

УДК 004.93:550.8.05

А. В. Козлов, М. В. Козлов, Ф. Д. Шмаков

**АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ
ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ
МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

126

*Рассмотрены алгоритмы построения трехмерных моделей областей микросейсмической активности. Первый подход включает построение полигональных поверхностей на основе воксельных моделей интерполируемых параметров микросейсмических событий. Вторым – использует алгоритм триангуляции на основе критерия Делоне и метода *a-shapes* для определения границ трехмерной модели. На основе предложенных алгоритмов разработано программное обеспечение, предлагающее расширенные графические средства для анализа и интерпретации многопараметрической микросейсмической информации.*

*Algorithms for constructing three-dimensional models of microseismic activity fields are described. The first approach is based on voxel models and involves the construction of polygonal surfaces of interpolated parameters of microseismic events. The second approach uses a triangulation algorithm based on the Delaunay criterion and *a-shapes* method. Software developed on the basis of the proposed algorithms, offers advanced graphical tools for the analysis and interpretation of microseismic multiparameter data.*

Ключевые слова: микросейсмический мониторинг, стимулируемый объем месторождения, облако микросейсмических событий, алгоритм, модель, триангуляция Делоне.

Key words: microseismic monitoring, stimulated reservoir volume (SRV), point cloud, algorithm, model, Delaunay triangulation.

В настоящее время во всем мире активно развиваются методы пассивного микросейсмического мониторинга. Одно из направлений практического применения этих методов связано с процессами разработки месторождений углеводородов, включая мониторинг различных геолого-технологических мероприятий: гидравлического разрыва пласта, нагнетания воды или пара в пласт, бурения скважин. Конечной целью исследований этих процессов стало картирование развивающихся трещин гидроразрыва, мониторинг путей миграции флюидов, определение зон питания добывающих скважин.

Длительные микросейсмические наблюдения позволяют получить информацию о пространственном распределении источников микросейсмических событий, порождаемых в результате техногенных воздействий или естественных процессов, происходящих в среде. Множество



источников образуют так называемые облака микросейсмических событий (облака точек), которые характеризуются набором параметров: координатами, временем возникновения, скоростью сейсмических волн в среде, напряжениями, энергией и т. п.

Анализ этой разнородной информации позволяет выделять характерные области сгущения микросейсмических событий и на их основе формировать трехмерные объекты, анализировать изменение во времени их линейных размеров, формы и местоположения. Последующая геологическая интерпретация выделенных объектов может дать информацию о стимулируемом объеме месторождения (Stimulated Reservoir Volume, SRV) [1].

На сегодня построение трехмерной модели SRV по данным микросейсмического мониторинга реализуется с помощью двух наиболее распространенных подходов: плотностных алгоритмов и алгоритмов триангуляции пространственных областей [1–3]. Выбор алгоритма для построения трехмерной модели зависит от конфигурации облака микросейсмических событий в пространстве, их количества, а также необходимой степени приближения модели к анализируемым данным.

В НИИ ПИиМГ БФУ проведен ряд исследований по созданию алгоритмов распознавания и актуализации трехмерных объектов на основе обработки данных микросейсмического мониторинга. Например, в работе [4] на основе кластерного анализа реализован алгоритм распознавания кусочно-линейных объектов в облаке микросейсмических событий с последующей их актуализацией в виде плоских полигонов в трехмерном пространстве.

В статье развивается это направление исследований в части разработки алгоритмов и программного обеспечения для построения трехмерных моделей SRV на основе параметрических данных микросейсмического мониторинга. Первый подход включает построение полигональных поверхностей на основе воксельных моделей интерполируемых параметров микросейсмических событий. Второй – использует алгоритм триангуляции на основе критерия Делоне и метода α -shapes для определения границ областей микросейсмической активности.

Для реализации первого подхода построения объемной модели SRV применяется воксельный алгоритм. Воксель – элемент модели изображения, содержащий конкретное значение какого-либо параметра микросейсмического события. В пространстве, содержащем облако микросейсмических событий, задается сетка с заданным шагом. Шаг сетки определяет разрешение воксельной модели. Чем меньше шаг сетки, тем более высокого разрешения получится модель, но в тоже время повысится вычислительная сложность алгоритма и, соответственно, время, затрачиваемое на построение модели. Значение выбранного параметра для каждого события интерполируется на заданную сетку по формуле

$$F_i = \sum_j \left(\frac{1}{k_j} \cdot \frac{A_j}{(R_{ij} + 1)} \right),$$



где F_i — значение плотности микросейсмических событий для i -ой ячейки сетки; A_j — значение параметра j -го события; R_{ij} — расстояние от j -го события до центра i -й ячейки; $k_j = \sum_i \left(\frac{1}{R_{ij} + 1} \right)$ — коэффициент,

за счет которого сумма интерполируемых значений во всех ячейках равна исходному значению параметра микросейсмического события.

Для построения объемной модели в алгоритме задается пороговое значение вокселя, например, не превышающее 5% от суммарного значения параметра для всех ячеек сетки. Воксели, удовлетворяющие выбранному порогу, составляют трехмерную модель облака микросейсмических событий. На рисунке 1 представлено отображение облака микросейсмических событий при помощи воксельной модели. По построению модели объем, ограниченный вокселями, включает 95% всех микросейсмических событий.

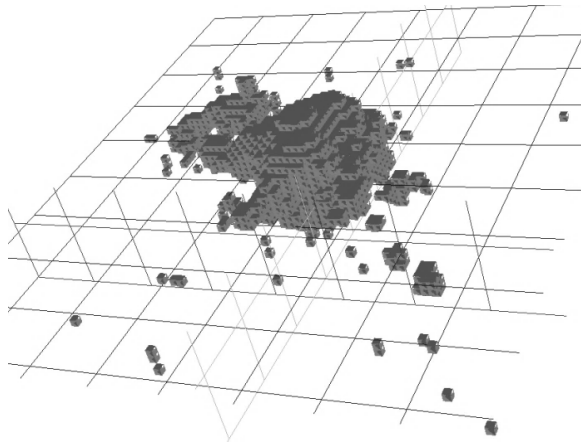


Рис. 1. Изображение объема при помощи воксельной модели

На последнем этапе построения объемной модели полученные на предыдущем шаге воксели обрабатываются при помощи алгоритма "Marching cubes" [5]. Этот алгоритм часто используется для построения томографических изображений.

Суть алгоритма заключается в последовательном опросе всех вокселей по следующей схеме. Для каждого опрашиваемого вокселя рассматривается 8 вокселей, ограничивающих его со всех сторон. Значения 8 вокселей сравниваются с заданным пороговым значением, а в зависимости от результата сравнения определяется тип полигона для отрисовки — один из возможных 256 вариантов, который рисуется за место опрашиваемого вокселя. Если все 8 вокселей вместе с опрашиваемым удовлетворяют или не удовлетворяют заданному пороговому значению, то полигон не рисуется. На рисунке 2 представлено отображение облака микросейсмических событий при помощи модели полигональных поверхностей.

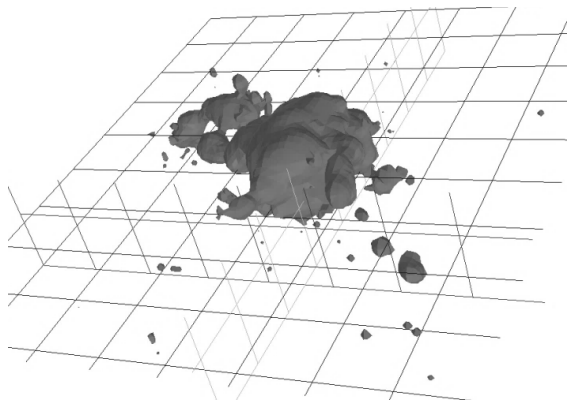
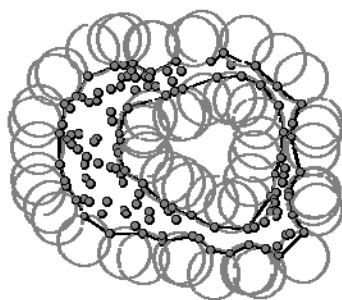


Рис. 2. Изображение объема при помощи вокселей, обработанных алгоритмом "Marching cubes"

Для реализации второго подхода к построению объемной модели SRV применяется итерационный алгоритм триангуляции на основе критерия Делоне для трехмерного случая [6; 7]. Задается «суперструктура» – октаэдр, содержащий все точки облака микросейсмических событий. Далее облако точек разбивается на множество всех возможных тетраэдров. Для каждого тетраэдра вычисляется радиус описанной сферы, такой, что ни одна из точек облака, кроме вершин тетраэдра, не лежит внутри сферы. Осуществляется поиск тетраэдров, удовлетворяющих данному критерию. На последнем этапе производится удаление из сетки всех тетраэдров, в числе вершин которых есть вспомогательные узлы, использовавшиеся для построения суперструктуры.

Результатом работы алгоритма является триангуляция Делоне облака микросейсмических событий. В общем случае граница сетки представляет собой невыпуклый многогранник с треугольными гранями, опирающимися на наиболее удаленные от центра триангуляции узлы [7]. Однако, как показывает практика, объекты, оконтуривающие области микросейсмической активности, могут иметь сложную структуру, включающую выпуклые и вогнутые области, их пересечения под разными углами, а также содержать замкнутые полости внутри себя. Один из способов формирования границ таких объектов основан на методе альфа-форм (α -shapes) [1; 3].

Суть метода заключается в формировании границы области с учетом заданного порогового значения радиусов сфер тетраэдров, составляющих трехмерную сетку. Пороговое значение радиуса выбирается в зависимости от среднего расстояния между всеми точками облака. Производится обход всех полученных ранее тетраэдров, если радиус описанной сферы тетраэдра меньше порогового значения, то текущий тетраэдр удаляется. Оставшиеся тетраэдры формируют результирующую трехмерную модель облака микросейсмических событий. Рисунок 3 иллюстрирует данный подход для двухмерного случая (тетраэдры заменяются на треугольники, сферы на окружности) [3].



130

Рис. 3. Иллюстрация идеи алгоритма выделения контура, на основе метода α -shapes в двухмерном случае (CGAL at www.cgal.org)

На рисунке 4 представлено изображение объемной модели облака микросейсмических событий, построенной по алгоритму триангуляции Делоне и метода α -shapes.

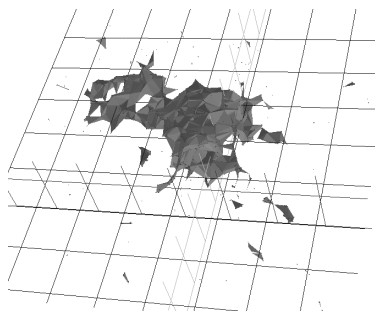


Рис. 4. Изображение объема на основе триангуляции Делоне с использованием метода α -shapes

Алгоритм триангуляции уступает в производительности плотностному алгоритму, но дает более точный результат в приближении объемной модели к облаку микросейсмических событий, поскольку вершины полигональной поверхности совпадают с точками облака. Воксельный алгоритм более предпочтителен для построения объемной модели облака микросейсмических событий в случае, когда необходимо просматривать значения интерполируемого параметра, как на поверхности объемной модели, так и внутри нее.

Рассмотренные алгоритмы построения трехмерных моделей SRV реализованы авторами в программе визуализации результатов обработки данных микросейсмического мониторинга. Программа позволяет отображать данные микросейсмического мониторинга в виде трехмерных моделей, что помогает описать конфигурацию микросейсмических событий в пространстве, охарактеризовать динамику возникновения событий, спрогнозировать появления разломов или протяженных трехмерных объектов.

Для удобства анализа и интерпретации микросейсмических данных программа позволяет загружать различную контекстную информацию: сведения о системе наблюдений, геолого-технологические па-



раметры месторождения, включая данные по добывающим, нагнетательным скважинам, операциям и параметрам ГРП (диаграммы технологических процессов, графики закачки, дизайн проекты) и т. п.

Программа содержит различные инструменты для настройки отображения микросейсмических данных в различных проекциях, позволяя осуществлять интерактивное редактирование отдельных параметров трехмерной сцены и микросейсмических событий. Функциональный состав программы трехмерной визуализации следующий.

1. Средство отображения микросейсмических событий с возможностью включения в трехмерную сцену контекстной информации.

2. Средство фильтрации микросейсмических событий по значениям их параметров. Инструменты построения карт плотностей микросейсмических событий или их параметров в проекции на заданную плоскость.

3. Средство распознавания кусочно-линейных объектов в облаке микросейсмических событий, их актуализация в виде плоских полигонов в трехмерном пространстве [4].

4. Средство построения объемных моделей областей микросейсмической активности, которое позволяет выбирать алгоритм построения модели в зависимости от набора исходных данных.

5. Инструменты визуализации трехмерной сцены, которые позволяют изменять угол обзора, масштабировать как отдельные объекты, так и сцену в целом. Графические инструменты построения срезов трехмерной модели вдоль заданной поверхности и отображение распределения параметров микросейсмических событий на срезе (рис. 5).

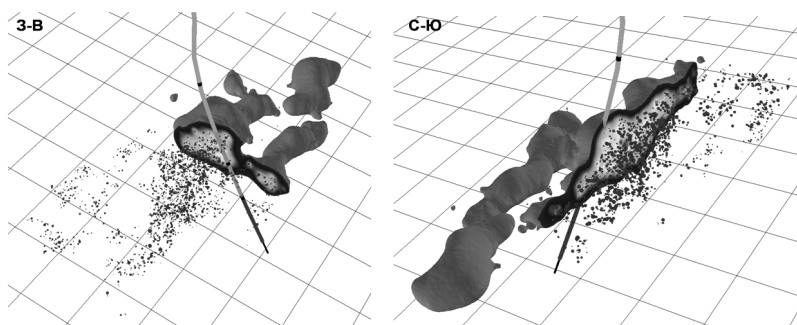


Рис. 5. Срезы изоповерхности плотности энергии микросейсмических событий в проекции на вертикальные плоскости запад – восток, север – юг

6. Инструменты анализа объемных моделей, включающих возможность расчета значений некоторых интегральных параметров модели. Например, объема изоповерхности, ограничивающей область микросейсмической активности, суммарных значений параметров, попадающих в заданную область или соответствующих заданной плотности распределения микросейсмических событий.

Для реализации программного обеспечения (ПО) использовался кроссплатформенный инструментарий QT. Графическая часть ПО реализована с использованием кроссплатформенной библиотеки графических функций OpenGL, которая содержит функции для рисования графических объектов на трехмерной сцене. ПО было протестировано в операционных системах Windows 7 и Linux.



Авторы выражают благодарность за постановку задачи и помощь Г. Н. Ерохина.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по гранту 14-07-00699.

Список литературы

1. Hajizadeh Y., Amorim R., Boroumand N., et. al. Interactive Sketch-based Estimation of Stimulated Volume in Unconventional Reservoirs Using Microseismic Data // ECMOR XIII - 13th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery. Biarritz, 2012.

2. Zimmer U. Calculating stimulated reservoir volume (SRV) with consideration of uncertainties in microseismic-event locations // Canadian unconventional resources conference. SPE. 2011.

3. Baidurja R., Avi L., Jianfu M. Unconventional micro-seismicity based enhanced 3D SRV estimator using advanced parameter-free concave methodology // SEG. 2014. № 1409.1. P. 2304–2308.

4. Алсынбаев К. С., Козлов А. В. Средства распознавания и визуализации разломов и зон техногенной трещиноватости на основе обработки данных микросейсмического мониторинга // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2014. Вып. 4. С. 127–134.

5. William E. L., Harvey E. C. Marching cubes: a high resolution 3D surface construction algorithm // Computer Graphics. 1987. Vol. 21, № 4. P. 163–169.

6. Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и ее применение. Томск, 2002.

7. Галанин М. П., Щеглов И. А. Разработка и реализация алгоритмов трехмерной триангуляции сложных пространственных областей: итерационные методы // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2006. № 10. С. 1–32.

Об авторах

Антон Владимирович Козлов – зав. лаб., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: AnKozlov@kantiana.ru

Максим Владимирович Козлов – лаборант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: MKozov@kantiana.ru

Федор Дмитриевич Шмаков – ст. науч. сотр., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: FShmakov@kantiana.ru

About the authors

Anton Kozlov – head of the laboratory, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: AnKozlov@kantiana.ru

Maksim Kozlov – researcher, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: MKozov@kantiana.ru

Fedor Shmakov – senior researcher, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: FShmakov@kantiana.ru