

В.Д. КАНТЕМИРОВ, А.М. ЯКОВЛЕВ, Р.С. ТИТОВ

## Геоинформационные технологии блочного моделирования для оценки качественных показателей полезных ископаемых в условиях переходных процессов горного производства

*Представлены результаты разработки методики оценки качественных показателей полезных ископаемых на основе технологий блочного моделирования с использованием современных горно-геологических информационных систем (ГИИС). Разработана блок-схема моделирования качественных показателей полезного ископаемого и приведены результаты ее практического применения на примере комплексных руд Серовского месторождения и каменного угля участка Одегельдей Ак-Тальского месторождения (Республика Тыва). Представленная методика блочного моделирования позволяет в экспресс-режиме с высокой достоверностью районировать в карьерном пространстве технологические типы и сорта руд, что упрощает решение задач проектирования, планирования и управления производством в условиях экономической неопределенности, ухудшающихся горно-геологических и горно-технологических условий разработки месторождений.*

*Ключевые слова:* горно-геологическая информационная система (ГИИС), качественные характеристики руд, блочное моделирование, геометризация, геологическая база данных.

**Geoinformation technologies of block modeling for assessing the quality indicators of minerals in the conditions of transient processes in mining.** V.D. KANTEMIROV, A.M. YAKOVLEV, R.S. TITOV (Institute of Mining, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg).

*The article presents the results of the development of a methodology for evaluating the quality indicators of minerals based on block modeling technologies using modern Geological and Mining Information Systems (GMIS). A block diagram of modeling the quality indicators of mineral resources has been developed and the results of its practical application at the following fields: Serov complex ores and coal of the Odegeldey section of the AK-Tal field (Republic of Tyva) are reported. The presented method of block modeling makes it possible to zone technological types and grades of ores in the quarry space with high reliability in express mode, which simplifies the solution of problems of design, planning and production management in the conditions of economic uncertainty, deteriorating mining-geological and mining-technological conditions of field development.*

*Key words:* Geological and Mining Information Systems (GMIS), quality characteristics of ores, block modeling, geometrization, geological database.

### Введение

При планировании разработки месторождений твердых полезных ископаемых (ПИ) с целью их рационального использования большое значение имеет комплексная

---

\*КАНТЕМИРОВ Валерий Данилович – кандидат технических наук, заведующий сектором управления качеством минерального сырья, ЯКОВЛЕВ Андрей Михайлович – старший научный сотрудник, ТИТОВ Роман Сергеевич – старший научный сотрудник (Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург). \*E-mail: ukrkant@mail.ru

оценка и геометризация в карьерном пространстве качественных характеристик ПИ, включая распределение содержания в рудном массиве основных и сопутствующих ценных компонентов и вредных примесей [1]. Для решения этих задач используются моделирование горно-геологических объектов и оценка запасов месторождений на основе распространенных в РФ программных продуктов (SURPAC, DATAMINE, MINEFRAME и др.). С их помощью создается геометрическая модель месторождения, которая служит основой для решения многих задач: подсчета запасов, проектирования предприятия, планирования горных работ, обоснования кондиций ПИ, нормирования потерь ПИ, комплексного использования недр, выбора технологического оборудования и др.

У истоков создания информационной базы горно-геометрических расчетов при планировании и проектировании горных работ стоит коллективный труд под редакцией проф. В.С. Хохрякова [5], на основе которого впоследствии сформулированы основные принципы геоинформационного метода моделирования горных предприятий [6–9]. В соответствии с этим методом горно-добывающее предприятие как объект моделирования представляет собой сложный природно-технологический комплекс, в котором на системном уровне взаимодействуют природные, технологические добывающие и перерабатывающие объекты, объекты инфраструктуры, объекты вспомогательного назначения, защитные и опасные зоны, объекты правовой защиты (горный и земельный отводы и др.). Главным системным свойством горно-добывающего предприятия является развитие во времени и пространстве всех его структурных составляющих.

В современных экономических условиях проектирование горных предприятий должно осуществляться в кратчайшие сроки и с сохранением при этом высокой точности и достоверности результатов, с глубокой, зачастую многовариантной проработкой проектных решений.

Наиболее трудоемкий этап построения модели месторождения – интерполяция неизвестных значений качественных показателей ПИ для достоверного анализа эффективности технологических решений в области управления рудопотоками и качеством сырья.

Для решения задач определения значений атрибутивных данных в произвольных точках в  $n$ -мерном пространстве моделируемого объекта применяются следующие основные методы:

- детерминистические (линейная интерполяция, методы обратных расстояний, триангуляции, радиально-базисных функций и т.п.);

- геостатистические, основанные на методах математической статистики и учитывающие пространственную корреляцию данных;

- методы нейронных сетей и самообучающихся алгоритмов.

Точность оценки качественных показателей ПИ зависит от заданного шага сгущения сети опробования. Чем гуще сеть и меньше расстояние между точками опробования, тем лучше можно проследить закономерность изменения качественных характеристик в пространстве. При увеличении количества наблюдений возрастает доля неслучайной изменчивости и уменьшается размах колебаний случайных величин. На оценку качественных показателей ПИ в недрах, получаемую геостатистическими методами, большое влияние оказывает анизотропия – различие в интенсивности размещения элементов геологической структуры по различным направлениям в недрах.

Основным этапом геостатистической оценки является анализ структуры месторождения на предмет установления закономерностей распределения оцениваемых качественных признаков ПИ по заданным пространственным направлениям его разработки (анизотропное или изотропное строение). В большинстве случаев анализ выполняют по трем главным направлениям анизотропии природных скоплений полезных ископаемых: истинная мощность, ширина и длина рудного тела.

Анализ литературных источников показывает, что при моделировании строения рудных тел полезных ископаемых можно использовать три типа анизотропии:

- трехосную анизотропию – вытянутые рудные тела пластообразной формы;

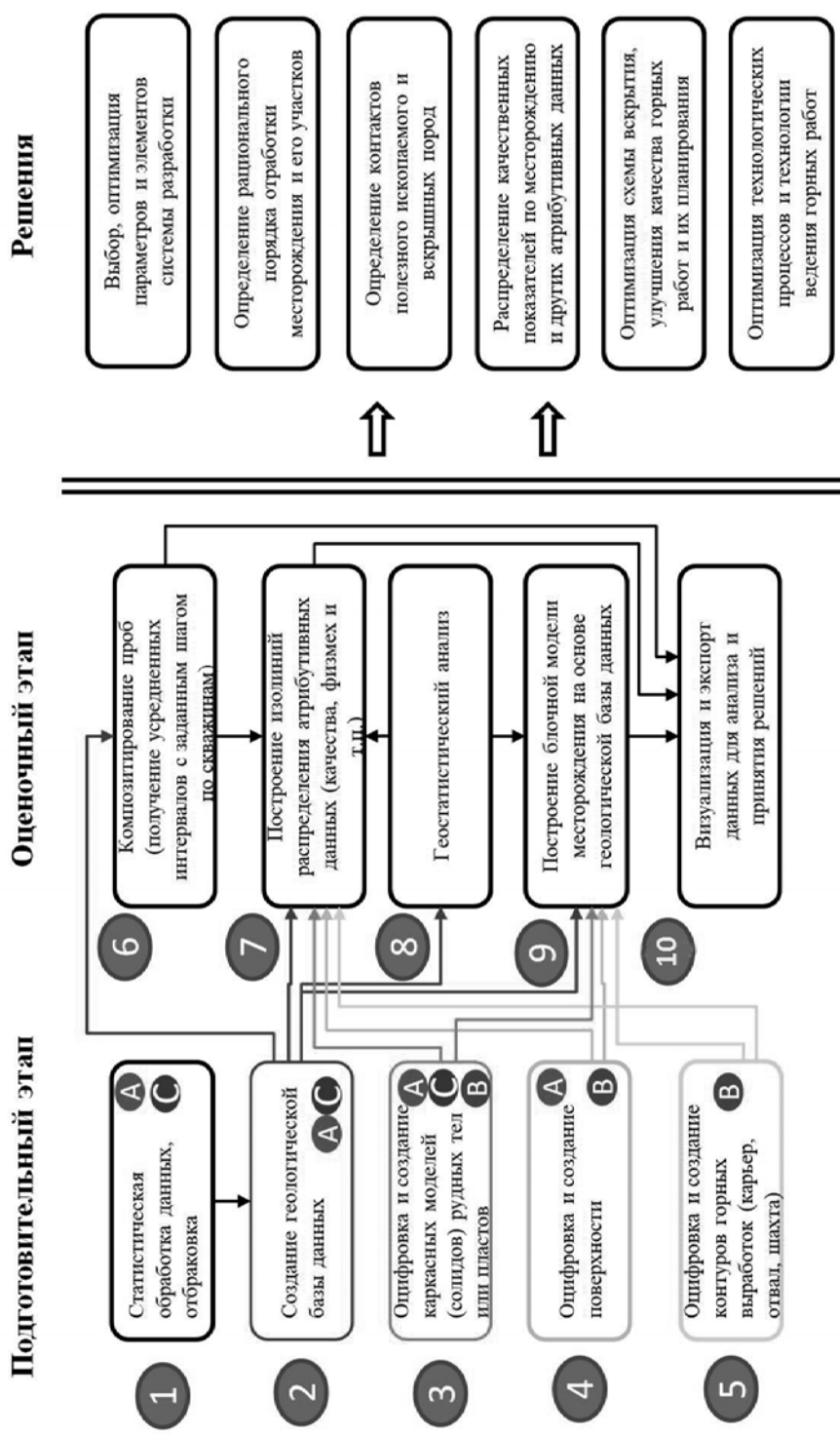


Рис. 1. Блок-схема методики моделирования качественных характеристик полезного ископаемого. Используемые исходные данные: А – данные детальной разведки (запасы, планы, контуры, интервал, колонки скважин, качество и др.), В – проскты, ГЭО и иные материалы (контуры выработок, рельеф, параметры системы разработки и др.), С – эксплуатационная разведка и оперативное опробование (детализация качества)

двухосную анизотропию – вытянутые и весьма вытянутые тела веретено- и трубообразных форм;

одноосную анизотропию – форма тела в целом изометричная, в котором выделяется только мощность рудного тела.

Для описания изменчивости качества и других параметров ПИ применяется математический аппарат, в котором определяются такие статистические характеристики, как коэффициент вариации, дисперсия, закономерности изменения свойств в пространстве, степень прерывистости – вариограмма, тренд, характеризующий изменчивость показателей. Вариограмма – это аналитическая модель пространственной корреляции, отражающая изменения значений в зависимости от расстояния между данными и трендом.

Целью исследований была разработка методики блочного моделирования, которая позволит создавать наиболее точную модель месторождения ПИ при минимальном числе исходных данных с получением практических решений в интересах горно-добывающих предприятий (рис. 1).

## Результаты и обсуждение

На начальном этапе формируется модель месторождения и создается геологическая база данных (позиции 1 и 2 на рис. 1), в которой хранятся данные разведки скважинных интервалов и результаты опробования керна. Геологические данные должны быть представлены в оцифрованном табличном виде унифицированного формата горно-геологической информационной системы (ГИС). В таблицах содержится следующая информация: название (номер) скважин, их координаты, высотная отметка устьев скважин, номер геологического профиля, данные интервального опробования по содержаниям ценных компонентов и вредных примесей, информация о глубинах скважин и данные инклинометрии (наклон и азимут).

Далее производится обработка исходных данных и их анализ, отсечка ураганных проб и ошибок заполнения таблиц с последующим импортом и созданием геологической базы данных средствами ГИС (пример геологической базы данных на плоскости представлен на рис. 2).

Геологическая база данных является основой для геостатистического анализа и построения моделей вероятностных распределений качественных показателей в пространстве на основе кригинга, метода обратных расстояний, радиально-базисных функций и других методов интер- и экстраполяции [1–3]. Она позволяет произвести первичную оценку месторождения для выработки стратегии его разработки с условием стабильного по качественным показателям

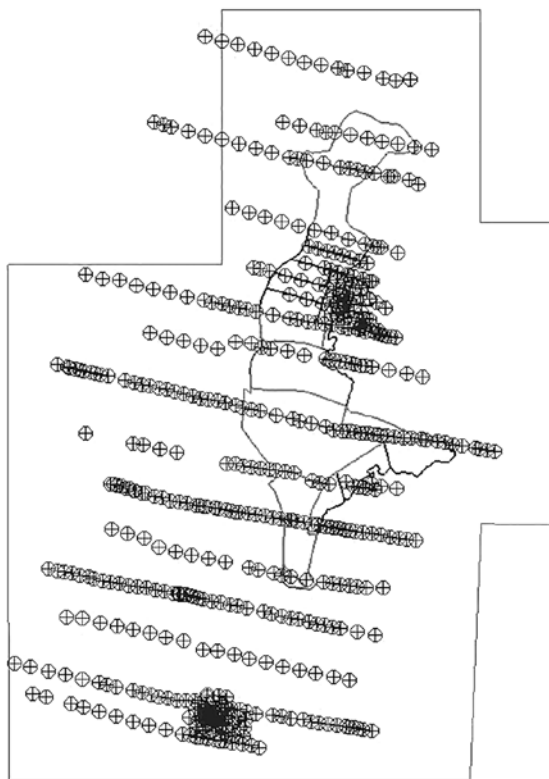


Рис. 2. План геологической базы данных в форме массива скважин на фоне блоков подсчета запасов Серовского месторождения комплексных руд

Таблица 1

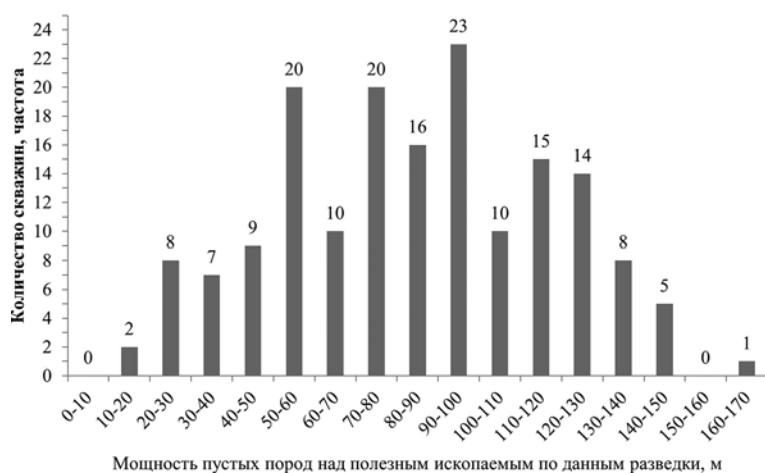
## Статистические показатели залегания руд Серовского месторождения комплексных руд

Элемент	Кол-во данных	Статистические показатели						
		Мин.	Макс.	Ср.	Станд. откл.	Размах	Медиана	К <sub>вар.</sub>
Мощность вскрыши	168	3	156	74,8	32,8	153	76,6	43,8
Мощность рудного тела	168	2	38,1	11,5	7,7	36,1	9,5	66,9

Таблица 2

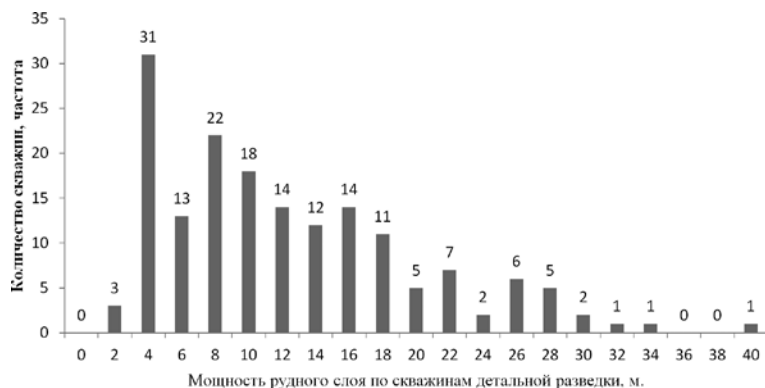
## Статистические показатели содержания полезных компонентов Серовского месторождения комплексных руд

Элемент	Кол-во данных	Статистические показатели						
		Мин.	Макс.	Ср.	Станд. откл.	Размах	Медиана	К <sub>вар.</sub>
Железо	2236	3,28	57,07	35,89	9,78	53,79	37,17	27,3
Никель	2236	0,01	2,2	0,20	0,15	2,19	0,16	75,7
Кобальт	2236	0,001	0,41	0,029	0,025	0,409	0,023	87,1
Хром	2236	0,01	7,456	1,68	0,74	7,446	1,64	44,3



Мощность пустых пород над полезным ископаемым по данным разведки, м

Рис. 3. Распределение мощностей пустых пород по данным разведки на Серовском месторождении комплексных руд



Мощность рудного слоя по скважинам детальной разведки, м.

Рис. 4. Распределение мощностей рудных интервалов по данным разведки на Серовском месторождении комплексных руд

рудопотока. Пример использования геологической базы данных для первичного анализа месторождения, выбора технологии обработки и схемы вскрытия приведен в табл. 1, 2 и на рис. 3 и 4 [1].

Следующий этап методики (см. пункт 3 рис. 1) – построение каркасных моделей рудных тел или угольных пластов на основании оцифрованных сечений с продольных и поперечных разрезов, погоризонтных планов, планов кровли и почвы пластов. Часто возникающей при моделировании задачей является создание сечений по разведочным профилям геологической базы данных при подсчете и переоценке запасов. Для решения такой задачи необходимо выделение в модели кондиционных интервалов с учетом содержаний полезных или вредных компонентов с распределением по высоте, т.е. композитирование. Сечения представляют собой замкнутые контуры, из которых методами триангуляции Делоне и полигонами Воронова–Тиссена формируется трехмерная модель ПИ, обладающая объемом и линейными характеристиками трехмерного тела [10, 14]. Каркасная модель ПИ – это также физическая граница, ограничивающая интер- и экстраполяцию при построении блочной модели (рис. 5). Ее предназначение – экспресс-оценка вариантов вскрытия, динамики развития рабочей зоны для месторождений с простыми горно-геологическими условиями и качественными показателями, характеризуемыми низкой дисперсией.

Цифровая топографическая модель (ЦТМ) поверхности и открытых горных выработок формируется на основе топографической маркшейдерской съемки объекта ведения горных работ, графических материалов детальной разведки, разработанных ТЭО и проектов освоения месторождения. ЦТМ представляет собой массив пространственных координат объектов местности, сопряженных в виде триангуляционных или сеточных моделей. Для их построения используются те же методы оценки пространственного распределения данных: геостатистики, обратного расстояния, радиально-базисных функций и др. [12, 13]. Предназначение топографических моделей – горно-геометрические расчеты, планирование горных работ и использование как базы для построения блочных моделей.

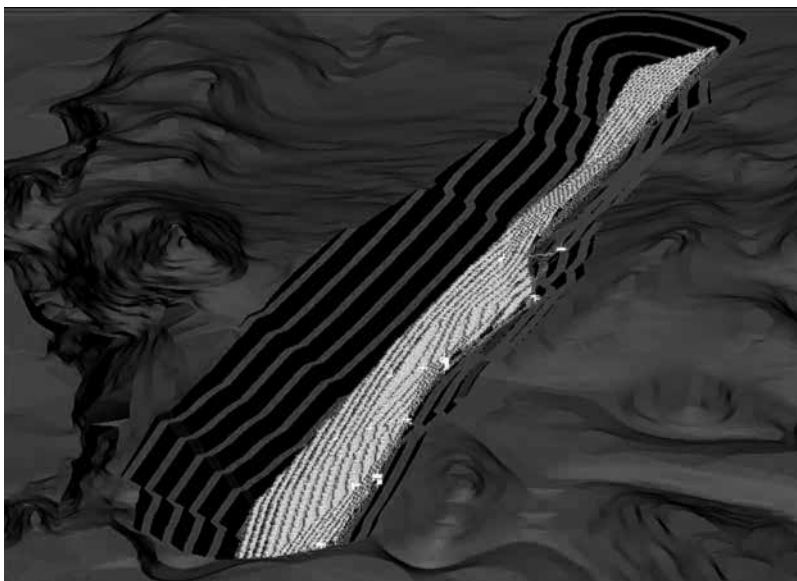


Рис. 5. Каркасная модель угольного пласта и цифровая топографическая модель рельефа в проектном контуре на конец обработки угольного разреза Одегельдей

На рис. 6 представлена карта изоощностей вскрышных пород в виде изолиний на Серовском месторождении комплексных руд, построенная на основе анализа геологической базы данных. Выделены перспективные с точки зрения рельефа и качества ПИ места проходки капитальных и заложения разрезных траншей.

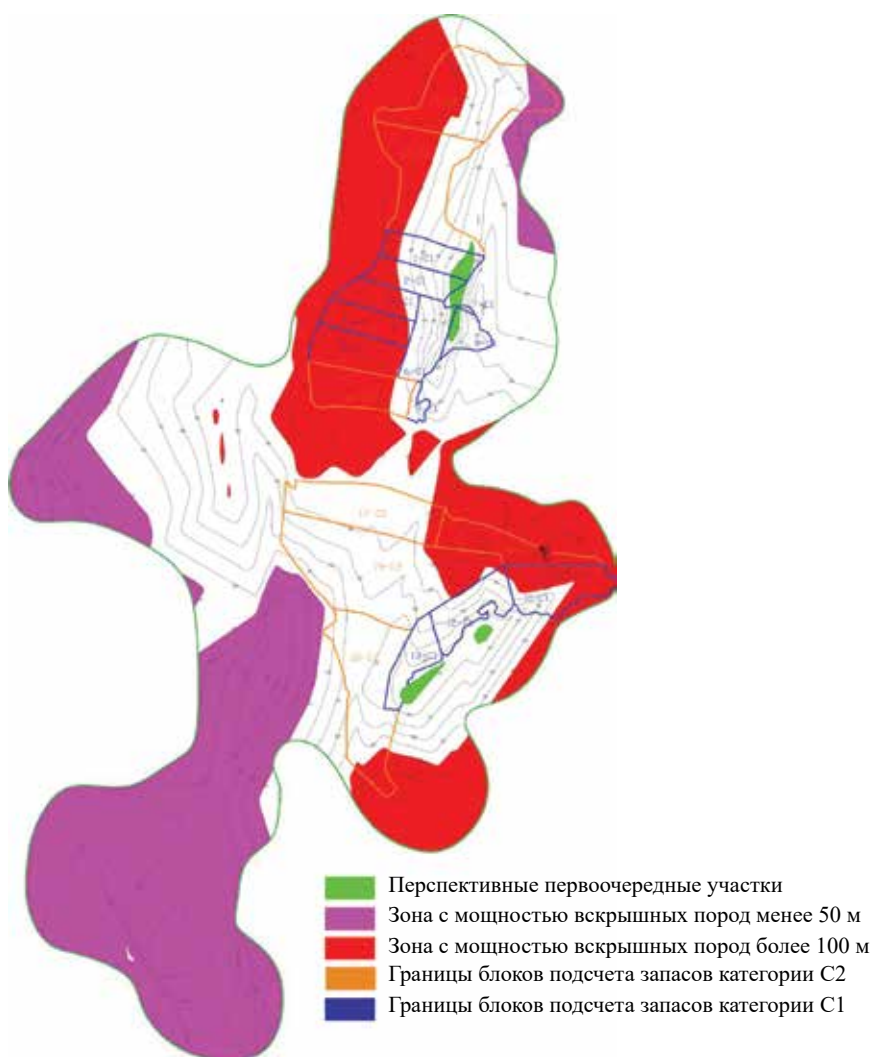


Рис. 6. Карта изо мощностей вскрышных пород Серовского месторождения комплексных руд в зоне прогноза с выделением перспективных (по качественным характеристикам и мощности вскрыши) участков первоочередной отработки (выделено зеленым цветом)

Анализ геологической базы данных необходим, так как позволяет определить тип распределения минерализации (нормальный, логнормальный и др.) и неоднородность массива данных, что может быть связано с несколькими генерациями минерализации полезного компонента. Полигенетические разнородные множества желательно обрабатывать и рассматривать раздельно. Если пробы исследованы на содержание нескольких компонентов или разными аналитическими методами, то необходимо выполнить для них корреляционный анализ с построением линии регрессии внутри программ 3-мерного моделирования или на базе другого пакета программ, имеющего функции статистической обработки данных. Корреляционный анализ позволяет предварительно выявить экстремальные значения проб, не укладывающиеся в общую линию регрессии, и отсеять их.

При анализе необходимо учесть декластеризацию данных, если геолого-разведочная сеть имеет нерегулярный порядок, что приводит к смещению оценки среднего. Это достигается разбиением данных на элементарные единицы пространства на основании среднего расстояния между скважинами, предельными координатами, при этом внутри них вычисляется вес проб в каждом узле сети [17].

Геостатистический анализ позволяет сделать выводы о степени неоднородности месторождений, обосновывается необходимость деления его на участки однородного строения. Анализ заключается в построении гистограмм, построении и заверке модели вариограмм в пространстве, оценке анизотропии, кластеризации данных. В зависимости от вида распределения качественных показателей ПИ в рудном массиве обосновывается выбор метода интерполяции данных (индикаторный кригинг, кригинг с внешним дрейфом или др.) [11, 12, 15–17].

Таким образом в результате геостатистического анализа выполняется основная задача по определению параметров и выбору алгоритма построения блочной модели месторождения.

Кроме алгоритма и параметров интерполяции данных, ограничивающих каркасные и цифровые топографические модели месторождения, необходимо определить размеры структурных единиц блоков.

Факторы, влияющие на размеры блоков модели:

плотность разведочной сети и горно-геологические условия разработки месторождения, конфигурация границ рудных тел;

пространственная изменчивость содержания полезных компонентов и параметров системы отработки месторождения;

размеры блоков модели и их соответствие параметрам выемочной единицы (на открытых горных работах высота блока модели принимается кратной высоте уступа в карьере).

При блочном моделировании качества ПИ следует учитывать следующее:

пространственную изменчивость качества ПИ выбором модели вариограммы;

размеры блока модели должны отражать анизотропию качественных показателей (генеральное направление изменчивости);

размер основных блоков (ячеек) модели не должен быть меньше половины среднего расстояния между пробами в анализируемом направлении;

при детализации блочной модели в случаях сложных рудных тел (тонкие линзы, выклинивание рудных тел на флангах, отсутствие четких контактов и т.п.) основные блоки блочной модели разделяются на подъячейки (субблоки).

При построении вариограмм необходимо учитывать следующие их основные параметры:

порог – величину дисперсии проб, при достижении которой рост вариограммы ограничивается;

зону влияния – максимальное расстояние между точками данных, между которыми существует корреляция;

эффект самородка – долю случайной составляющей вариации, которая не изменяется при сгущении сетки скважин.

Для достоверного интерполирования данных важно выбрать правильную модель (функцию) экспериментальной вариограммы. Наибольшее распространение на практике получили следующие виды функций вариограммы: сферическая, линейная, экспоненциальная, модель эффекта включений, модель эффекта самородков. Другим вариантом выбора модели вариограммы является построение аппроксимирующего полинома и оценка значимости выявленных закономерностей с помощью дисперсионного анализа.

На рис. 7 представлена реализованная в программных продуктах Geovia Surpac блочная модель планируемого угольного разреза Одегельдей (Республика Тыва). В результате проведенных исследований и моделирования участка месторождения каменного угля Одегельдей установлено следующее:

- 1) 66 % запасов участка характеризуется зольностью от 20 до 30 %;
- 2) 21 % запасов участка составляют высококачественные низкозольные угли с высокой теплотой сгорания;
- 3) 13 % запасов представлено углями с повышенной зольностью (30–35 %) (рис. 8).



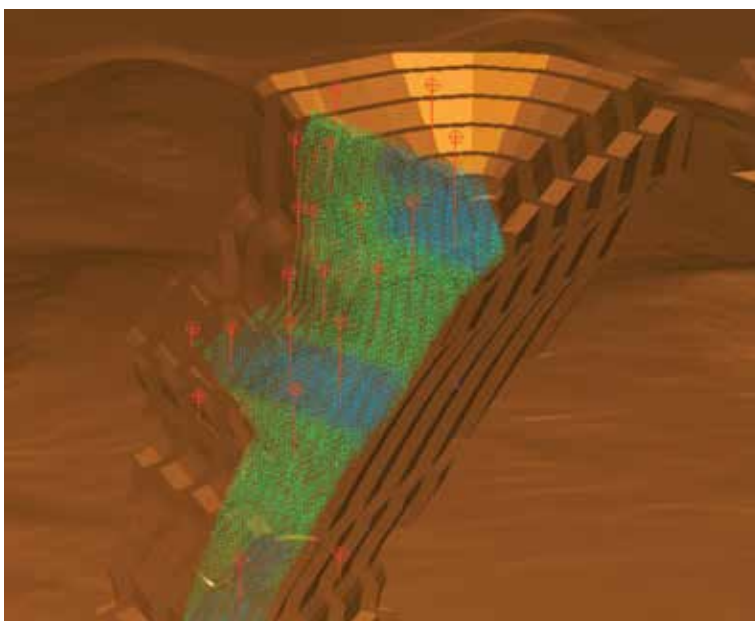


Рис. 7. Облако точек, характеризующее блочную модель с качественными характеристиками угля разреза Одегельдей (зольность, теплота сгорания, выход летучих веществ и др.).

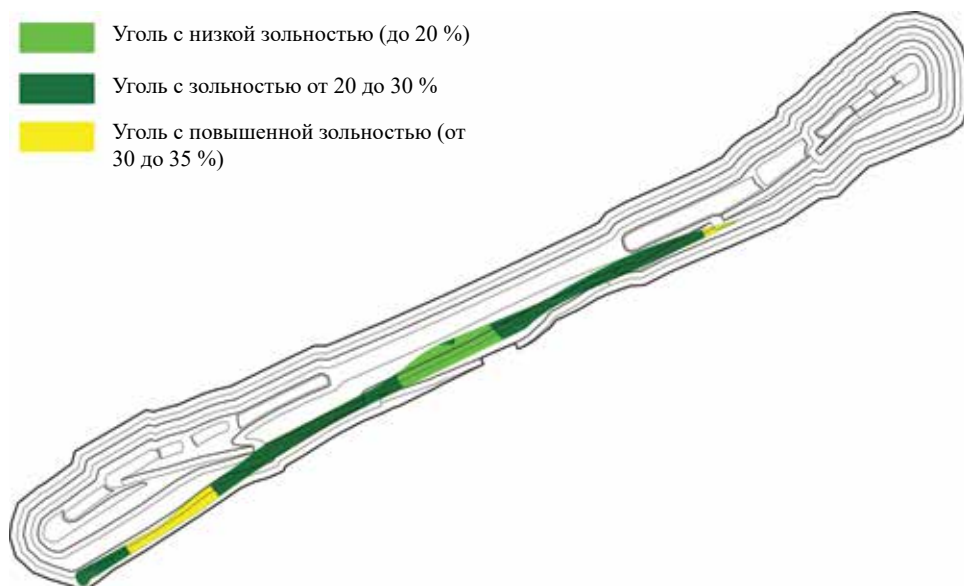


Рис. 8. План горизонта +1260 м разреза Одегельдей в конечном положении с указанием зон высокозольного и низкозольного угля

## Выводы

1. Разработана методика блочного моделирования качественных показателей ПИ в карьерном пространстве (в плане и по глубине). В основу методики заложены принципы создания блочной модели геологического объекта и интерпретации полученных данных программными средствами ГИС. Результаты блочного моделирования

позволяют в экспресс-режиме производить геометризацию качественных характеристик ПИ, способствуют выявлению сортовых закономерностей в недрах для последующего использования при планировании горных работ, а также при разработке более эффективных технологий рудоподготовки и управления качеством сырья на горном предприятии.

2. Этапы построения блочной модели месторождения состоят из следующих операций: преобразование подготовленных данных в нормализованную геологическую базу данных;

анализ особенностей моделируемого объекта и определения оптимальных условий для его моделирования;

обоснование и выбор метода пространственной интерполяции данных (метод обратных расстояний или др.);

композимирование данных по скважинам с заданным интервалом;

создание блочной модели.

3. Основные этапы создания блочной модели горно-геологического объекта (месторождения):

обоснование размеров блоков и их пространственного положения;

создание геометрической модели (при сложной конфигурации рудного тела рекомендуется уточнение ее каркаса на основе индикаторного кригинга);

интерполяция и экстраполяция данных на основании принятого в результате геостатистической оценки алгоритма;

заполнение блоков модели полученными в результате анализа геоданными.

4. В результате апробирования предложенной методики (см. рис. 1) построены блочные модели, разрезы и погоризонтные планы по группе месторождений (комплексных руд, каменного угля и др.), при этом для интерполяции геоданных использовались методы триангуляции Д. Шепарда, кригинг и радиально-базисный метод.

Результаты исследований на примере планируемых к разработке месторождений позволили установить:

рациональные места заложения разрезных траншей при проектировании вскрытия Серовского месторождения комплексных руд;

высокую изменчивость качественных показателей ПИ на Серовском месторождении и необходимость тщательного погоризонтного анализа распределений полезных компонентов при проектировании и отработке месторождения.

Предложенная методика моделирования позволила выбрать оптимальный порядок вскрытия, составить рациональный календарный план отработки разреза Одегельдей и построить карты зольности как основу для создания системы управления качеством на планируемом разрезе Одегельдей.

5. Подтверждена универсальность методики блочного моделирования качества ПИ, которая может быть использована на любом месторождении для решения конкретных горно-технических задач. Представленные результаты служат основой для разработки положений методики управления качеством минерального сырья и совершенствования планирования горных работ в режиме управления качеством.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геостатистика: теория и практика / Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. М.: Наука, 2010. 327 с.

2. Кантемиров В.Д., Титов Р.С., Яковлев А.М. Возможности компьютерного моделирования для решения вопросов управления качеством минерального сырья // Пробл. недропользования / ИГД УрО РАН. 2016. № 4. С. 170–176. – [trud.igduran.ru](http://trud.igduran.ru).

3. Кузнецов О.Л., Никитин А.А., Черемисина Е.Н. Геоинформатика и геоинформационные системы. М.: ВНИИГеосистем, 2005. 453 с.

4. Методические рекомендации по созданию информационного обеспечения САПР-карьеров. Редакция 1-82. М.: ИПКОН АН СССР, 1983. 58 с.

5. Хохряков В.С., Корнилков С.В., Сивков М.Н. и др. Геоинформационная плотность математических моделей горного предприятия // Изв. вузов. Горн. журн. 1990. № 9. С. 14–20.
6. Хохряков В.С. Геоинформационный метод математического моделирования // Физ.-техн. пробл. разработки полезных ископаемых. 1986. № 5. С. 89–94.
7. Хохряков В.С. Основы информационного обеспечения САПР горного производства // Изв. вузов. Горн. журн. 1986. № 4. С. 4–8.
8. Хохряков В.С. Развитие систем автоматизированного проектирования карьеров // Изв. вузов. Горн. журн. 1989. № 2. С. 25–27.
9. Яковлев В.Л. Исследование переходных процессов – новый методологический подход к разработке и развитию инновационных технологий добычи и рудоподготовки минерального сырья при освоении глубокозалегающих сложноструктурных месторождений // Пробл. недропользования / ИГД УрО РАН. 2017. № 2. С. 5–14. – trud.igduran.ru.
10. Ясковский П.П. Горно-геологические условия при оценке месторождений. М.: МГГА, 2001. 37 с.
11. Afeni T.B., Akeju V.O., Aladejare A.E. A comparative study of geometric and geostatistical methods for qualitative reserve estimation of limestone deposit // Geoscience Frontiers. 2020. Apr. DOI: 10.1016/j.gsf.2020.02.019.
12. Afzal P., Madani N., Shahbeik Sh., Yasrebi A.B. Multi-Gaussian kriging: a practice to enhance delineation of mineralized zones by Concentration–Volume fractal model in Dardevey iron ore deposit, SE Iran // J. Geochem. Exp. 2015. Vol. 158, Nov. P. 10–21.
13. Badel M., Angorani S., Panahi M.S. The application of median indicator kriging and neural network in modeling mixed population in an iron ore deposit // Computers and Geosciences. 2011. Vol. 37, iss. 4. P. 530–540.
14. Dell’Accio F., Di Tommaso F. On the hexagonal Shepard method // Appl. Num. Mathematics. 2020. Vol. 150. P. 51–64.
15. Marques D.M., Costa João Felipe C.L. Choosing a proper sampling interval for the ore feeding a processing plant: A geostatistical solution // Int. J. Miner. Proc. 2014. Vol. 131. P. 31–42.
16. Mery N., Emery X., Cáceres A., Ribeiro D., Cunha E. Geostatistical modeling of the geological uncertainty in an iron ore deposit // Ore Geol. Rev. 2017. Vol. 88. P. 336–351.
17. Mohammadpour M., Bahroudi A., Abedi M., Rahimpour G., Khalifani F.M. Geochemical distribution mapping by combining number-size multifractal model and multiple indicator kriging // J. Geochem. Exp. 2019. Vol. 200. P. 13–26.