

Пространственная фильтрация сейсмических событий, возникающих при гидравлическом разрыве пласта

Е. В. Рабинович¹, П. И. Вайнмастер², Ю.Л. Новаковский³

^{1,2}Новосибирский государственный технический университет, ³ЗАО НПП Сибнефтегаз

Аннотация – Предложена и построена трехмерная модель зоны трещиноватости продуктивного пласта при проведении ГРП. Для устранения избыточности данных локации была применена оригинальная пространственная фильтрация.⁴

Ключевые слова – Гидравлический разрыв пласта, трещина, проппант, микроземлетрясения, фильтрация, триангуляция Делоне.

1. ВВЕДЕНИЕ

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) – является эффективным методом увеличения темпов отбора нефти из продуктивных пластов и более полной выработки месторождения [1]. Сущность метода ГРП заключается в том, что на забое скважины путем закачки жидкости создается давление, превышающее горное давление. Порода продуктивного пласта разрывается по направлениям минимальных напряжений горного давления и за счет продолжающейся закачки жидкости образовавшаяся зона трещиноватости увеличивается в размерах (Рис. 1).

Для дальнейшей разработки продуктивного пласта, оценки притока добываемого флюида и других производственных целей необходимо знать расположение и размеры, возникшей при проведении ГРП зоны трещиноватости.

В данной работе предлагается метод построения трехмерной модели зоны трещиноватости, позволяющей оценить ее положение и геометрические размеры.

Вместе с жидкостью в трещины транспортируется расклинивающий агент (*проппант*), который удерживает их в закреплённом состоянии после снятия избыточного давления. За счет раскрытых трещин продуктивного пласта у забоя создается высокопроводящий канал для поступления в скважину дополнительного флюида.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При нагнетании под высоким давлением жидкости в пласт происходит растрескивание горных пород. Хотя сами возникающие трещины почти несейсмичны на их границах происходят малые сейсмические события – микроземлетрясения. Это микросейсмические колебания частиц среды, или, иначе говоря, трески (акустические колебания).

Микроземлетрясения излучают упругие сейсмические волны, которые могут регистрироваться сейсмическими приемниками, на чем основаны современные методы локации источников сейсмических сигналов и приемы картирования пространственного положения, оценки размеров, ориентации и динамики магистральной трещины или трещиноватой зоны, возникающих при проведении ГРП [3].

Сейсмические антенны, используемые для локации источников сигналов, выявляют трехмерное «облако» микроземлетрясений, внутри которого проходит магистральная трещина или ансамбль трещин [4].

Задача определения параметров модели трещиноватости, возникающей при проведении ГРП, сводится к локализации гипоцентров сейсмических источников и восстановлению по ним пространственных характеристик трещин.

В данной работе для оценки размеров и положения зоны трещиноватости применяется метод локации источников микросейсмических сигналов наземной нерегулярной системой приема [5, 6].

Согласно этому методу микросейсмический источник колебаний, зарегистрированный сейсмической антенной, представляется в виде узла (точки) виртуальной трехмерной сетки нанесенной в области расположения продуктивного пласта. Он характеризуется координатами (X , Y) в горизонтальной плоскости пласта, глубиной расположения источника относительно поверхности земли H , амплитудой колебания источника A и моментом времени фиксации колебания T .

⁴ Работа выполнена по заданию Министерства образования и науки РФ, проект №7.599.2011, Темплан, НИР № 01201255056.

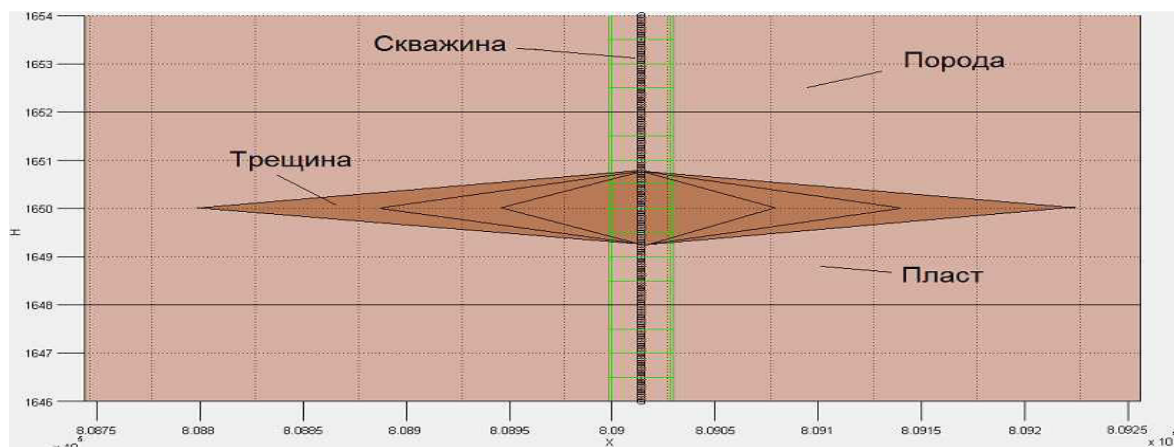


Рис. 1. Схема (вертикальное сечение) скачкообразного развития трещины [2]

Исследование полевых и синтетических данных показало, что сейсмические источники, расположенные в одной плоскости продуктивного пласта на глубине 1650 метров, надежно обнаруживаются, а погрешность определения координат одиночных источников не превышает 1 метра.

Однако существенные проблемы возникают при трехмерной локализации источников микросейсмических сигналов. Дело в том, что в отличающихся по высоте всего на шаг дискретизации (1 м) параллельных плоскостях локализации выявляется большое количество близкорасположенных узлов сетки, в которых наблюдается сейсмическая активность. Возникает проблема отождествления этих

близкорасположенных узлов разных плоскостей одному источнику микросейсмических сигналов. Или наоборот, разделения их по нескольким источникам микросейсмических сигналов.

Кроме того реальные данные ГРП характеризуются большой интенсивностью сейсмической активности в объеме области мониторинга. В горизонтальных плоскостях сечения трехмерного «облака» микросейсмических событий обнаруживается высокая плотность этих событий (Рис. 2).

На рисунке также изображен вертикальный забой в виде черного стержня и вокруг него зона отчуждения размером $30 \times 30 \text{ м}^2$, выделенная квадратами зеленого цвета.

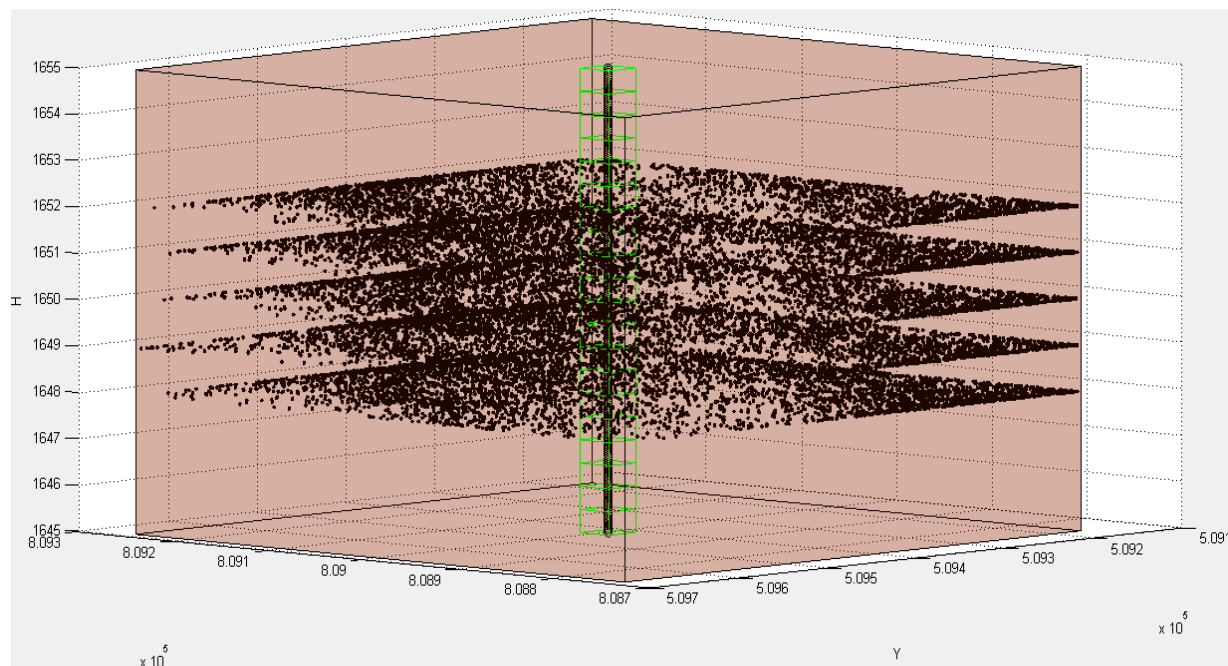


Рис. 2. Горизонтальные сечения трехмерного «облака» микросейсмических событий

Следует обратить внимание, что на рисунке масштаб по высоте в сто раз больше, чем масштаб в плоскости продуктивного пласта. По высоте изображено 5 метров, в то время как размер области в плоскости локации равен $512 \times 512 \text{ м}^2$.

Задача, рассматриваемая в данной работе, состоит в построении по заданному набору узлов виртуальной сетки, нанесенной в области расположения продуктивного пласта, трехмерной модели трещиноватости в виде тонкой неровной однолистной поверхности.

3. МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

С точки зрения авторов одной из достаточно адекватных моделей трещиноватости продуктивного пласта (одно- и многолистных) является трехмерная модель в виде тонкой неровной однолистной поверхности. Будем называть ее распрямленным листом смятой бумаги (РЛСБ).

Более реалистической моделью, по-видимому, является не поверхность, а тонкий слой («блин») неравномерной толщины с рваными краями. То есть вертикальный размер слоя (толщина) много меньше его горизонтальных размеров (длина и ширина). Вопрос о толщине трещины, определяемой энергетическими характеристиками (амплитудами колебания) сейсмических источников, в рамках данной работы не обсуждается, поэтому будем строить модель трещиноватости в виде РЛСБ.

Следует отметить, что зона отчуждения вокруг забоя скважины во время проведения ГРП представляет собой мощный нелинейный источник сейсмических колебаний. Амплитуда этих колебаний - помех для мониторинга ГРП - существенно (в сотни раз) превышает амплитуды микроземлетрясений, вызванных раскрытием трещин на удалении от забоя. Поэтому зона размером $30 \times 30 \text{ м}^2$ вокруг центра забоя подвергается низкочастотной пространственной фильтрации (исключается из модели трещиноватости продуктивного пласта), что расширяет динамический диапазон амплитуд колебаний источников.

Для аппроксимации набора узлов и построения трехмерных поверхностей в работе применен метод *триангуляции Делоне*. Если по данным мониторинга ГРП, представленным на Рис. 2, методом Делоне построить трехмерную поверхность, то она будет выглядеть, как показано на Рис. 3. Здесь и далее более яркий цвет поверхности локализует большую амплитуду колебания источников.

Из рисунков 2 и 3 видно, что набор данных для аппроксимации избыточен. Во многих близлежащих узлах трехмерной виртуальной сетки обнаруживаются источники сейсмических сигналов. Видимо в процессе ГРП микроземлетрясения имеют гипоцентры на

расстояниях меньших разрешающей способности метода локации (1 м) или вообще имеют непрерывный пространственный характер. В результате происходит расфокусировка сейсмической антенны, которая ведет к размытию формы объекта исследования и появлению ошибочных узлов-источников.

Поэтому следует, задав форму модели трещины, осуществить приближение к ней при помощи *пространственной фильтрации*.

Суть предлагаемого алгоритма пространственной фильтрации заключается в выделении естественных «сгустков» (групп) узлов виртуальной сетки и определении в каждом из них «ключевых» точек. «Сгустки» узлов интерпретируются как единичные локальные события раскрытия трещины, а все вместе эти раскрытия составляют пространственную зону трещиноватости, образовавшуюся в процессе ГРП.

Такой подход позволяет сократить избыточность представления данных и дает возможность аппроксимации модели трещины РЛСБ на основе «ключевых» точек.

Для выделения естественных «сгустков» узлов виртуальной сетки производится их классификация на основе на расположения узлов внутри области локации. Задача классификации решается применением метода иерархической кластеризации [7], который осуществляет выделение компактных, разделенных друг от друга, близких по размеру кластеров («сгустков» узлов).

Решение задачи выделения кластеров по всей области локации имеет несколько серьезных недостатков. Наиболее очевидным из них является то, что при большом количестве узлов и малом расстоянии между ними, трудно выделить подходящие кластеры.

Альтернативным решением является разбиение продуктивного пласта (Рис. 2) на множество вспомогательных областей меньшего размера и выделение кластеров внутри каждой из них. «Ключевые» точки рассчитываются как центры масс кластеров.

Вспомогательные области представлены параллелепипедами, имеющими одинаковые параметры – длину, ширину, высоту и угол наклона (Рис. 4).

Очевидно, что от способа разделения области локации зависит как качество кластеризации, так и количество «ключевых» точек. Количество «ключевых» точек в одном параллелепипеде равно числу найденных в нем групп узлов, а общее их количество зависит от выбранных параметров разделения области на параллелепипеды.

Для обеспечения гибкости алгоритма введены управляющие параметры: шаг между параллелепипедами по оси X (по длине пласта) и

шаг по оси Y (по ширине). Варьированием этих параметров можно добиться того, чтобы параллелепеды находились друг от друга на

заданном расстоянии, не охватывая некоторые участки области локации, или накладывались друг на друга.

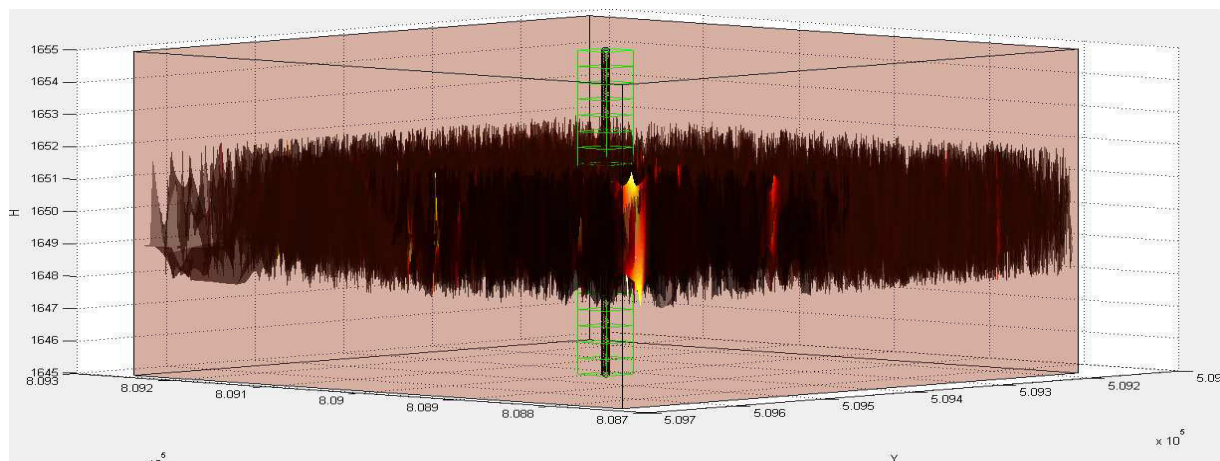


Рис. 3. Исходная трехмерная модель трещиноватости

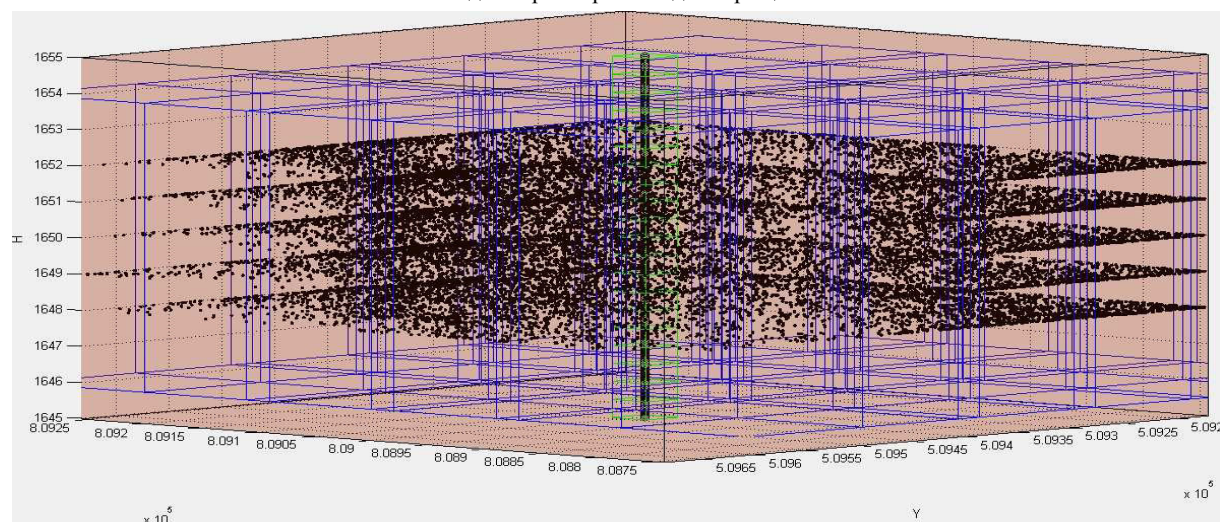


Рис. 4. Разбиение продуктивного пласта на параллелепеды

Одним из важных вопросов иерархической кластеризации, является определение оптимального числа кластеров в наборе данных [8]. В разработанном алгоритме реализованы три способа, основанные на различных критериях оптимальности.

Первый способ основан на вычислении «жизненных циклов» («lifetimes») кластеров [9].

Пусть первый кластер создан объединением двух узлов, находящихся на расстоянии $d1$ друг от друга. Следующий кластер был создан на основе узлов, имеющих между собой дистанцию $d2$, большую, чем $d1$, но при этом минимальную среди остальных дистанций. Тогда «жизненным циклом» первого кластера называют величину, равную $(d2-d1)$.

Суть способа заключается в нахождении на иерархическом дереве кластеров максимального «жизненного цикла». Количество кластеров, существующих одновременно в течение него, и

является оптимальным. При этом величиной порога для «среза» кластерного дерева может быть любое значение из найденного «жизненного цикла».

Данный способ прост в реализации, однако он порождает следующую проблему: невозможно определить «жизненный цикл» самого крупного кластера. Ведь существует вариант, что разбивать область локации на кластеры не следует вовсе, определив все узлы в один кластер.

Отчасти решением данной проблемы является введение некоторой пороговой величины, которая бы определяла, выполнить разбиение в данном конкретном случае или нет. В качестве такой величины может быть принята, например, половина высоты дерева кластеров. Если максимальный «жизненный цикл», найденный на дендрограмме (графическом изображении дерева кластеров), превышает это значение, то принимается решение о разбиении. В противном

случае разбиение не производится.

Второй способ оперирует не высотой кластерного дерева, а значениями коэффициента неоднородности [10].

В данном случае каждая связь иерархического кластерного дерева получает в соответствие значение коэффициента неоднородности, определяемое как разность высоты самой связи и средней высоты связей, лежащих на нижних уровнях иерархии, скорректированная делением на стандартное отклонение. Чем больше это значение, тем существенней различие в кластерах, объединяемых связью. Чем меньше, - тем выше сходство между кластерами.

Выбираются две связи с наибольшими значениями коэффициента неоднородности, и вычисляется разность между ними. Если эта разность превышает заданную пороговую величину, то принимается решение о разбиении на кластеры. «Линия отсечения» проводится на дендрограмме между уровнем с максимальным значением коэффициента и ближайшим снизу уровнем иерархии. В противном случае разбиение не производится, и все узлы определяются в единый кластер.

Третий способ основан на вычислении внутри- и межкластерных расстояний [11]. Здесь в расчет принимается только структура и характеристики исходного набора узлов.

Окончательное разбиение на кластеры R должно удовлетворять следующему условию:

$$\min d(C_i, C_j) > \max d(h(C_i), h(C_j)), \forall C_i, C_j \in R,$$

где $d(C_i, C_j)$ – расстояние между парой узлов кластеров C_i и C_j ; $d(h(C_i), h(C_j))$ – расстояние между узлами одного кластера.

Иначе говоря, при окончательном разбиении различие между каждой парой кластеров должно быть больше, чем «самоподобие» каждого из них.

Для того чтобы определить такое разбиение

требуется просмотреть все возможные разбиения иерархического дерева. Их количество равно $(m-1)!$, где m – число узлов исходного набора. Таким образом, на больших объемах данных применение данного способа может вызвать серьезные затруднения, связанные с высокой трудоемкостью.

Отчасти проблему можно решить, если рассматривать только N последних разбиений, т.е. ситуации с количеством кластеров, равным $N, N-1, \dots, 2, 1$. Это позволит уменьшить время определения окончательного разбиения, не теряя при этом важной информации. Однако в этом случае на долю исследователя выпадает определения числа N .

Следует отметить, что первые два из описанных способов позволяют настраивать «строгость» фильтрации, изменяя пороговую величину разбиения: стимулировать алгоритм либо к выделению кластеров, либо, напротив, к отнесению всех данных в единую группу.

Иерархическая кластеризация позволяет сократить избыточность узлов в области локации для аппроксимации трехмерной модели трещиноватости РЛСБ по методу триангуляции Делоне. При этом на трехмерном графике, изображающем модель трещины, строятся треугольные фрагменты поверхностей, проходящих через три «ключевые» точки, а объединение фрагментов образует окончательную пространственную модель трещиноватости.

Для устранения выбросов перед построением модели выполняется медианная фильтрация «ключевых» точек.

Результаты применения трех способов иерархического кластерного анализа приведены на рисунках 5 - 10. На рисунках с нечетными номерами даны модели трещиноватости области локации размером 512×512 м². На рисунках с четными номерами даны укрупненные модели центральной четверти области локации.

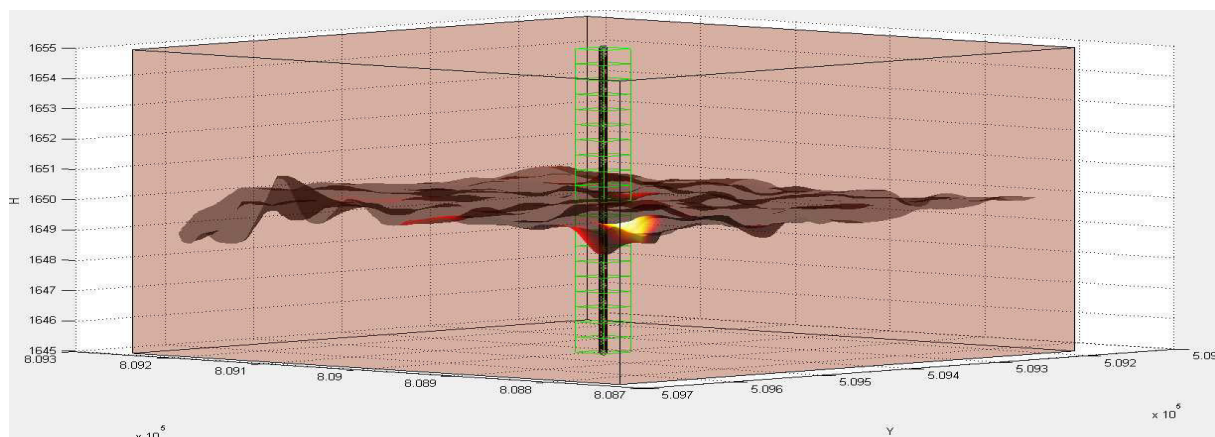


Рис. 5. Способ «жизненный цикл»

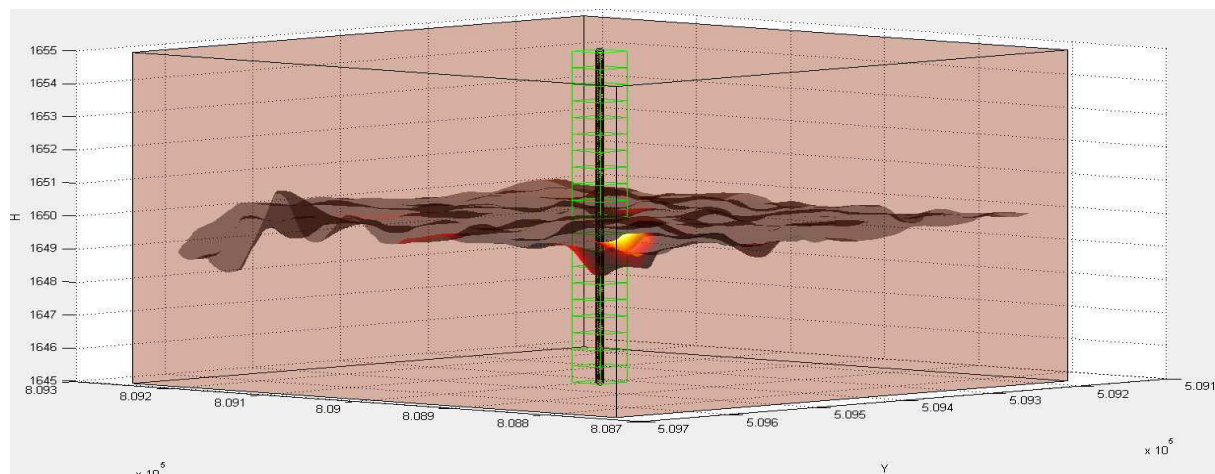


Рис. 6. Способ «жизненный цикл». Фрагмент

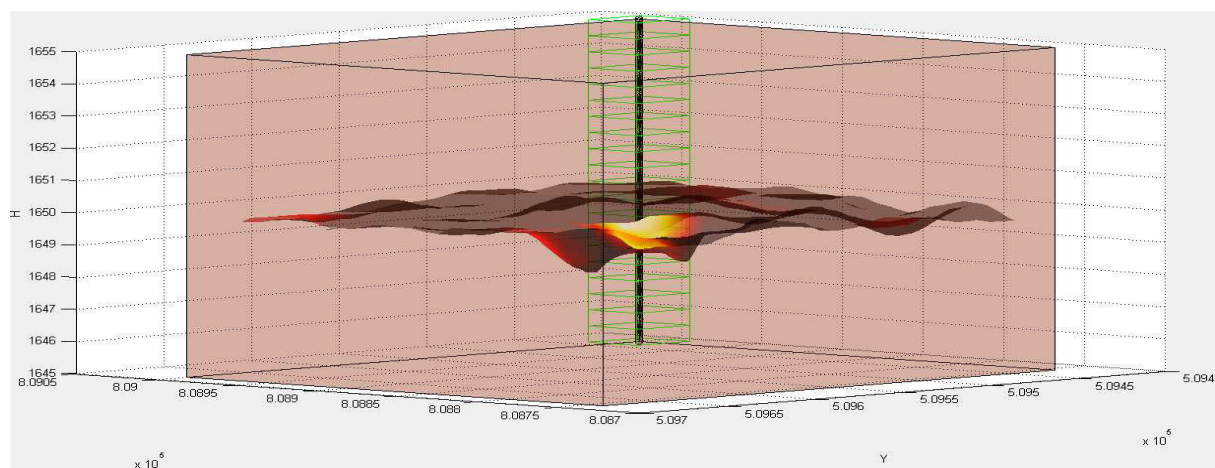


Рис. 7. Способ «коэффициент неоднородности»

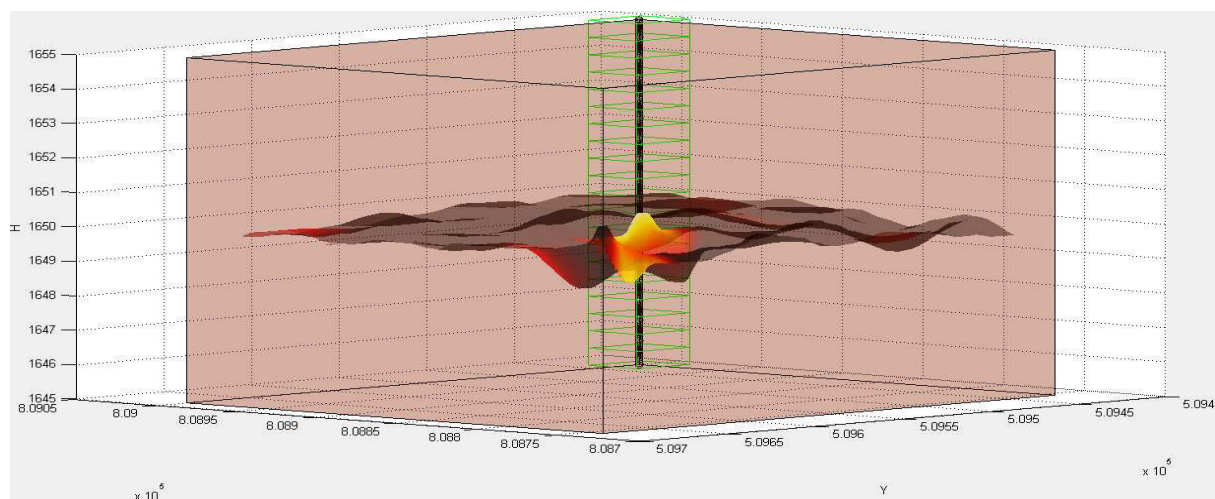


Рис. 8. Способ «коэффициент неоднородности». Фрагмент

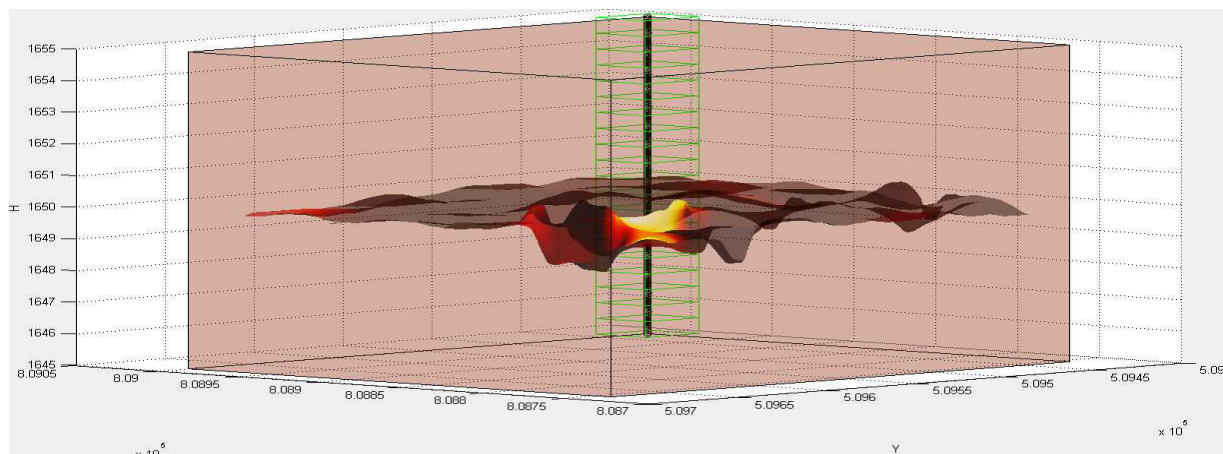


Рис. 9. Способ «внутри- и межкластерных расстояний»

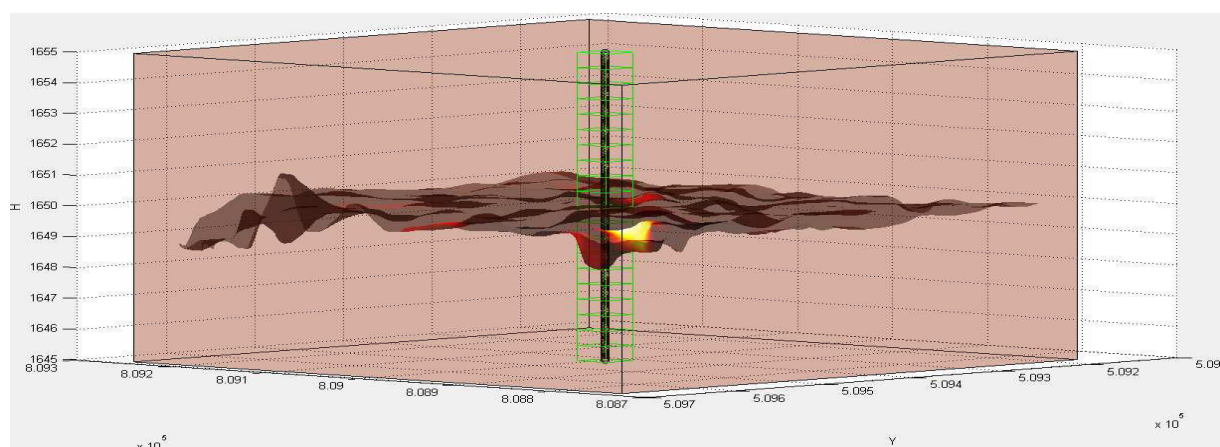


Рис. 10. Способ «внутри- и межкластерных расстояний». Фрагмент

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложена и построена трехмерная модель зоны трещиноватости продуктивного пласта при проведении ГРП. Модель названа «распряженным листом смятой бумаги» РЛСБ.

Использовались полевые данные мониторинга ГРП, проведенного с помощью локации микросейсмических сигналов наземной нерегулярной системой приема.

Для устранения чрезмерной избыточности исходных данных локации была применена оригинальная пространственная фильтрация, основанная на трех методах агломеративной иерархической кластеризации.

При визуализации модели РЛСБ использовался метод триангуляции Делоне.

Выполнена программная симуляция, подтвердившая достоверность результатов моделирования зоны трещиноватости пласта.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена по заданию Министерства образования и науки РФ, проект №7.599.2011, Темплан, НИР № 01201255056.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Желтов Ю. П. Механика нефтегазоносного пласта / – М.: Недра, 1975. – 217 с.
- [2] Ю. Л. Новаковский, Е. В. Рабинович, А. С. Туркин. Определение размеров закрепленных трещин, образующихся при гидравлическом разрыве пласта // Экспозиция Нефть Газ. – 2012. - №4. – С. 95 – 97.
- [3] Ильинский А.Д. Локация очагов микроземлетрясений при пассивном сейсмическом мониторинге гидроразрыва пласта / А.Д. Ильинский, М.А. Краснова // Сейсмические приборы. – 2009. – Т. 45, № 3. – С. 14-40.
- [4] Mahrer K.D. Hydraulic fracture height in cased wells // Geoexploration, [Pap.] Int. Symp. Borehole Geophys. Petrol., Hydrogeol., Min. and Eng Appl. – 1991. – V. 28. – P. 221-250.
- [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): Сборник материалов конференции. - 2009. – С. 171 - 174.
- [6] Е. В. Рабинович, А. С. Туркин, Ю. Л. Новаковский.

Наземная локация микросейсмических сигналов для мониторинга гидравлического разрыва пласта // Доклады ТУСУР. - 2012. - № 1(25). - Ч. 1. с. 104-112.

[7] Николенко С. И. Алгоритмы кластеризации / Машинное обучение – ИТМО, 2006. – // [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://logic.pdmi.ras.ru/~sergey/teaching/ml/11-cluster.pdf>, свободный (дата обращения: 14.05.2012).

[8] Воронцов К. В. Лекции по алгоритмам кластеризации и многомерного шкалирования / Машинное обучение – 2010. – // [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/c/ca/Voron-ML-Clustering.pdf>, свободный (дата обращения: 14.05.2012).

[9] Fred L. N. Combining Multiple Clusterings Using Evidence Accumulation / L. N. Fred, A. K. Jain. // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2005. – Vol. 27, No. 6. – p. 7-11.

[10] Bailey M. Automated Classification and Analysis of Internet Malware / M. Bailey, J. Oberheide, J. Andersen. // Recent Advances in Intrusion Detection. – 2007. – pp. 188-194.

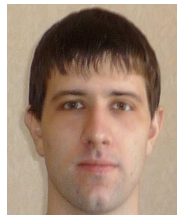
[11] Theodoridis S. Pattern Recognition / S. Theodoridis, K. Koutroumbas. - Academic Press, Inc. USA, 2009. – 494 pp.



Рабинович Евгений Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Вычислительная техника» НГТУ и кафедры «Вычислительные системы» СибГУТИ. Область научных интересов и компетенций – цифровая обработка сигналов и моделирование нелинейных динамических систем. Автор более 80 научных статей и 7

учебных пособий.

E-mail: Erabinovich1952@gmail.com



Вайнмастер Павел Иванович, магистр кафедры «Вычислительная техника» НГТУ. Автор 3 научных статей. Область научных интересов и компетенций - цифровая обработка сигналов.

E-mail: wmaster91@mail.ru



Новиковский Юрий Леонидович, директор ЗАО НПП «СИБНЕФТЕГАЗ». Область научных интересов и компетенций – прикладные геофизические исследования. Автор более 10 публикаций и 2 патентов РФ.

E-mail: sog@ngs.ru