальное значение амплитуды 52 бит) суммарной сейсмотрассы длительностью 190000 мс. На ней можно увидеть почти непрерывные линии около частот 33 и 50 Гц во всём диапазоне времён. На рисунке также видны обертоны этих частот, расположенные около 65 и 100 Гц. В области низких частот наблюдается пёстрая зона, состоящая из коротких частотных фрагментов, перемежающихся пропусками.

Разрешающая способность ОкДПФ регулируется изменением ширины окна. Чем уже окно, тем лучше разрешающая способность по времени, чем оно шире, тем лучше разрешение по частоте.

На рис. 3 представлена ОкДПФ-спектрограмма 2 (размер окна 2000 отсчётов, перекрытие 200 отсчётов, амплитуда 80 бит), на которой при меньших значениях ширины окна получены более точные времена начала и окончания частот в спектре, но при этом появились «разрывы» длительности, хотя согласно рис. 2 фрагменты частот присутствовали на протяжении всего времени.

В диапазоне 15–17 Гц наблюдаются достаточно длительные (более 50 с) частотные фрагменты, что подтверждает представленная на рис. 4 ОкДПФ-спектрограмма 3 (размер окна 17000 отсчётов, перекрытие 200 отсчётов, амплитуда 52 бит), у которой увеличено разрешение по частоте. Можно предположить, что это результат резонансных колебаний относительно мелких неразрушающихся под давлением жидкости структур коллектора.

В диапазоне частот 6–13 Гц на рис. 4 видно множество коротких (единицы секунд) фрагментов, что может свидетельствовать о примерно одинаковой структуре спектров

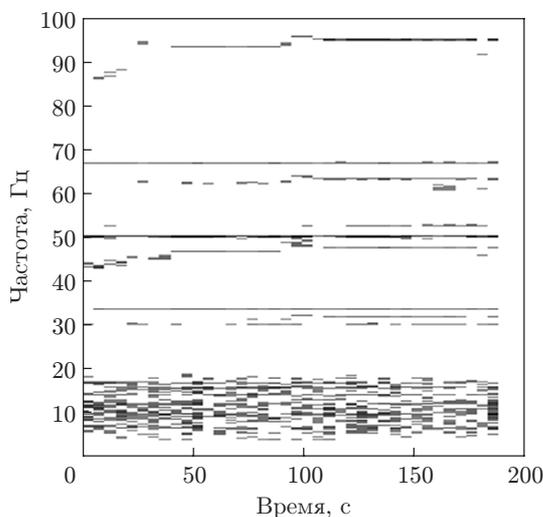


Рис. 2

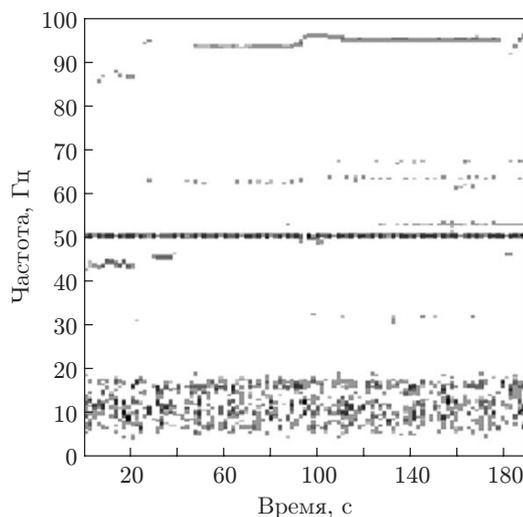


Рис. 3

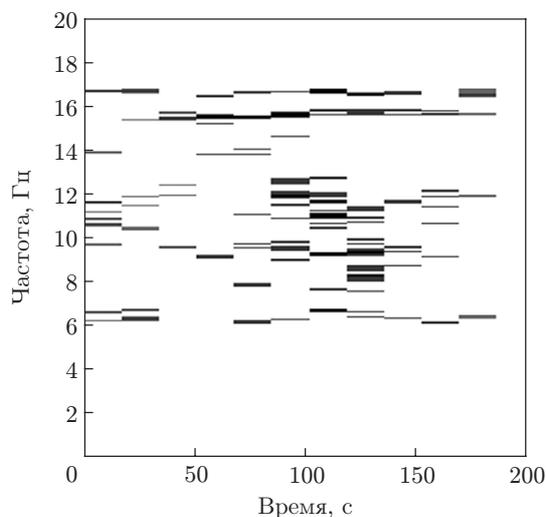


Рис. 4

сигналов такого диапазона. Присутствие в этом диапазоне случайных шумов маловероятно ввиду сильного подавления случайной составляющей за счёт накопления сигнала. Можно полагать, что частотный спектр микросейсмических сигналов, вызванных образованием трещин, лежит в данном диапазоне частот.

Таким образом, применение спектральной фильтрации позволяет подавить частотные составляющие спектра суммарной сейсмотрассы, возникающие в результате действия наведённых помех искусственного происхождения, нелинейности процессов распространения сейсмического сигнала и резонансных свойств породы коллектора. Однако полного решения проблем восстановления из облака узлов сетки мониторинга ГРП истинных координат гипоцентров микроземлетрясений она не даёт.

Пространственная фильтрация предназначена для выделения из трёхмерного облака микроземлетрясений, зарегистрированного во время мониторинга ГРП, компактных, близких по размеру очагов микроземлетрясений, возникающих в процессе образования и развития трещин. По восстановленным координатам гипоцентров очагов можно построить трёхмерную поверхность, аппроксимирующую модель зоны трещиноватости продуктивного пласта, образующейся при проведении ГРП.

Следует отметить, что зона отчуждения вокруг забоя скважины во время ГРП представляет собой мощный нелинейный источник сейсмических колебаний. Амплитуда таких колебаний — помех для мониторинга ГРП — существенно (в сотни раз) превышает амплитуды микроземлетрясений, вызванных раскрытием трещин на удалении от забоя. Поэтому зона размером 30×30 м вокруг центра забоя (рис. 5) подвергается простейшей пространственной фильтрации (исключается из модели зоны трещиноватости), что расширяет динамический диапазон амплитуд колебаний других источников.

Для построения трёхмерных поверхностей в предлагаемой работе применяется триангуляция Делоне. Если по данным мониторинга ГРП, представленным на рис. 1, построить трёхмерную поверхность Делоне, то она будет выглядеть, как на рис. 5. Очевидна высокая избыточность данных, скрывающая истинную форму зоны трещиноватости. Поэтому требуется, задав идеальную форму модели зоны трещиноватости, осуществить приближение к ней с помощью пространственной фильтрации.

Здесь и далее более яркий цвет фрагмента поверхности на рисунках указывает на большую амплитуду колебания источников.

Для решения вышеуказанных задач пространственной фильтрации применён подход

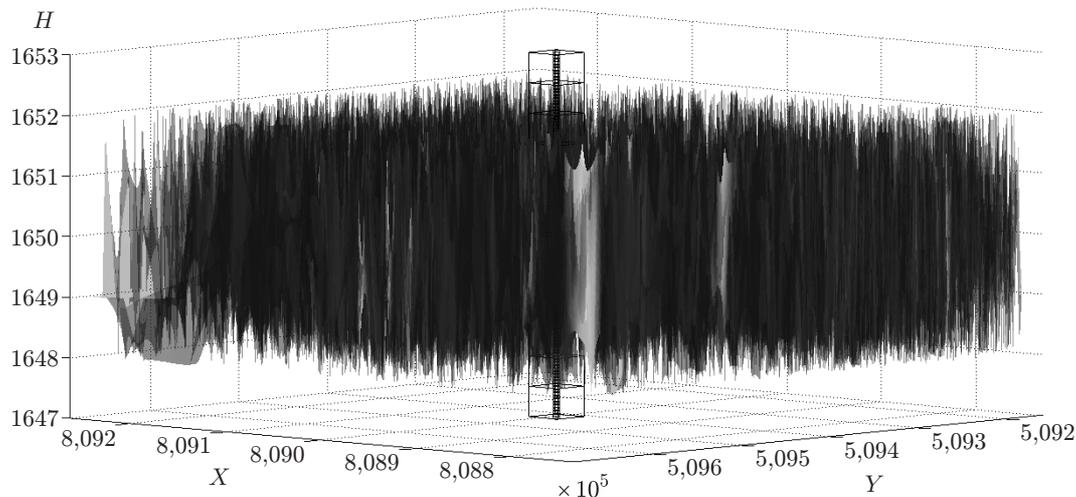


Рис. 5

иерархического кластерного анализа [11]. Очаг микроземлетрясения интерпретируется как относительно плотная группа узлов сетки мониторинга ГРП, расположенных в ограниченном объёме области локации. Разделение облака на группы узлов — кластеры — осуществляется с помощью построения иерархического дерева кластеров. Кластеризация выполняется на основе координат узлов в трёхмерном пространстве локации. Координаты гипоцентра очага микроземлетрясения рассчитываются как координаты центра массы кластера.

Решение задачи выделения кластеров во всём объёме области локации имеет серьёзные недостатки. При большом количестве близкорасположенных узлов (как в поставленной задаче моделирования зоны трещиноватости) трудно выделить подходящие кластеры.

Альтернативным решением является разбиение области локации на множество вспомогательных областей меньшего объёма и выделение кластеров внутри каждой из них. Простейшие вспомогательные области можно представить одинаковыми параллелепипедами (рис. 6). Более сложные формы вспомогательных областей связаны с моделью распространения волны гидравлического давления, которая не обсуждается в данной работе.

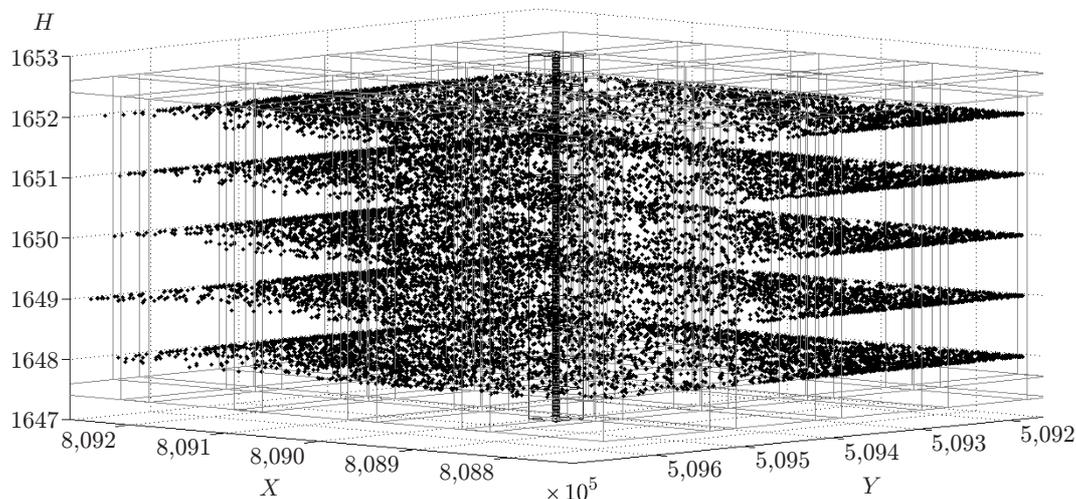


Рис. 6

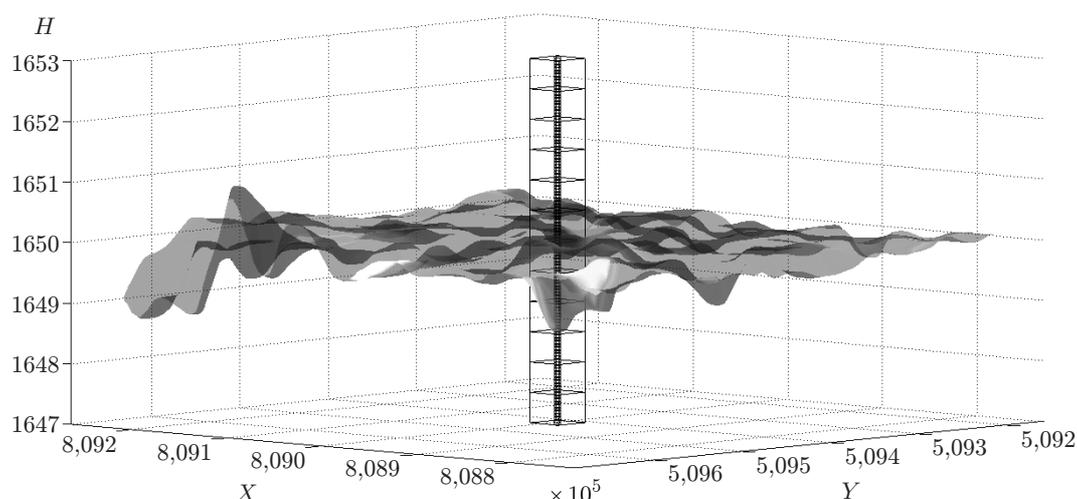


Рис. 7

Качество кластеризации и количество полученных кластеров зависят от выбранных параметров разбиения области локации на параллелепипеды. Для обеспечения адекватности разбиения исходным данным мониторинга ГРП введены управляющие параметры, варьируя которые можно добиться пересечения или пространственного разделения параллелепипедов.

Пространственная фильтрация на основе агломеративной иерархической кластеризации позволяет сократить избыточность узлов сетки мониторинга ГРП в области локации [12]. Полученный в результате фильтрации набор гипоцентров кластеров используется для приближения модели зоны трещиноватости РЛСБ триангуляционной поверхностью Делоне.

Для устранения выбросов выполняется медианная фильтрация гипоцентров. Аппроксимация осуществляется построением треугольников с гипоцентрами в качестве вершин, а объединение треугольников в единую поверхность образует искомую модель.

Результаты. Модель реальной зоны трещиноватости, расположенная в области локации размером $512 \times 512 \times 6$ м, представлена на рис. 7. На рис. 8 приведена укрупнённая модель ближней к наблюдателю четверти области локации.

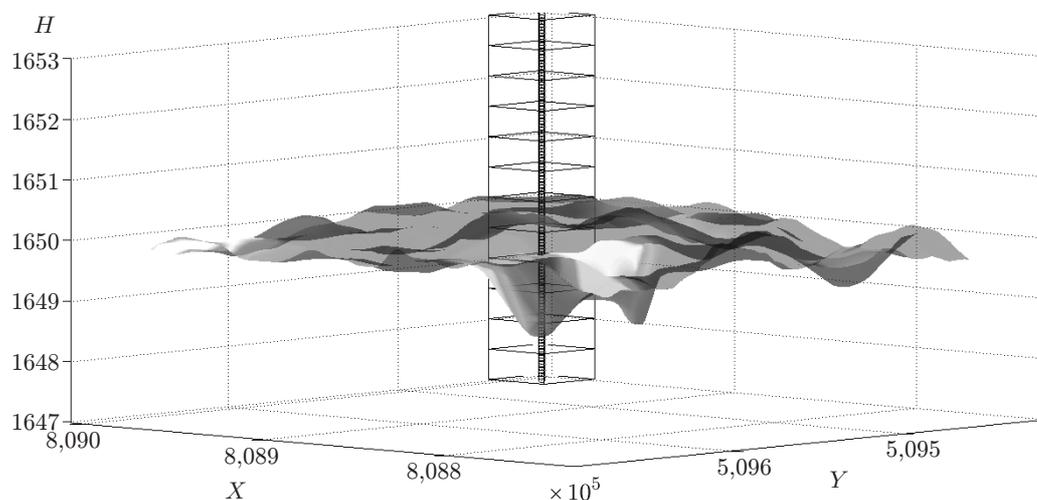


Рис. 8

Вид изображённых на рис. 7, 8 поверхностей напоминает сглаженные распрямлённые листы смятой бумаги. Яркость точек фрагментов поверхности, которая пропорциональна амплитуде колебаний в этих точках, косвенно отражает толщину трещины. Следует отметить, что толщина трещины составляет миллиметры, тогда как зона трещиноватости распространяется на сотни метров в плоскости коллектора и на метры в вертикальном направлении.

Заключение. В представленной работе предложена трёхмерная модель зоны трещиноватости продуктивного пласта, возникающей при проведении ГРП. Модель названа «распрямлённым листом смятой бумаги». Она построена по полевым данным мониторинга ГРП, проведённого с помощью локации точечных источников сейсмических сигналов наземной нерегулярной системой приёма.

Применение спектральной фильтрации, включающей полосовую частотную фильтрацию, удаление обертонов основных частот и частотно-временную фильтрацию, позволяет подавить частотные составляющие спектра суммарной сейсмотрассы, вызванные действием искусственных помех, нелинейных факторов распространения сигнала и резонансных колебаний породы коллектора.

Для устранения чрезмерной избыточности исходных данных мониторинга ГРП применена оригинальная пространственная фильтрация, основанная на агломеративном методе иерархической кластеризации.

При визуализации модели РЛСБ использовался метод триангуляции Делоне.

Выполнена программная симуляция, подтверждающая достоверность результатов моделирования зоны трещиноватости продуктивного пласта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Желтов Ю. П.** Механика нефтегазоносного пласта. М.: Недра, 1975. 217 с.
2. **Ильинский А. Д., Краснова М. А.** Локация очагов микроземлетрясений при пассивном сейсмическом мониторинге гидроразрыва пласта // Сейсмические приборы. 2009. **45**, № 3. С. 14–40.
3. **Mahrer K. D.** Hydraulic fracture height in cased wells // Geos exploration. 1991. **28**, Is. 3–4. P. 221–250.
4. **Скворцов А. В.** Триангуляция Делоне и ее применение. Томск: Изд-во ТГУ, 2002. 128 с.
5. **Рабинович Е. В., Новаковский А. Ю.** Сейсмическая измерительная система для локализации трещин при гидроразрыве нефтяного пласта // Идентификация, измерение характеристик и имитация случайных сигналов (состояние, перспективы развития): Сб. матер. конф. 2009. С. 171–174.
6. **Новаковский Ю. Л., Рабинович Е. В., Туркин А. С.** Определение размеров закреплённых трещин, образующихся при гидравлическом разрыве пласта // Экспозиция. Нефть. Газ. 2012. № 4. С. 95–97.
7. **Рабинович Е. В., Новаковский А. Ю., Туркин А. С.** Наземная локация микросейсмических сигналов для мониторинга гидравлического разрыва пласта // Докл. ТУСУР. 2012. № 1(25). Ч. 1. С. 104–112.
8. **Рабинович Е. В., Шехирев А. В.** Сжатие музыкальных файлов, основанное на время-частотном представлении звукового сигнала // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2007. **2**, № 4. С. 77–81.
9. **Оконное преобразование Фурье** // Википедия — свободная энциклопедия. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Оконное_преобразование_Фурье (дата обращения: 14.05.2012).

10. **Рабинович Е. В., Туркин А. С.** Частотно-временная фильтрация микросейсмических источников // Матер. XI Междунар. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. Т. 2. С. 124–127.
11. **Николенко С. И.** Алгоритмы кластеризации / Машинное обучение-2006 // [Персональная страница С. Николенко] / Лаборатория математической логики Санкт-Петербургского отделения Математического института им. В. А. Стеклова РАН. URL: <http://logic.pdmi.ras.ru/~sergey/teaching/ml/11-cluster.pdf> (дата обращения: 14.05.2012).
12. **Воронцов К. В.** Лекции по алгоритмам кластеризации и многомерного шкалирования / Машинное обучение-2010 // MachineLearning.ru: Профессиональный информационно-аналитический ресурс. URL: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/c/ca/Voron-ML-Clustering.pdf> (дата обращения: 14.05.2013).

Поступила в редакцию 21 мая 2013 г.
