

УДК 622.341:658.562.64:519.72  
DOI: 10.47148/1609-364X-2020-3-29-37

© В.Д. Кантемиров, А.М. Яковлев, Р.С. Титов

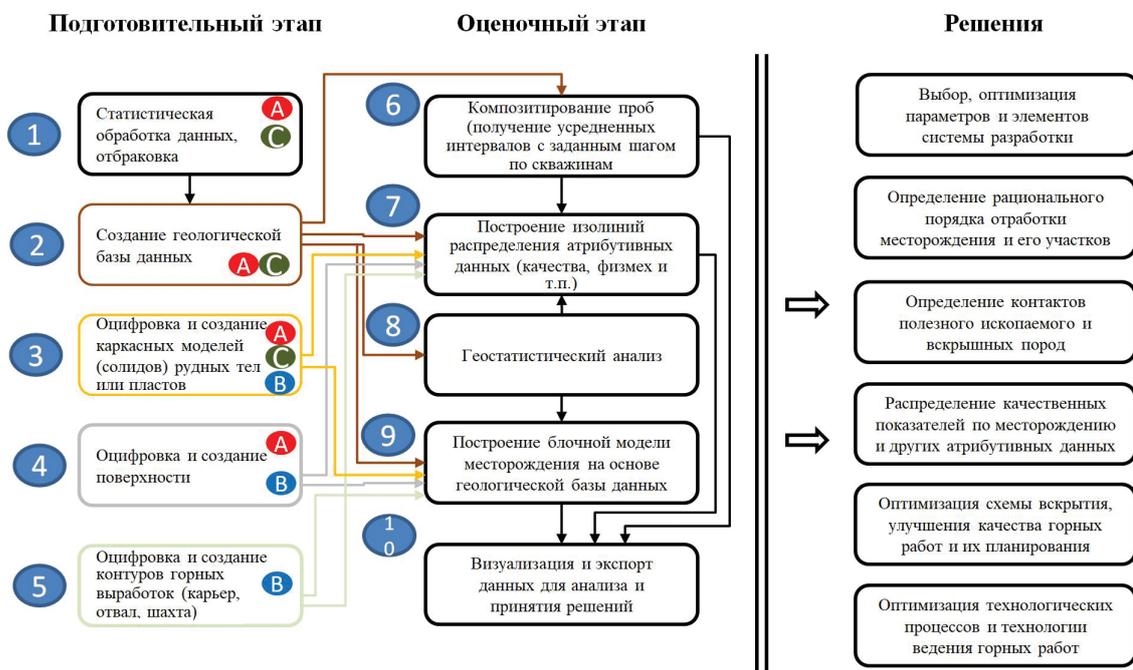
Моделирование геобъектов и геопроцессов

*В.Д. Кантемиров, А.М. Яковлев, Р.С. Титов*

# ОЦЕНКА КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ БЛОЧНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В современных условиях планирования разработки месторождений твердых полезных ископаемых (ПИ) большое значение для рационального использования недр приобретает комплексная оценка и геометризация в карьерном пространстве качественных характеристик ПИ, включая распределение содержания в рудном массиве ценных компонентов и вредных примесей [1]. Для решения

этих задач используется моделирование горно-геологических объектов и оценка запасов месторождений твердых ПИ на основе распространенных в РФ программных продуктов (SURPAC, DATAMINE, MINEFRAME и др.). При этом создается геометрическая модель месторождения, которая служит основой для решения многих задач: подсчет запасов, проектирование предприятия, планирование горных



Используемые исходные данные:

- A** Данные детальной разведки (запасы, планы, контуры, интервал, колонки скважин, качество и др.)
- B** Проекты, ТЭО и иные материалы (контуры выработок, рельеф, параметры системы разработки и др.)
- C** Эксплуатационная разведка и оперативное опробование (детализация качества)

Рис. 1. Блок-схема методики моделирования качественных характеристик полезного ископаемого

Fig. 1. Block diagram of the methodology for modeling the quality characteristics of a mineral

работ, обоснования кондиций ПИ, нормирование потерь ПИ, комплексное использование недр, выбор технологического оборудования и др. Основные задачи геометризации: создание наиболее точной модели месторождения ПИ при минимальном числе исходных данных (рис. 1).

Начальным этапом (позиции 1-2 на рис. 1) формирования модели месторождения является создание геологической базы данных, в которой хранятся данные разведки скважинных интервалов и результаты опробования керна. Они должны быть оцифрованы и приведены в табличный вид унифицированного формата горно-геологической информационной системы (ГГИС). В таблицах содержится следующая информация: название 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 данных инклинометрии (наклон и азимут).

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

Геологическая база данных является основой для геостатистического анализа и построения вероятностных распределений качественных показателей в пространстве на основе кригинга,

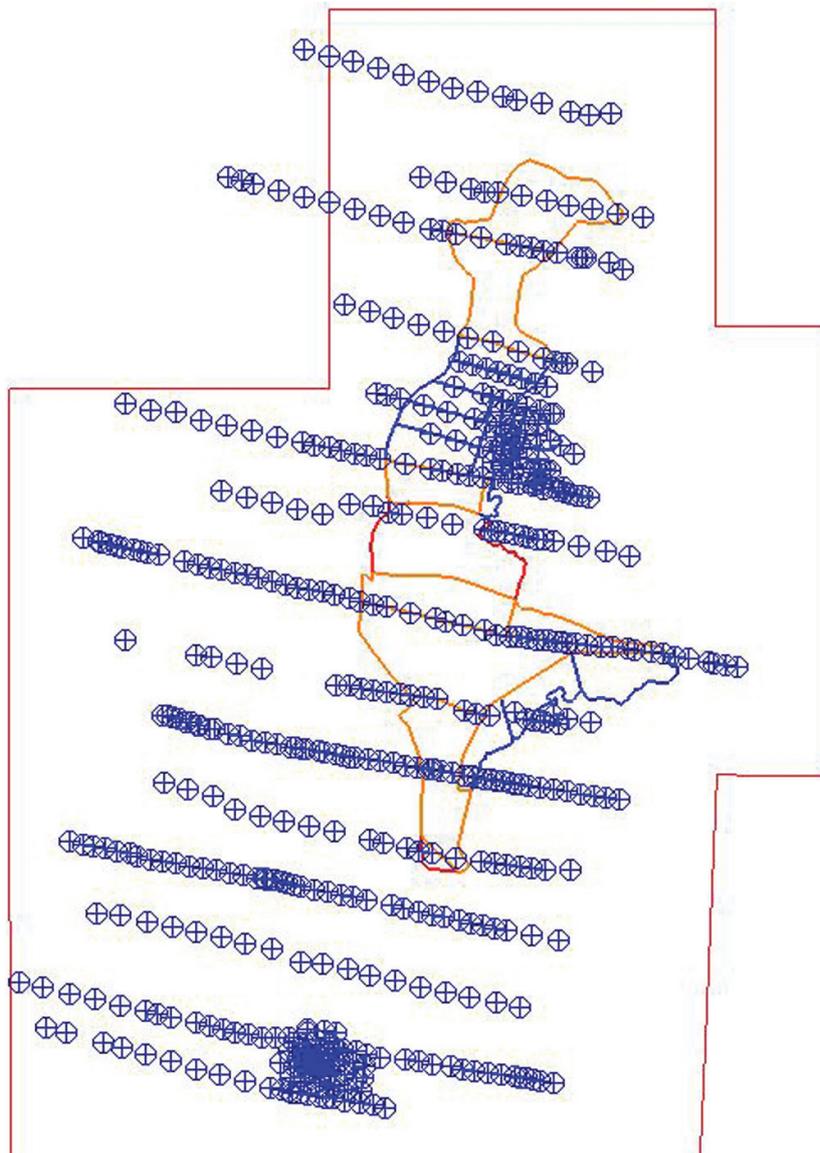


Рис. 2. План геологической базы данных – в форме массива скважин на фоне блоков подсчета запасов Серовского месторождения комплексных руд

*Fig. 2. Plan of the geological database – in the form of an array of wells against the background of blocks for calculating reserves of the Serov Deposit of complex ores*

метода обратных расстояний, радиально-базисных функций и других методов интер- и экстраполяции [2, 3]. Она позволяет произвести первичную оценку месторождения для выработки стратегии его разработки с условием стабильного по качественным показателям рудопотока.

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

Следующий этап (3, рис. 1) – это 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 возникающая задача – создание сечений по разведочным профилям геологической базы данных при подсчете и переоценке запасов. Для решения такой задачи необходимо выделение кондиционных интервалов с учетом содержаний полезных или вредных компонентов с распределением по высоте – т.е. композитирование.

Сечения представляют собой замкнутые контуры, из которых, как правило, методами триангуляции Делоне и полигонами Воронова-Тиссена формируется трехмерная модель полезного ископаемого, обладающая объемом и линейными характеристиками трехмерного тела [5, 6]. Каркасная модель полезного ископаемого это также физическая граница ограничивающая интер- и экстраполяцию при построении блочной модели (см. 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 из себя массив пространственных координат объектов местности, сопряженных

Таблица 1

**Статистические показатели залегания руд Серовского месторождения комплексных руд**

*Statistical indicators of ore occurrence in the Serov Deposit of complex ores*

Элемент	Кол-во данных	Мин.	Макс.	Сред.	Станд. откл.	Размах	Медиана	К <sub>вар</sub>
Мощность покрывающей рудное тело вскрыши	168,0	3,0	156,0	74,8	32,8	153,0	76,6	43,8
Мощность рудного тела	168,0	2,0	38,1	11,5	7,7	36,1	9,5	66,9

Таблица 2

**Статистические показатели содержания полезных компонентов Серовского месторождения комплексных руд**

*Statistical indicators of the content of useful components of the Serov Deposit of complex ores*

Элемент	Кол-во данных	Мин.	Макс.	Сред.	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

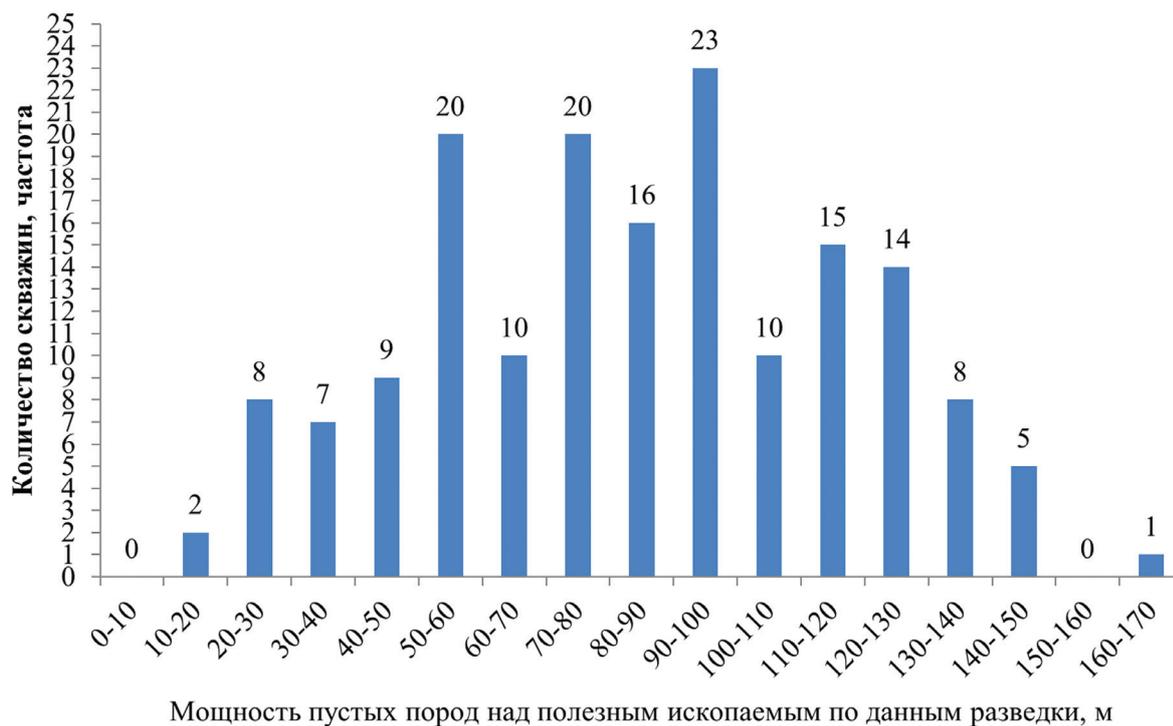


Рис. 3. Глубина подсечения разведочными скважинами полезного ископаемого на Серовском месторождении комплексных руд

Fig. 3. Depth of mineral cutting by exploration wells at the Serov complex ore Deposit

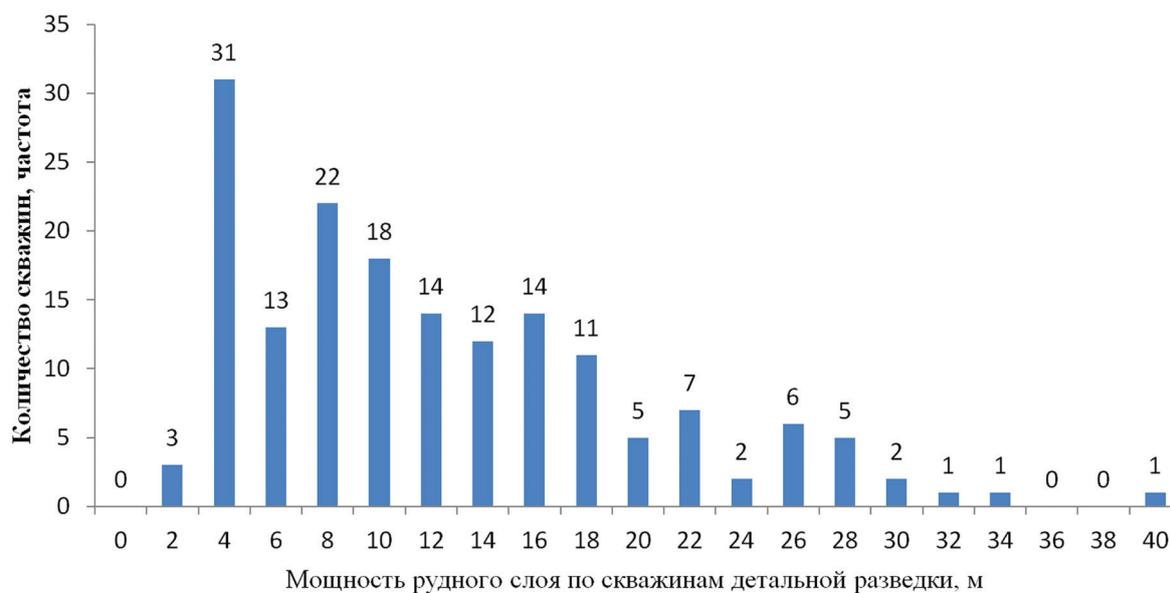


Рис. 4. Распределение мощностей рудных интервалов по данным разведки на Серовском месторождении комплексных руд

Fig. 4. distribution of ore interval capacities based on exploration data at the Serov complex ore Deposit

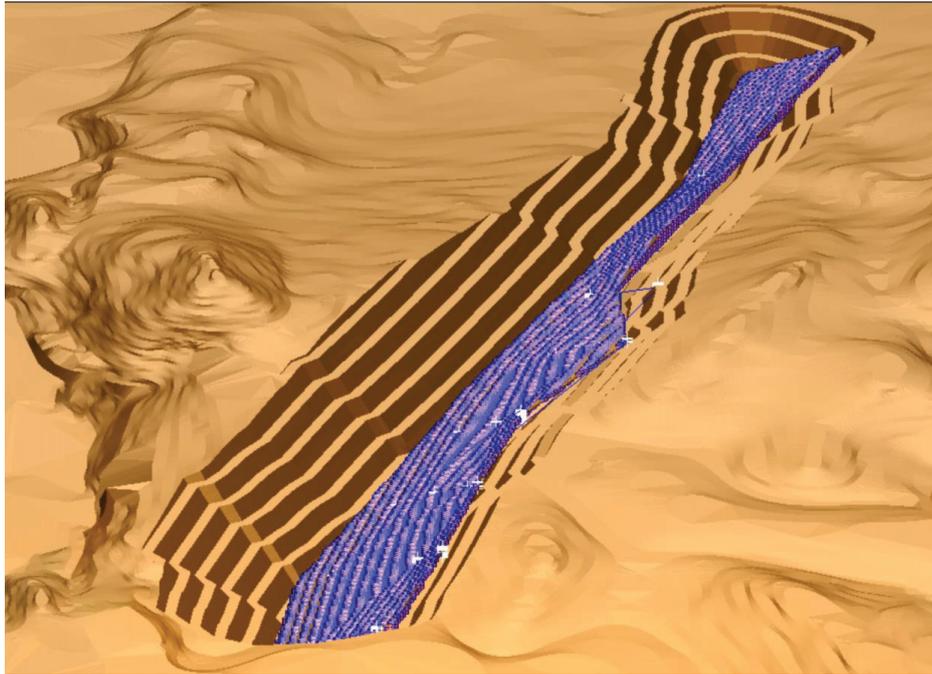


Рис. 5. Каркасная модель угольного пласта и цифровая топографическая модель рельефа с карьером в проектном контуре на конец отработки угольного разреза Одегельдей

*Fig. 5. Frame model of the coal seam and a digital topographic model of the terrain with a quarry in the project contour at the end of the Odegeldey coal mine*

в виде триангуляционных или сеточных моделей. Для их построения используются те же методы оценки пространственного распределения данных: геостатистики, обратного расстояния, радиально-базисных функций и другие [7-9]. Предназначение топографических моделей – горно-геометрические расчеты, планирование горных работ и как база для построения блочных моделей.

На рис. 6 представлена карта изо мощностей 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.

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 желателно 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 другом пакете программ, имеющих 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 геологоразведочная 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 [10].

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 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, с внешних дрейфом или др.) [11, 12].

Основная задача геостатистического анализа – определить параметры и алгоритм построения блочной модели месторождения.

Кроме алгоритма и параметров интерполяции данных, ограничивающих каркасные и цифровые топографические модели месторождения, важно

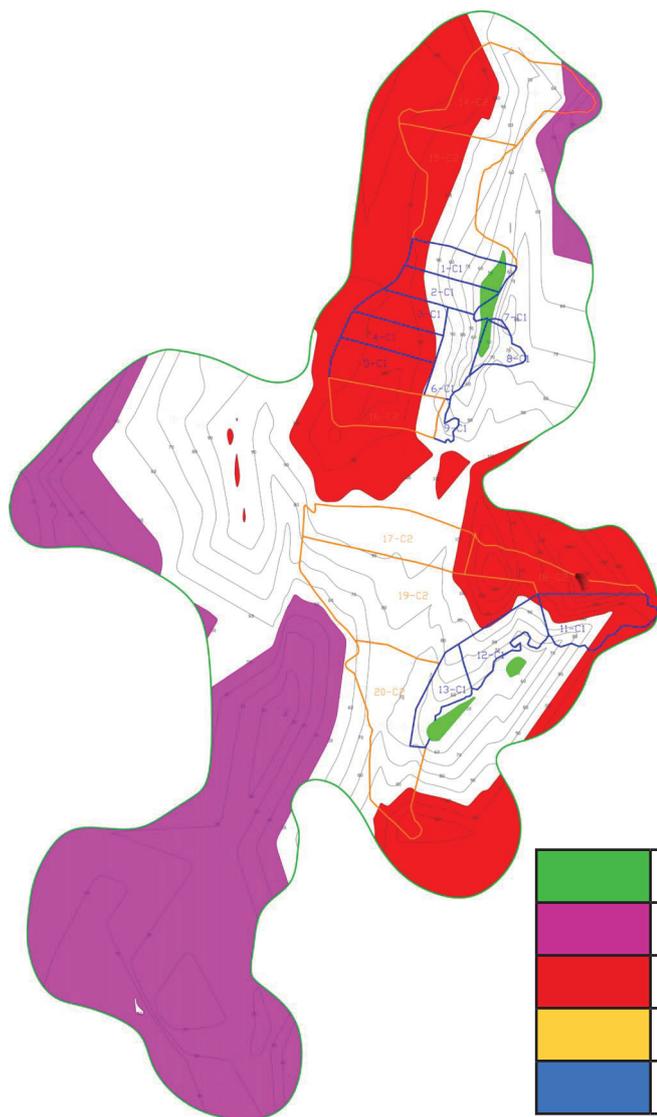


Рис. 6. Карта изомощностей вскрышных пород Серовского месторождения комплексных руд в зоне прогноза с выделением перспективных (по качественным характеристикам и мощности вскрыши) участков первоочередной отработки (выделено зеленым цветом)

Fig. 6. Map of the overburden capacity of the Serov Deposit of complex ores in the forecast zone with the allocation of promising (by quality characteristics and overburden capacity) areas of priority mining (highlighted in green)

	Перспективные первоочередные участки
	Зона с мощностью вскрышных пород менее 50 м
	Зона с мощностью вскрышных пород более 100 м
	Границы блоков подсчета запасов категории C2
	Границы блоков подсчета запасов категории C1

определился с размером структурных единиц модели – блоков.

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 полученными в результате анализа геоданными блоками модели.

Факторы, влияющие на размеры блоков модели:

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

- пространственная изменчивость содержаний 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:

- пространственная изменчивость качества ПИ в блочной модели должна учитывать модель 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).

Для разработки блочных моделей использовались встроенные в горно-геологические информационные системы (ГГИС) методы интерполяции, реализованные в программных продуктах (ПО Geovia Surpac, Mineframe и др.). На рис. 7 представлена блочная модель планируемого угольного разреза Одегельдей (Республика Тыва). В результате проведенных исследований и моделирования месторождения каменного угля (участка) Одегельдей было установлено, что 66% запасов характеризуется зольностью от 20 до 30%, 21% низкозольного угля с высокой теплотой сгорания и 13% угля с повышенной зольностью (до 35%) (см. рис. 8).

### Выводы

1. Разработана методика геометризации качественных показателей ПИ в карьере (в плане и по глубине). Основа методики заключается в создании блочной модели геологического объекта и интерпретации полученных данных программными средствами ГГИС. Результаты геометризации способствуют выявлению сортовых закономерностей в недрах, используемых в процессе планирования горных работ, а также при разработке более эффективной технологии рудоподготовки на горном предприятии.

2. Этап построения блочной модели состоит из следующих операций: преобразования подготовленных данных в нормализованную геологическую базу данных; анализ соответствующих особенностей моделируемого объекта и определения условий для его моделирования; обоснование и выбор соответствующего метода пространственной интерполяции данных (метод «обратных расстояний» или др.); композитирование данных по скважинам с заданным интервалом; создание блочной модели.

3. 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 Делоне 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 и составить рациональный календарный план отработки разреза Одегельдей;
- построить карты зольности как основу для создания системы управления качеством на планируемом разрезе Одегельдей.

4. Подтверждена универсальность методики блочного моделирования качества ПИ, она может быть использована на любом месторождении для решения конкретных горнотехнических задач. Представленные научные результаты служат основой для разработки положений методики управления качеством минерального сырья и совершенствованию планирования горных работ в режиме управления качеством.

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

### ЛИТЕРАТУРА

1. 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 [Электронный ресурс] // Проблемы недропользования : рецензируемое сетевое периодическое научное издание / ИГД УрО РАН. – 2017. – № 2. – С. 5-14. – URL: <https://igduran.ru/files/eshop/elibrary/2019-pereh-process.pdf> (дата обращения: 12.11.2019).
2. Кузнецов О.Л., Никитин А.А., Черемисина Е.Н. Геоинформатика и геоинформационные системы. – М. : ВНИИгеосистем, 2005. – 453 с.
3. Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геостатистика: теория и практика / под ред. Р.В. Арутюняна ; Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. – М. : Наука, 2010. – 327 с.
4. Кантемиров В.Д., Титов Р.С., Яковлев А.М. Возможности компьютерного моделирования для решения вопросов управления качеством минерального сырья [Электронный ресурс] // Проблемы недропользования : рецензируемое сетевое периодическое научное издание / ИГД УрО РАН. – 2016. – № 4. – С. 170-176. – URL: <https://trud.igduran.ru/edition/11/19> (дата обращения: 16.12.2019).

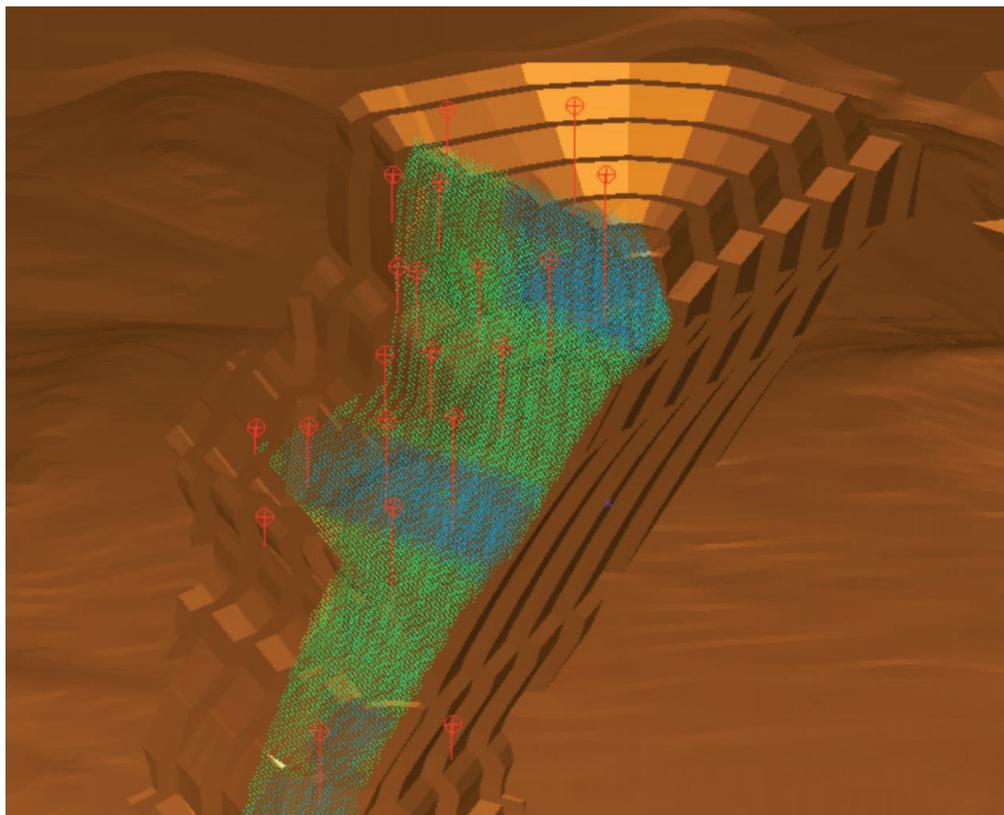


Рис. 7. Облако точек, характеризующее блочную модель с качественными характеристиками угля разреза Одегельдей (зольность, теплота сгорания, выход летучих веществ и т.п.)

*Fig. 7. Point cloud that characterizes a block model with qualitative characteristics of Odegeldey coal (ash content, heat of combustion, volatiles output, etc.)*

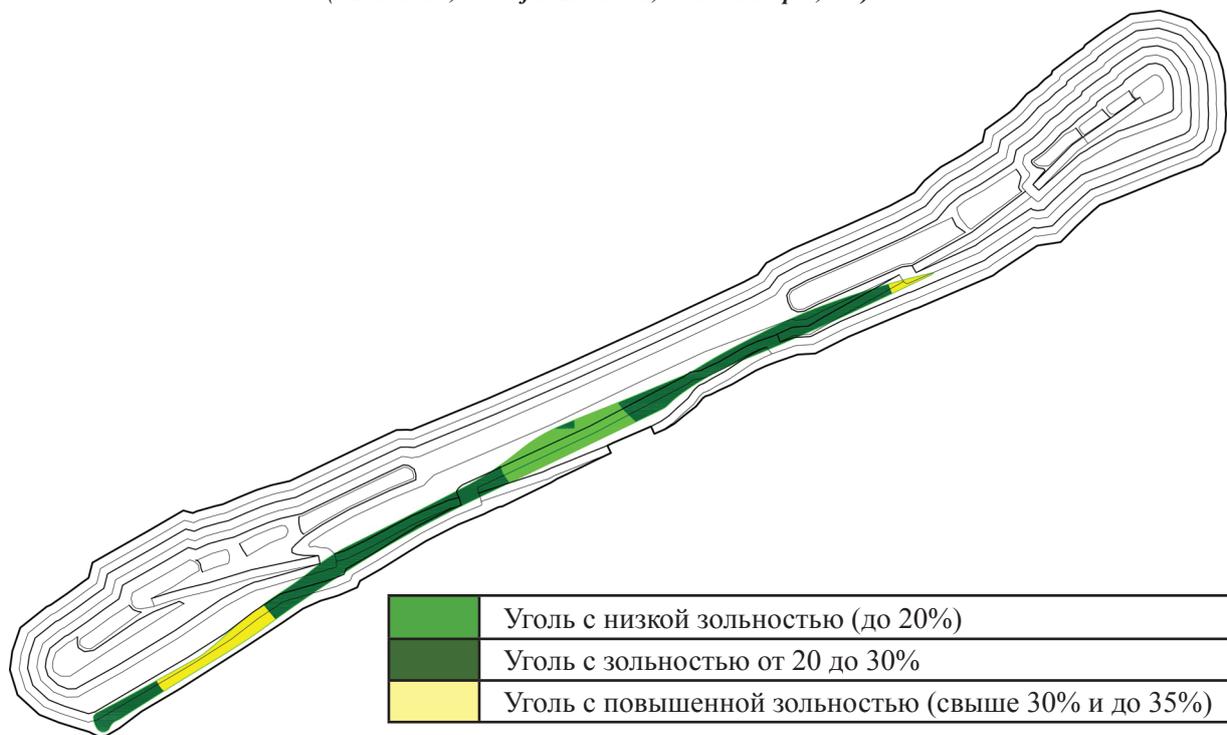


Рис. 8. План гор. +1260 м разреза Одегельдей в конечном положении с указанием зон высокозольного и низкозольного угля

*Fig. 8. Plan of the mountain +1260 m of the Odegeldey section in the final position with indication of zones of high-ash and low-ash coal*

5. Ясковский П.П. Горно-геологические условия при оценке месторождений. – М. : МГГА, 2001. – 37 с.
6. F. Dell'Accio, F. Di Tommaso. On the hexagonal Shepard method // *Applied Numerical Mathematics*. – 2020, April. – V. 150. – P. 51-64.
7. Badel M., Angorani S., Shariat Panahi M. The application of median indicator kriging and neural network in modeling mixed population in an iron ore deposit // *Computers & Geosciences*. – 2011, April. – V. 37, Issue 4. – P. 530-540.
8. Afzal P. Multi-Gaussian kriging: a practice to enhance delineation of mineralized zones by Concentration-Volume fractal model in Dardevey iron ore deposit, SE Iran / Peyman Afzal, Nasser Madani, Shahab Shahbeik, Amir Bijan Yasrebi // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2015. – V. 158. – P. 10-21.
9. Mohammadpour M. Geochemical distribution mapping by combining number-size multifractal model and multiple indicator kriging / Mahyadin Mohammadpour, Abbas Bahroudi, Maysam Abedi, Gholamreza Rahimpour, Golnaz Jozanikohan, Farzaneh Mami Khalifani // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2019, May. – V. 200. – P. 13-26.
10. 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*, in press, journal pre-proof, Available online, 8 April 2020. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.02.019> (date of access: 12.05.2020).
11. Marques D.M. Choosing a proper sampling interval for the ore feeding a processing plant: A geostatistical solution / Diego M. Marques, João Felipe C.L. Costa // *International Journal of Mineral Processing*. – 2014, September. – V. 131, 10. – P. 31-42.
12. Mery N. Geostatistical modeling of the geological uncertainty in an iron ore deposit / Nadia Mery, Xavier Emery, Alejandro Cáceres, Diniz Ribeiro, Evandro Cunha // *Ore Geology Reviews*. – 2017, August. – V. 88. – P. 336-351.
3. Demyanov V.V., Saveleva E.A. Geostatistics: theory and practice / Institute of problems of safe development of nuclear energy of the Russian Academy of Sciences. Moscow : Nauka, 2010. 327 p.
4. Kantemirov V.D., Titov R.S., Yakovlev A.M. Possibilities of computer modeling for solving issues of quality management of mineral raw materials [Electronic resource] // *Problems of subsoil use : peer-reviewed online periodical scientific publication / IGD Uro RAS*. 2016. No. 4. P. 170-176. URL: <https://trud.igduran.ru/edition/11/19> (date of access: 16.12.2019).
5. Yaskovsky P.P. Mining and geological conditions in the assessment of deposits. Moscow : MGGA, 2001. 37 p.
6. F. Dell'Accio, F. Di Tommaso. On the hexagonal Shepard method // *Applied Numerical Mathematics*. 2020, April. V. 150. P. 51-64.
7. Badel M., Angorani S., Shariat Panahi M. The application of median indicator kriging and neural network in modeling mixed population in an iron ore deposit // *Computers & Geosciences*. 2011, April. V. 37, Issue 4. P. 530-540.
8. Afzal P. Multi-Gaussian kriging: a practice to enhance delineation of mineralized zones by Concentration-Volume fractal model in Dardevey iron ore deposit, SE Iran / Peyman Afzal, Nasser Madani, Shahab Shahbeik, Amir Bijan Yasrebi // *Journal of Geochemical Exploration*. 2015. V. 158. P. 10-21.
9. Mohammadpour M. Geochemical distribution mapping by combining number-size multifractal model and multiple indicator kriging / Mahyadin Mohammadpour, Abbas Bahroudi, Maysam Abedi, Gholamreza Rahimpour, Golnaz Jozanikohan, Farzaneh Mami Khalifani // *Journal of Geochemical Exploration*. 2019, May. V. 200. – P. 13-26.
10. 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*, in press, journal pre-proof, Available online, 8 April 2020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.02.019> (date of access: 12.05.2020).
11. Marques D.M. Choosing a proper sampling interval for the ore feeding a processing plant: A geostatistical solution / Diego M. Marques, João Felipe C.L. Costa // *International Journal of Mineral Processing*. 2014, September. V. 131, 10. P. 31-42.
12. Mery N. Geostatistical modeling of the geological uncertainty in an iron ore deposit / Nadia Mery, Xavier Emery, Alejandro Cáceres, Diniz Ribeiro, Evandro Cunha // *Ore Geology Reviews*. 2017, August. V. 88. P. 336-351.

#### REFERENCES