

VIII International Conference:
«Informatics: problems, methodology and technology»

(with publication)

Voronej State University

7-8 february 2008

VIII международная конференция
«Информатика: проблемы, методология, технологии»
(с публикацией)

г. Воронеж, 7-8 февраля 2008 г.

Васильев П.В.¹, Ледоукс Х.²

**Применение 3D триангуляции Делоне и диаграммы Вороного
в ГИС недропользования**

1. БелГУ | Лаборатория ГИС технологий | Россия. email:vassiliev@bsu.edu.ru

2. Делфтский технологический университет | ОТВ, Отдел ГИС технологий | Нидерланды.
email:h.ledoux@tudelft.nl

Реферат

В работе обсуждаются вопросы моделирования месторождений полезных ископаемых в ГИС с построением 3D триангуляции Делоне и диаграммы Вороного. Показано, что разработанная робастная процедура построения подобной универсальной структуры данных полезна для многих методов интерполяции, в частности для интерполяции по методу ближайших соседей. Также описана программная реализация алгоритма в проекте создания ГИС. Предложены возможные области использования в анализе данных скважин детальной и эксплуатационной геологической разведок, при моделировании структур и текстур горных пород, оценке запасов месторождений и оптимизации этапов открытой отработки при планировании добычи руд.

Vassiliev P.V.¹, Ledoux H.²

**Modeling Mineral Deposits with GIS on the Base of 3D Delaunay
Triangulation and Voronoi Diagram**

1. Belgorod State University | Laboratory of GIS Technology | Russia. email:vassiliev@bsu.edu.ru

2. Delft University of Technology | ОТВ, Section GIS Technology | Netherlands. email:h.ledoux@tudelft.nl

Abstract:

This paper discusses the modeling of mineral deposits with the help of GIS methods and of the 3D Delaunay triangulation and the Voronoi diagram. It is shown that the developed procedures for this universal data structure are robust and are very useful for a wide variety of interpolation methods, particularly in natural neighbor interpolation. The implementation of the developed algorithm in open GIS software project is also described. Furthermore, some potential applications for mineral deposit modeling, ore 3D texture simulation, reserves estimation and mine planning are proposed.

Введение

Существующие ГИС общего географического назначения (ArcInfo, MapInfo, Microstation, AutoCad Map, AutoCad Land, Google Map и др.) в основном ориентированы на работу с двумерными картами и их тематическими слоями, в то время как ГИС для недропользования (Datamine, MicroMine, Gemcom, MineScape, Vulcan и некоторые другие) доступны по цене лицензий лишь крупным горнорудным компаниям, что практически не позволяет их использовать в обучении или небольшими коллективами специалистов в решении объемных задач. В этой связи альтернативное развитие получил проект ГИС с программой Geoblock, имеющей открытый исходный код для решения пространственных горно-геологических задач. Как и в традиционных ГИС здесь топографические данные по рельефу местности, поверхностям карьеров или границам раздела литологических разновидностей пород обрабатываются двумерными процедурами триангуляции и построения полигональных диаграмм Вороного (рис. 1).

Однако наиболее важными для представления геологического строения залежи в программе служат модули построения трехмерных каркасных и регулярных блочных моделей месторождений минерального сырья. В этих модулях по исходным точкам данных строится сеть триангуляции Делоне с последующим построением диаграммы Вороного и выполняется интерполяция значений геологических показателей в узлы регулярных решеток.

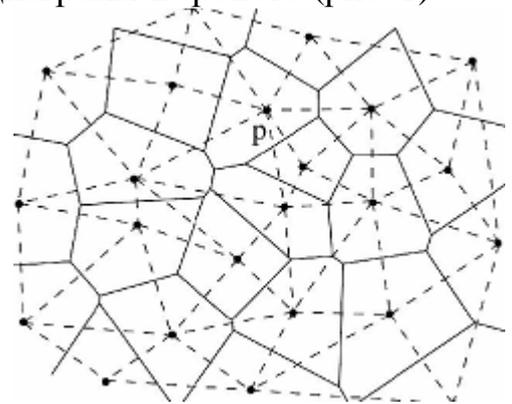


Рис.1. Триангуляция Делоне (пунктир) и диаграмма Вороного в 2D

Построение каркасных моделей месторождений в 3D

При построении геологических каркасных (wireframe) моделей стандартные структуры данных в виде наборов двумерных полигонов или сетей триангуляции имеют лишь небольшое применение – для моделирования рельефа или простых поверхностей раздела сред. Во-первых этим структурам данных не соответствует естественная топология объектов недр, и во вторых, на двумерных каркасах практически невозможно отобразить движение объектов в пространстве.

Пространственная геологическая модель должна подходить как для представления дискретных объектов, так и непрерывных форм. Диаграмма Вороного как раз и обладает свойствами как векторных, так и растровых пространственных типов моделей: с её помощью может быть представлен каждый отдельный объект, а в целом массив ячеек вполне способен определить смежность несвязанных объектов (каждая точка порождает одну ячейку и эта ячейка имеет несколько соседей). Каждой ячейки Вороного

может быть присвоен определенный набор атрибутов различного типа. Диаграмма имеет следующие преимущества перед другими типами моделей:

1. Это адаптивный метод - размер ячеек зависит от густоты распределения точек данных.
2. Это автоматический метод, который не требует задания пользователем каких-то параметров для построения.
3. Исходные данные сохраняются в диаграмме, а не теряются бесследно, как это происходит при растровом представлении и в блочном моделировании.
4. При использовании двойственного графа диаграммы Вороного, тетраэдрализации Делоне, рендеринг оптимизирован, поскольку треугольные элементы являются основными примитивами выбора в большинстве графических пакетов и видео карт.
5. Имеется возможность локального обновления, не затрагивающего полностью всю диаграмму.

Известно, что диаграмма Вороного (VD) и тетраэдрализация Делоне (DT) являются геометрически эквивалентными структурами. Имея одну из этих структур, вторая может быть построена по ней. Ввиду того, что легче построить по рассеянным точкам сеть тетраэдров, то в большинстве алгоритмов строится вначале сеть тетраэдров DT, а затем по ней строится диаграмма полиэдров VD [4, 5]. Таким образом, мы можем конструировать, сохранять и модифицировать некоторую VD работая только с её двойственным графом в виде DT. Извлечение VD из DT занимает время $O(n)$, где n равно числу точек данных в множестве.

Детали алгоритма построения 3D DT/VD приведены в работе [2]. В качестве иллюстрации на рис.2 приведена операция симметричной смены плоскостей (flipping) при построении тетраэдров удовлетворяющих критерию Делоне. Если мы рассмотрим пять точек $\{a, b, c, d, e\}$ в R^3 , то существует три способа выполнить на них тетраэдрализацию: либо с двумя, тремя или четырьмя тетраэдрами, в зависимости от конфигурации в пространстве.

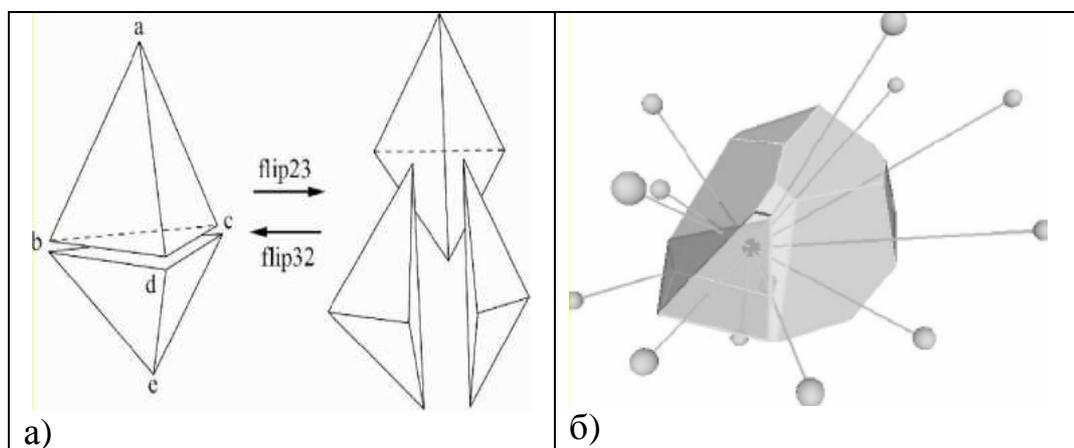


Рис.2. Смена двух плоскостей тетраэдров (а) при построении полиэдра Вороного (б) с линиями ребер триангуляции Делоне в 3D

После построения тетраэдров строится полиэдр Вороного путём соединения плоскостей, делящих ребра тетраэдров пополам и перпендикулярных этим ребрам. Полученные в результате пересечения плоскостей грани образуют полиэдр Вороного в 3D с одной из вершин тетраэдра Делоне внутри, как это показано на рис.2.б.

Программная реализация метода

Описанные в [2] процедуры построения 3D триангуляции и диаграммы Вороного реализованы в проекте создания ГИС с открытым исходным кодом Geoblock. Данная система разрабатывается в Интернет на сервере SourceForge: <http://sourceforge.net/projects/geoblock/>. Исходные коды программы, написанные на Borland Delphi и C++ Builder вместе с инсталляцией, выпускаемой под лицензией MPL для открытых проектов, находятся в репозитории CVS на сайте разработки.

Программа предназначена для решения широкого круга задач геологического моделирования, геометризации месторождений полезных ископаемых, подсчета запасов, планирования горных работ и моделирования физико-химических процессов на территориях земельных отводов эксплуатируемых месторождений с учетом российского и зарубежного опыта. Кроме того, в программу встроен механизм перевода интерфейса пользователя с английского на другие языки с использованием единого и легко расширяемого словаря терминов и диалоговых сообщений, что, при необходимости, делает возможным быструю локализацию программы. В текущей версии имеется три варианта интерфейса – английский, русский и испанский.

Диалог выбора опций построения 3D DT/VD показан на рис.3. Здесь изменение размерности задачи с двумерной (триангуляция и полигоны) на трехмерную (тетраэдрализация и полиэдры) задается выбором кнопок в верхнем ряду диалога.

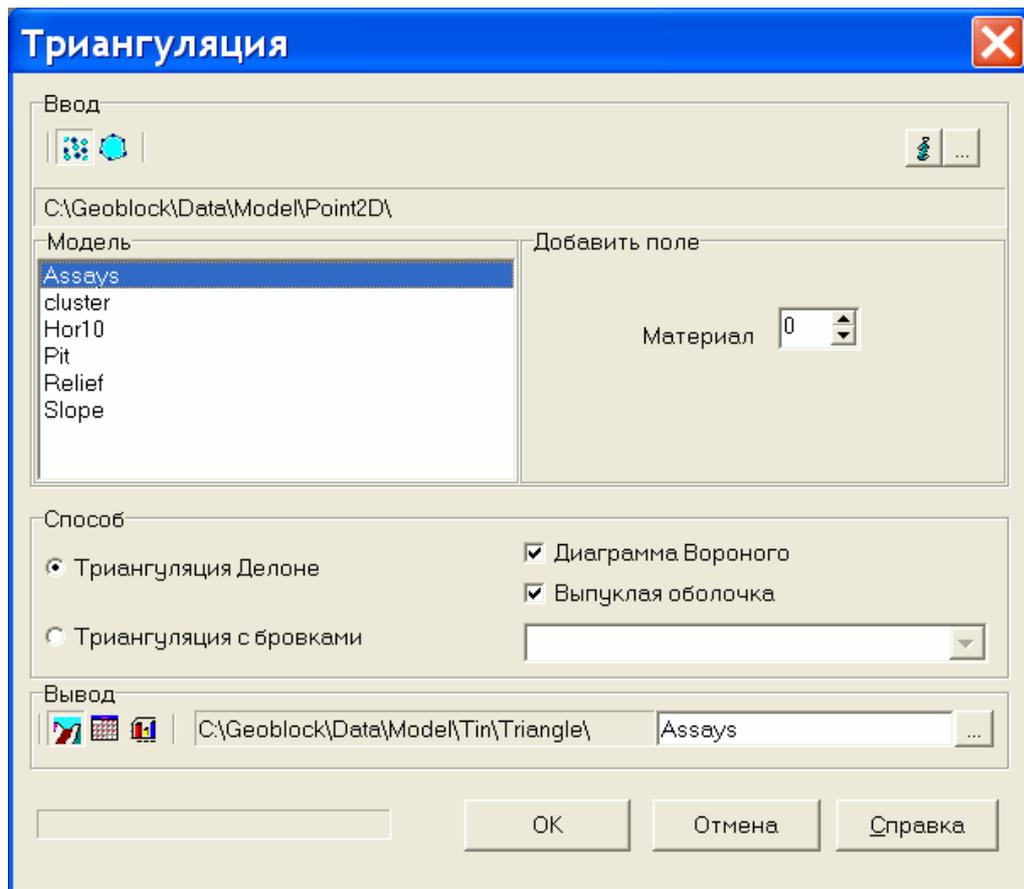


Рис.3. Диалог построения 2D или 3D DT/VD

Диалог выбора методов интерполяции представлен на рис.4. Переключение размерности с 2D на 3D и обратно осуществляется соответствующими кнопками выбора точек в верхней строке диалога интерполяции. При выборе метода естественных соседей и нажатии кнопки ОК для выбранного набора трехмерных рассеянных точек строится сеть тетраэдров Делоне и полиэдров Вороного, а затем выполняется интерполяция в узлах указанной в диалоге таблицы блочной модели методом естественных соседей (дискретным методом Сибсона) [3].

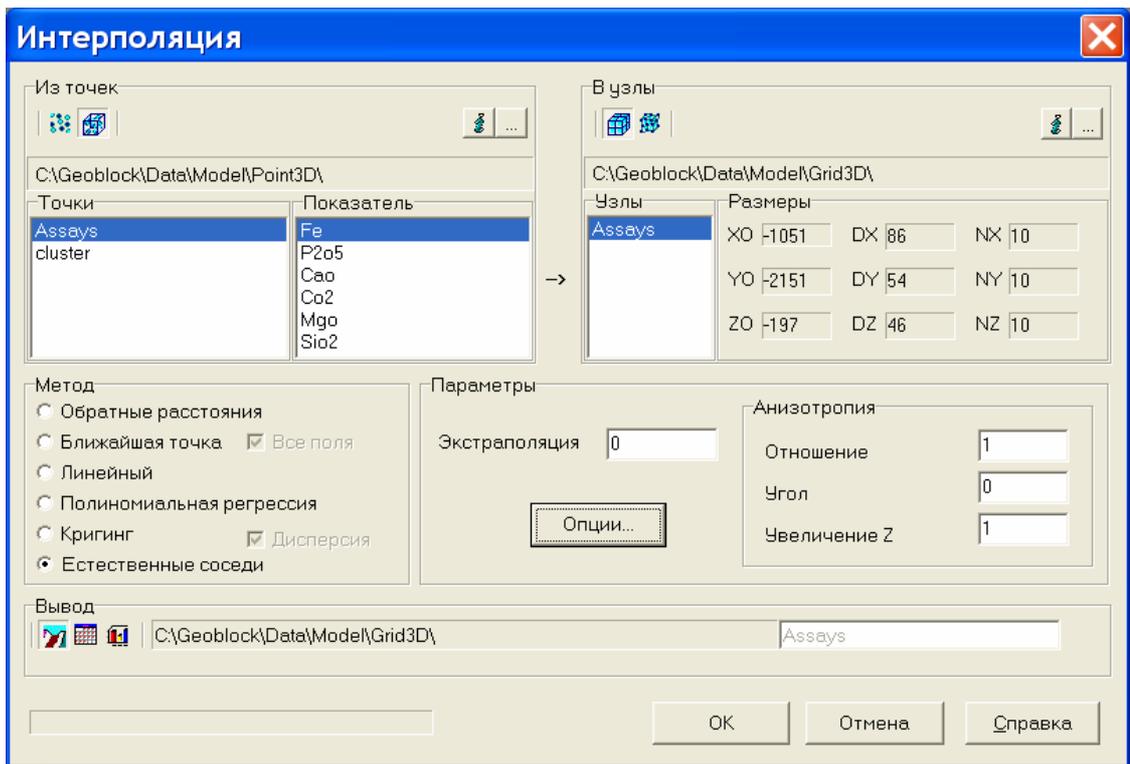


Рис. 4. Диалог выбора опций интерполяции по методу ближайших соседей в программе Geoblock

Из показанных в диалоге шести методов интерполяции в пяти использовании структурной диаграммы Вороного позволяет значительно (в 2 и более раз в зависимости от общего числа точек данных) ускорить поиск всех ближайших к узлу точек, дающих вклад в вычисление интерполяционного значения. В ранних вариантах 3D интерполяции использовался поиск влияющих точек с помощью суперблока. В программной модификации алгоритма для дискретного метода Сибсона узлы интерполяции вставляются в соответствии со схемой, проиллюстрированной по шагам на рис.5.

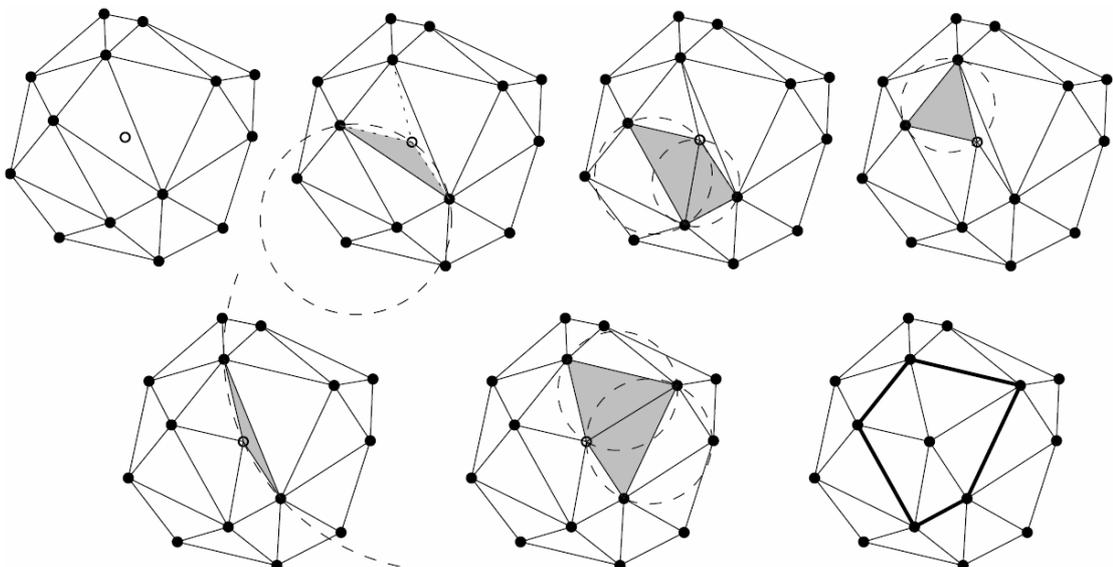


Рис.5. Последовательность вставки узла интерполяции в сеть тетраэдрализации

(слева направо и сверху вниз)

Затем осуществляется взвешивание временного полиэдра, соответствующего вставляемому в диаграмму узлу, для расчета интерполяционного значения. Цикл последовательно повторяется для всех узлов в трехмерной регулярной блочной или воксельной модели.

Иллюстрация сечений каркасной модели участка месторождения с рудными телами представлена на рис.6.

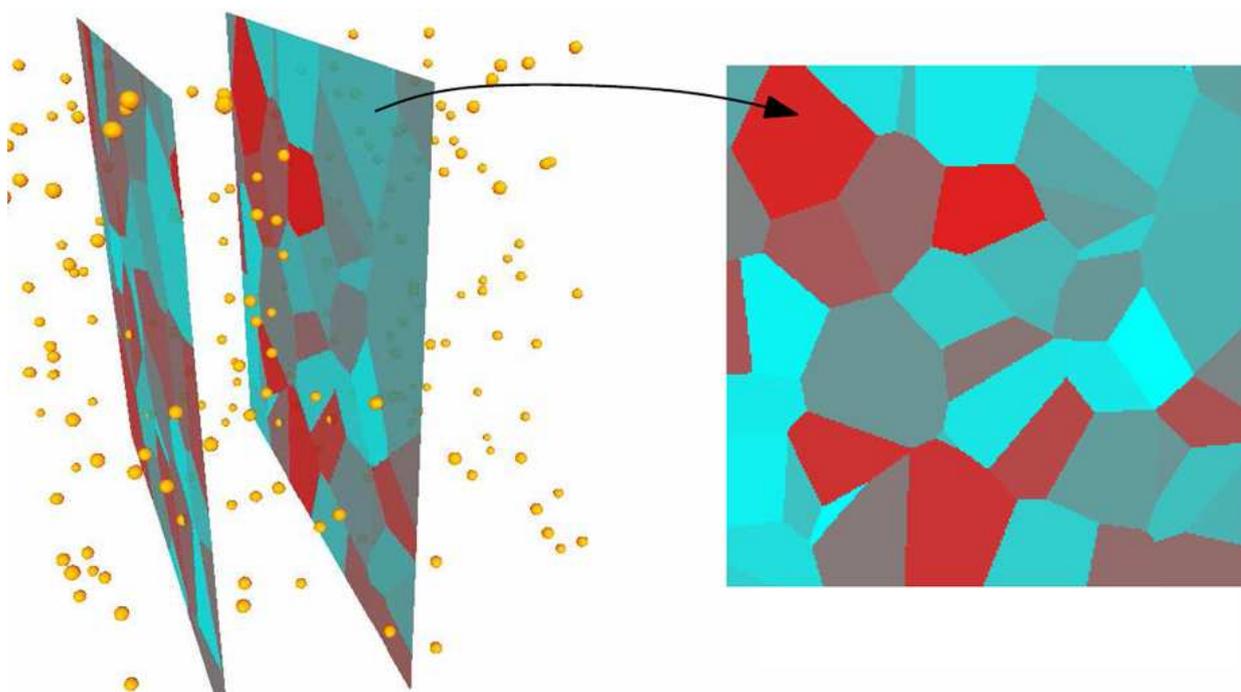


Рис.6. Сечения каркасной модели полиэдров Вороного

По интерполяционной блочной модели с помощью известного алгоритма *marching cubes* (Lorenzen and Cline, 1987) строятся изоповерхности уровней геопоказателей (аналогичные изолиниям в 2D пространстве). В работе [2] модификация алгоритма выполнена для сети тетраэдров Делоне.

На рис.7 представлена изоповерхность рудных тел участка железорудного месторождения, построенная по тетраэдрализации точек опробования скважин. В примере выбран уровень минимально промышленного содержания $C_{\text{Fe}} = 20\%$ для получения и визуализации оболочек тел.

В целом для решения задач недропользования и оценки промышленных запасов месторождений предложено

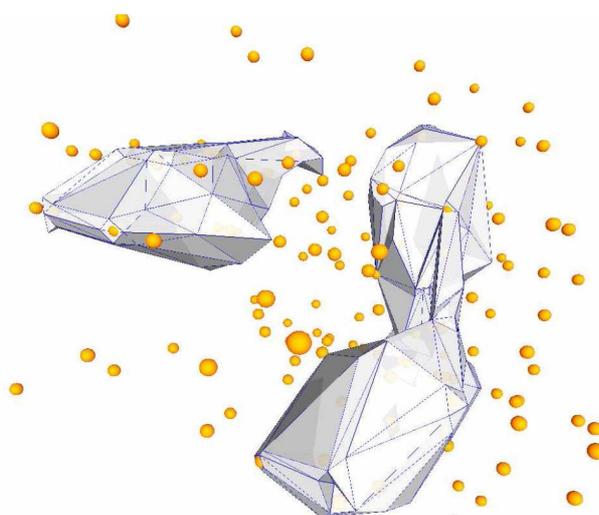


Рис.7. Изоповерхности двух рудных тел

использовать ГИС технологию каркасного моделирования с последующим преобразованием её в блочную модель в соответствии со следующей последовательностью шагов:

1. Тетраэдрализация точек геологического опробования и построение полиэдров диаграммы Вороного.
2. Введение в диаграмму Вороного литологических границ - точек поверхностей контакта типов и сортов руд (вставкой точек, рис.4) для построения ограниченной оболочками тел диаграммы.
3. Прогнозирование качества руды для каждого полиэдра опробования (ожидаемого выхода, качества и извлечения ценного компонента в концентрат) по совокупности данных о вещественном составе, физико-механических свойствах и структурно-текстурных характеристиках проб.
4. Построение геолого-технологической, минераграфической и металлургической моделей месторождения.
5. Создание стоимостной модели месторождения по данным текущих рыночных цен на извлекаемый из недр металл.
6. Определение оптимальной конфигурации раскроя карьерного поля и нахождение наилучшей последовательности этапов выемки запасов для планирования горных работ.
7. Визуализация моделей и изоповерхностей геопоказателей

Итоговая стоимостная модель месторождения, построенная в ГИС недропользования, используется для управления качеством минерального сырья и автоматизации технологии добычи и переработки запасов.

Заключение

Геологическое строение месторождения (рудные тела, однородные области минерализации с вредными примесями, участки с одинаковыми показателями раскрытия и извлечения ценного компонента) моделируются диаграммами полиэдров Вороного, построенной по сети тетраэдров Делоне. Изменяя масштабный фактор описанием с помощью 3D DT/VD может быть перекрыт весь диапазон размеров геологических объектов от нано- и микро- до макро- и мега- уровней: кристаллов, зерен минералов, агрегатов зерен, структур, текстур и геологических тел.

Построенные с помощью разработанной робастной процедуры 3D сетки DT/VD используются при интерполяции, в частности, в методе естественных (ближайших) соседей Сибсона для ускорения построения регулярных блочных моделей месторождений. Это дает возможность оценить эксплуатационную сложность месторождения путём стохастического покрытия его пространства масштабируемыми пробными блоками выемки, соответствующими объёму селективности горного оборудования.

Литература

1. Васильев П.В. Некоторые стохастические модели и алгоритмы квалиметрии запасов минерального сырья / П.В.Васильев // Научные ведомости. Белгородский Государственный Университет. Серия:

Информатика, Прикладная математика и Управление. –Белгород: Изд-во БелГУ, 2006. –Т1, №3, -С.45-53.

2. Ledoux, H. Computing the 3D Voronoi Diagram Robustly: An Easy Explanation. *Proceedings 4th International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering, IEEE Computer Society*. –2007. –pp.117-129.
3. Sung W. Park, Lars Linsen, Oliver Kreylos, John D. Owens, and Bernd Hamann Hamann. Discrete Sibson interpolation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 12 (2), –2006. –pp. 243-253.
4. Edelsbrunner, H. & Shah, N. R. Incremental topological flipping works for regular triangulations. *Algorithmica*, 1996, 15, p. 223-24.
5. Joe, B. Construction of three-dimensional Delaunay triangulations using local transformations. *Computer Aided Geometric Design*, 1991, 8, p. 123-142.