

АЛГОРИТМЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПОСТОЯННО ДЕЙСТВУЮЩЕГО МОНИТОРИНГА МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

Г. Н. Ерохин, К. С. Алсынбаев, В. М. Брыксин, В. В. Савеленко,
В. И. Строков, А. В. Козлов, М. В. Козлов

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 236016, Калининград

УДК 004.93:550.8

Рассмотрена технология постоянного мониторинга состояния месторождений углеводородов (УВ) (MicroseismicPRM), включающая мониторинг мероприятий по интенсификации добычи УВ и мониторинг процессов, протекающих между этими мероприятиями. Технология включает определение параметров микросейсмических событий на основе решения обратных задач с последующим применением пространственно-временной фильтрации полученных событий и определением тензоров сейсмических моментов.

Представлены алгоритмы моделирования и определения численных характеристик образований в виде полигонов и граневых фигур. Все модули объединены в единый вычислительный комплекс. Графический пользовательский интерфейс позволяет интерактивно редактировать вычислительные процессы, представленные в форме ациклического графа обработки. Счётные модули работают на удаленном суперкомпьютере, а управление и 3D-визуализация осуществляются на персональных рабочих станциях.

Ключевые слова: микросейсмический мониторинг, тензор сейсмического момента, кластеризация, тетраэдризация, воксель, распознавание.

Введение

Технология PRM. Данная технология предполагает непрерывный процесс мониторинга за состоянием месторождений углеводородов (УВ), что позволяет отследить мельчайшие изменения в состоянии исследуемых пластов. Для использования данной технологии необходимы как комплекс технических средств для осуществления мониторинга, так и комплекс программных средств для обработки и интерпретации получаемых данных.

Для регистрации микросейсмических возмущений от глубинных источников, связанных с локальными деформациями в среде, используется многоканальная (одно или трехкомпонентная) сейсмическая антенна малой апертуры (около 500 метров). В качестве регистрирующих датчиков выступают электро-механические геофоны.

Дальнейшая обработка состоит в извлечении координат микровозмущений из зарегистрированных временных записей. Она сводится к решению задачи обнаружения локальных микровозмущений на временных записях с сопутствующим детектированием их времен приходов на соответствующие каналы пространственной антенны с последующим решением обратной задачи.

Анализ полученных событий. В данной статье не будем останавливаться на вопросах решения задачи обнаружения событий и определения их координат, а подробно рассмотрим постобработку получаемых микросейсмических событий.

1 Анализ тензора сейсмического момента

Рассмотрим описание подхода для идеально упругой среды. Система уравнений Ламе описывает движение однородной идеально упругой среды:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} - \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}^0(x, t)}{\partial x_j} \quad (1)$$

Здесь $i, j = 1, 2, 3$; $x, y \in R^3$; $t \in R^1$; ρ — плотность среды, σ_{ij} — тензор напряжения, связанный с вектором смещения $u(x, t) = (u_1, u_2, u_3)$ в виде

$$\sigma_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \lambda \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \quad (2)$$

где λ, μ — константы Ламе, повторение индексов означает суммирование, а $\sigma_{ij}^0(x, t)$ — тензор напряжения разлома, который имеет вид

$$\sigma_{ij}^0(x, t) = M_{ij}(t) \delta(x - y) \quad (3)$$

где $i, j = 1, 2, 3$; $x, y \in R^3$; $\delta(x)$ — обобщенная функция Дирака нулевого порядка, $M_{ij}(t)$ — симметричный тензор второго порядка. $M_{ij}(t)$ называется тензором сейсмического момента. Тензор $M_{ij}(t)$ имеет размерность единиц измерения энергии $g \cdot cm^2 \cdot s^2$. Размерность обобщенной функции $\delta(x) — cm^{-3}$. Вектор y описывает координаты очага землетрясения.

В терминах эквивалентных сил, тензор сейсмического момента может описывать сдвиговый разрыв, сдвиговое разрушение среды, трансформационное изменение объема, трещину отрыва и т.д. [1, 2].

Расчет и анализ вышеуказанного тензора сейсмического момента позволяет дополнить информацию о геометрическом расположении микросейсмических событий такими важными параметрами как значения и направления главных осей напряжений в данной точке пласта, что дает возможность анализировать направление разлома (рис. 1).

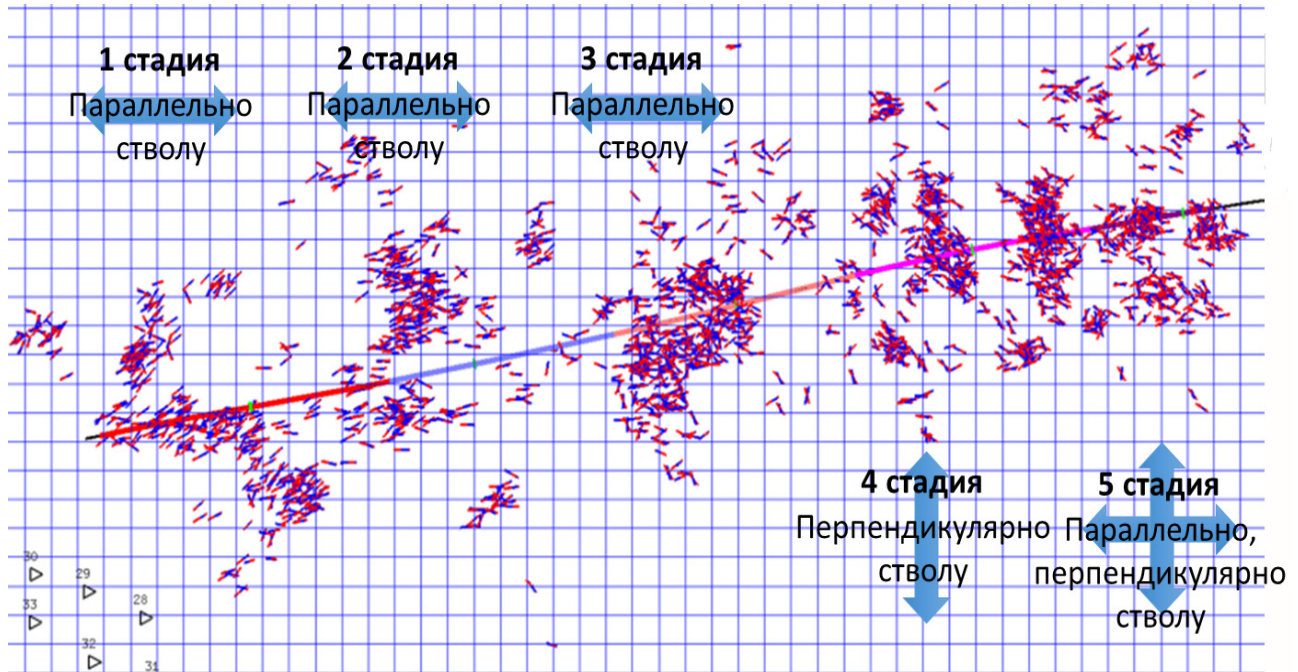


Рис. 1: Зарегистрированные микросейсмические события в процессе производства 5-стадийного гидроразрыва пласта (ГРП) с нанесенными осями главных напряжений. Шаг сетки равен 10 метрам

2 Изоповерхности как отображение зон энергетических сгущений

Одним из важных этапов анализа области локализации микросейсмических событий является построение изоповерхности параметров событий. Изоповерхность строится с применением широко известного алгоритма секущих кубов [3] (рис. 2) на основании интерполированного по пространству параметра (наиболее важной для анализа является изоповерхность плотности энергии событий — позволяет оценить наиболее деформационно-активную область пласта).

Функция построения изоповерхности глубоко параметризована для отображения различных характеристик облака микросейсмических событий. Так необходимо задать дискретность воксельного поля, радиус усреднения для сглаживания атрибутов, уровень отсечения (например, в процентном соотношении от значений атрибутов вокселей).

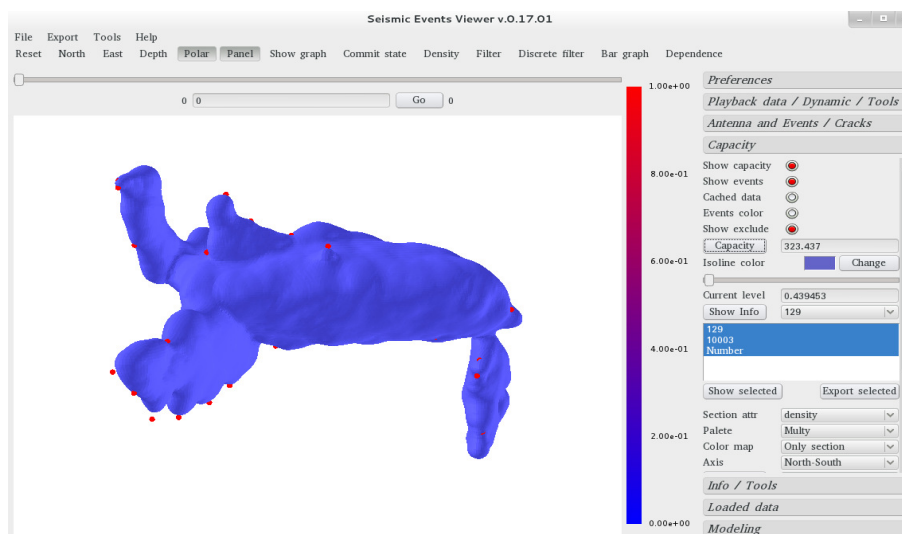


Рис. 2: Модель в виде изоповерхности в воксельном поле

3 Кластеризации как средство локализации образований в облаке микросейсмических событий

Одним из способов выделения отдельных образований или объектов в облаке микросейсмических событий является проведение кластеризации, при которой близкорасположенные в евклидовом пространстве события объединяются в один объект [5]. Однако при проведении процедуры кластеризации учитывается не только евклидово расстояние между событиями, но и направления сейсмических напряжений в этих точках пространства, что позволяет более полно учесть связь определенных событий.

Каждая пара компонент тензора сейсмического момента может быть охарактеризована их векторным произведением. Направление векторного произведения перпендикулярно плоскости, образуемой этими компонентами, а его модуль, соответствующий площади прямоугольника, построенного на двух векторах-компонентах, определяет совокупную мощность этих двух компонент. Плоскость с наибольшим по площади прямоугольником — наибольшая тензорная плоскость.

При кластеризации используется метрика двух типов. Первая учитывает угол между наибольшими тензорными плоскостями и линией соединяющей два события: большему углу соответствует большее расстояние. Вторая учитывает угол между нормальными к наибольшим тензорным плоскостям и линией соединяющей два события: большему углу соответствует большее расстояние.

На рис. 3 приведены результаты кластеризации микросейсмических событий для трех используемых метрик.

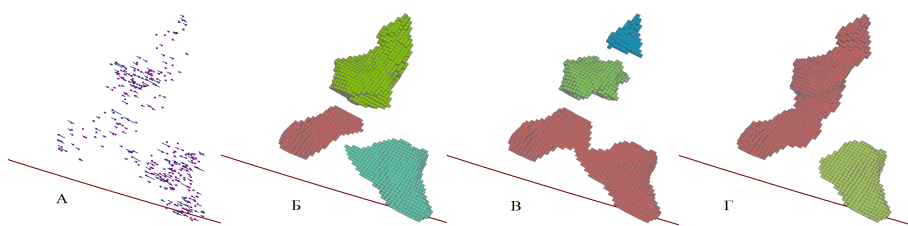


Рис. 3: А) облако микросейсмических событий, Б) кластеризация с учетом только евклидовой метрики, В) кластеризация с учетом метрики, зависящей от угла между наибольшими тензорными плоскостями, Г) кластеризация с учетом метрики, зависящей от угла между нормальными к наибольшим тензорным плоскостям

4 Формирование граневых и тетраэдных моделей

Для построения граневой модели используется модифицированный алгоритм триангуляции Делоне [4] для трехмерного случая с одновременным удалением больших тетраэдров. Для построения описывающей области необходимо предварительно отфильтровать интересующие события, для которых она будет строиться, например, выделить определенный кластер микросейсмических событий или события с определённой плотностью (энергией и т.п.) и задать радиус вырезающей сферы. Пример применения триангуляции приведен на рис. 4

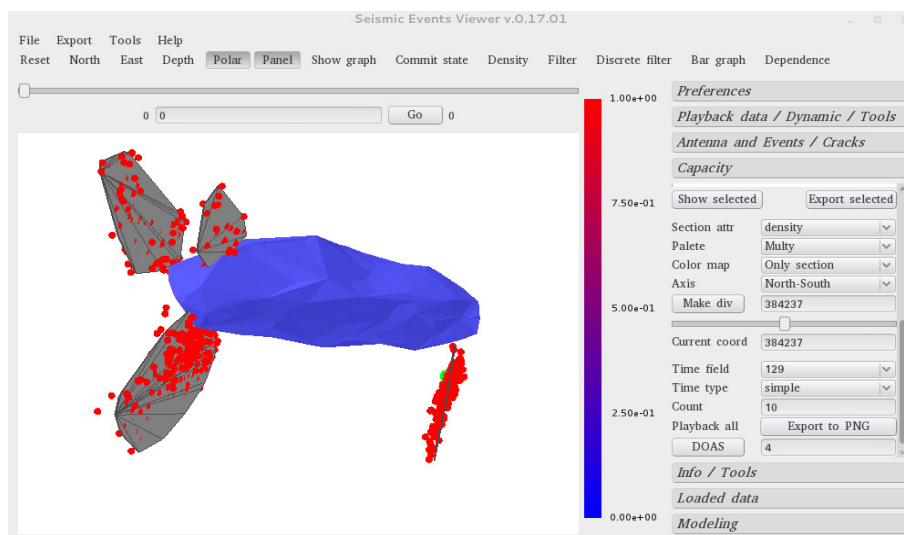


Рис. 4: Описывающая область событий, построенная методом модифицированной триангуляции Делоне

5 Формирование и анализ воксельных представлений

Это самый простой способ геометрически представить 3-мерное пространство в виде дискретной сетки, элемент которой, по аналогии с пикселем, называется «воксел». Иначе говоря, производится своеобразная пространственная растреризация трехмерной области. При разреженной структуре данных возникает проблема определения принадлежности телу области каждого отдельного вокселя.

Авторами предложена и реализована методика, позволяющая определять вхождение вокселей в «тело» объекта или «полость» и основывающаяся на регулярности сетки вокселей и тетраэдризации Делоне. Алгоритм тетраэдризации может быть реализован с использованием принципов растровой графики, описанных в алгоритме Брезенхейма.

Используемый алгоритм тетраэдризации имеет сложность $O(N^2 \log N)$, где N – количество точек событий. Для сокращения количества вычислений предложено проводить расчеты не для всего облака событий,

а для отдельных кластеров. При этом, как правило, отдельному кластеру соответствует группа событий при пассивном мониторинге, так как данный вид мониторинга продолжителен по времени и регистрирует сотни тысяч наблюдаемых событий. При наблюдении за быстропроходящими событиями, такими как ГРП, количество регистрируемых событий, оставшихся после проведенной фильтрации, невелико, что позволяет рассматривать их как единое облако.

Для выделения областей трещиноватости на основе воксельного анализа предложен алгоритм выделения «толстых» и «тонких» областей тела кластера, на основе алгоритма повоксельного сканирования пространства тела трехмерной маской[6]. Сканирование проводится в 2 этапа: на первом этапе выделяются граничные воксели, а на 2 этапе выделяются тонкие воксели, т.е. воксели не имеющие в соседстве внутренних вокселей. На основе полученной воксельной модели производится сепарация исходных микросейсмических событий по принципу «толстых» и «тонких». «Тонкие» события могут аппроксимироваться плоскими образованиями. Для упрощения вычислений автоматического построения плоскостей микросейсмические «тонкие» события разбиваются на кластера. По каждому полученному «тонкому» кластеру выполняется автоматическое построение плоскостей. Сканирующий алгоритм разработан на основе анализа функционала на локальные минимумы. На рисунках 5,6 приведены примеры выполнения расчетов по данной методике.

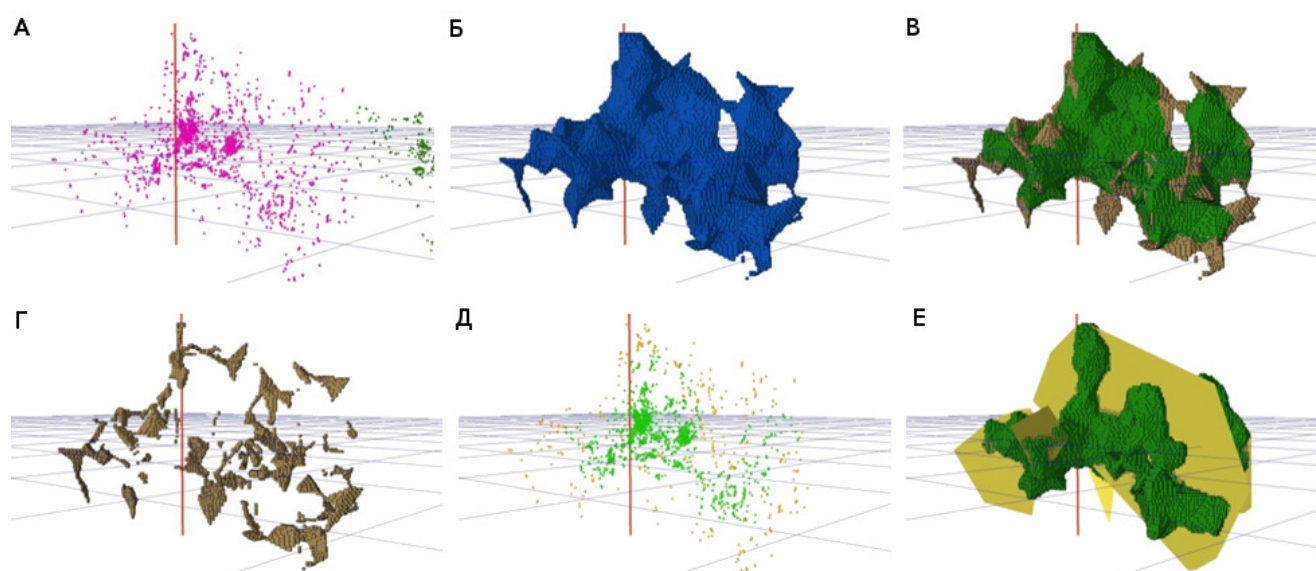


Рис. 5: Модель воксельного пространства: А) кластеризованное облако по евклидовой метрике; Б) тело, распознанное в воксельном представлении; В) тело в воксельном пространстве с выделенными «толстыми» и «тонкими» вокселями. Построение плоскостей трещиноватости: Г) «тонкие» части тела; Д) исходные точки-события, подкрашенные в соответствии с принадлежностью к «толстым» или «тонким» вокселям; Е) линейная аппроксимация фрагментов распознанного тела

6 Комплекс программ

Для удобства получения и интерпретации результатов весь процесс обработки осуществляется с применением реализованной единой программной системы. В графическом пользовательском интерфейсе системы каждый из используемых алгоритмов представлен в виде элемента графа обработки. Такой графический пользовательский интерфейс позволяет интерактивно редактировать вычислительные процессы. Все счётные модули работают на удаленном кластере, а управление и 3D-визуализация осуществляются на персональных рабочих станциях.

Все удалённые счётные модули (вокселизации, фильтрации, кластеризации, корреляции и др.) распараллеливаются для оптимизации временных затрат. Основной применяемый подход — разбитие входных данных на независимые фрагменты, которые возможно обрабатывать одновременно на различных узлах кластера. При таком подходе выигрыш получается линейным и пропорциональным числу одновременно считаемых

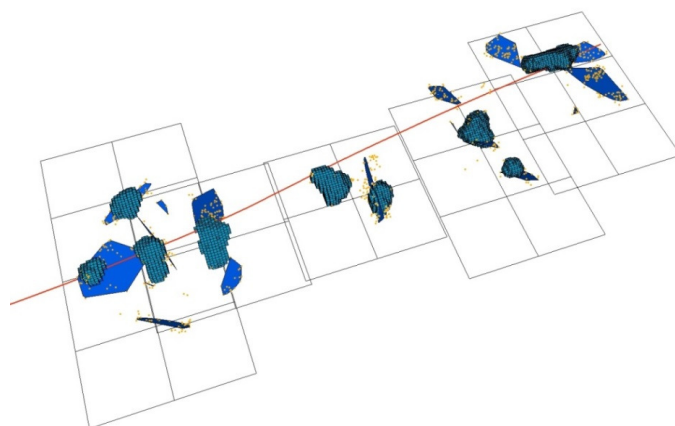


Рис. 6: Воксельная модель с выделением плоских образований при многостадийном ГРП

регионов или интервалов времен. Счётные модули имеют доступ к общему файловому хранилищу и управляющему графом обработки программному обеспечению по высокоскоростной сети InfiniBand, управление вычислительными ресурсами осуществляется с помощью Sun Greed Engine. На кластере установлено программное обеспечение для разработки и выполнения параллельных программ в составе компилятора и среды выполнения MPI от Intel, Mpich, открытых математических библиотек BLAS, nlopt, OpenCV и др.

Ввиду разнородности входных данных, различных приемов фильтрации и моделирования процессов граф обработки не является строго определенным в процессе решения. Система интерактивного управления в части пользовательского интерфейса позволяет добавлять, удалять, редактировать элементы графа обработки, соответствующие этапам обработки, запускает этапы обработки на выполнение и обеспечивает вывод информации о ходе этапа и результатах. Граф обработки, которым оперирует система управления, является ациклическим направленным графом, вершинами которого являются технологические (ввод начальных данные, конвертация и т.п.) и расчетные этапы. Ребрами графа обработки являются данные, являющиеся выходными для одного этапа и исходными для другого, сгруппированные по типам. Один из основных принципов системы — воспроизводимость всех проведенных экспериментов. Завершенный эксперимент является имутабельным, его можно клонировать (перенесутся настройки) и запустить на счет, изменив состав входных данных, либо настройки. Каждый эксперимент визуально представляется как прямоугольный блок на графе процесса обработки. Работа пользователя с каждым этапом обработки осуществляется на соответствующей этому этапу группе элементов интерфейса, доступных в диалоговом окне, ассоциированном с этапом обработки. Возможные состояния этапов и переходы между ними приведены на рис. 7.

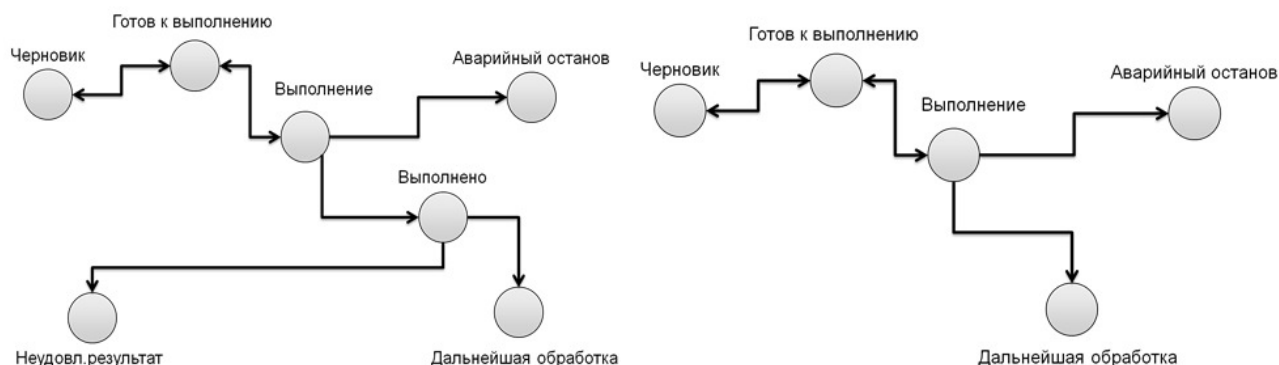


Рис. 7: Состояния этапа (слева — этап предполагает оценку оператором, справа — не предполагает)

Система интерактивного управления осуществляет управление рабочим потоком компьютерной обработки микросейсмических данных. Она включает в себя функционал пользовательского интерфейса, осуществляет создание и редактирование проектов, состоящих из множества этапов обработки. Система управления

работает в многопользовательском режиме, с одним графом обработки (проектом) работают несколько операторов, изоляция установлена на уровне отдельных этапов: редактировать их может только автор, клонировать и просматривать все остальные пользователи.

Основным модулем для визуализации и постобработки микросейсмических событий с помощью методов, представленных ранее, является модуль 3dEventViewer. Он позволяет осуществлять фильтрацию событий, строить изоповерхности, отображать кластеры и т.п. (см. рисунки, приведенные ранее).

Заключение

Описанные в статье методы постобработки событий, а так же представленный подход к осуществлению вычислений позволяют существенно ускорить процесс получения конечного результата мониторинга и представляют наглядный инструментарий для интерпретации. Они позволяют оперативно отслеживать изменения характеристик активной области пласта, что важно при осуществлении постоянного микросейсмического мониторинга

Список литературы

- [1] Aki K., Richards P. Quantitative Seismology Theory and Methods. 1980, vol. 1
- [2] Новатский В. Теория эластичности, 1975, Москва: Наука. 1975.
- [3] William E. L., Harvey E. C. Marching cubes: a high resolution 3D surface construction algorithm // Computer Graphics. 1987. V. 21. Number 4. P. 163–169.
- [4] Кластеризация точек на регулярной сети, <http://habrahabr.ru/post/138185/>
- [5] Боровиков С.Н., Иванов И. Э., Крюков И. А. Построение тетраэдризации Делоне с ограничениями для тел с криволинейными границами // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2005. Том 45. № 8. С. 1407–1423.
- [6] Алсынбаев К. С., Брыксин В. М., Гапеев Д. Н., Ерохин Г. Н., Козлов А. В., Козлов М. В., Шмаков Ф. Д. Построение модели трещиноватости в объеме разрабатываемого месторождения на основе данных микросейсмического мониторинга // 18-я научно-практическая конференция «Геомодель 2016» EAGE (European Association of Geoscientists & Engineers), г.Геленджик, Россия, 12-15 сентября 2016г. Тезисы докладов // ISBN: 978-94-6282-198-9, ISSN: 2214-4609, DOI: 10.3997/2214-4609.201602178. <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=86749>

Геннадий Николаевич Ерохин — д.ф.-м.н., директор НИИ прикладной информатики и математической геофизики Балтийского федерального университета имени И.Канта;
e-mail: GErokhin@kantiana.ru;

Камил Салихович Алсынбаев — к.т. н., зав. лаб. НИИ прикладной информатики и математической геофизики Балтийского федерального университета имени И.Канта;
e-mail: KAlsynbaev@kantiana.ru;

Виталий Михайлович Брыксин — к.т.н., вед. науч. сотр. НИИ прикладной информатики и математической геофизики Балтийского федерального университета имени И.Канта;
e-mail: Vbryksin@kantiana.ru;

Василий Викторович Савеленко — науч. сотр. НИИ прикладной информатики и математической геофизики Балтийского федерального университета имени И.Канта;
e-mail: VSavelenko@kantiana.ru;

Виталий Игоревич Строков — к.ф.-м.н., ст. науч. сотр. НИИ прикладной информатики и математической геофизики Балтийского федерального университета имени И.Канта;
e-mail: ViStrokov@kantiana.ru;

Антон Владимирович Козлов — зав. лаб. НИИ прикладной информатики и математической геофизики Балтийского федерального университета имени И.Канта;
e-mail: AnKozlov@kantiana.ru;

Максим Владимирович Козлов — мл. науч. сотр. НИИ прикладной информатики и математической геофизики Балтийского федерального университета имени И.Канта;
e-mail: MKozlov@kantiana.ru.

Дата поступления — 22 мая 2017 г.