

УДК [622.34:519.256]:519.72

**Корнилков Сергей Викторович**  
доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075 г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: [kornilkov@igduran.ru](mailto:kornilkov@igduran.ru)

**Яковлев Андрей Михайлович**  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
лаборатория управления качеством мине-  
рального сырья,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [krissey-puh@yandex.ru](mailto:krissey-puh@yandex.ru)

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОГНОЗА КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ В КАРЬЕРЕ НА ОСНОВЕ БЛОЧНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ\*

#### Аннотация:

В статье приведены результаты разработки методики оценки качественных показателей полезных ископаемых на основе технологий блочного моделирования с использованием современных горно-геологических информационных систем (ГГИС). Предложена блок-схема моделирования качественных показателей полезного ископаемого и приведены результаты ее использования на примере Серовского месторождения комплексных руд и месторождения каменного угля Одегельдей, Республика Тыва. Представленная методика блочного моделирования позволяет с высокой достоверностью районировать в карьерном пространстве технологические типы и сорта руд, что способствует решению 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, ГГИС, качественные характеристики руд, блочное моделирование, геометризация, геологическая база данных.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.03.047

**Kornilkov Sergei V.**  
Doctor of Engineering Sciences,  
Chief Researcher,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
620075 Ekaterinburg,  
58 Mamina-Sibiryaka Str.  
e-mail: [kornilkov@igduran.ru](mailto:kornilkov@igduran.ru)

**Yakovlev Andrei M.**  
Candidate of Technical Sciences,  
Senior Researcher,  
Laboratory of Quality management,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [krissey-puh@yandex.ru](mailto:krissey-puh@yandex.ru)

### IMPROVING THE PRGNOSIS FOR QUALITATIVE INDICATORS OF ROW MINERAL IN THE QUARRY BASED ON BLOCK MODELLING

#### Abstract.

The article presents the results of methodology development for assessing the quality indicators of minerals based on block modeling technologies using modern mining and geological information systems (GGIS). A flowchart for modeling the qualitative indicators of a mineral is proposed and the results of its use are given on the example of the Serovskoye complex ores deposit and the Odegeldey coal deposit, the Republic of Tyva. The presented method of block modeling makes it possible to zone technological types and grades of ores with high reliability in the quarry space, which contributes to solving the problems of design, planning and production management in conditions of economic uncertainty, deteriorating mining-geological and mining-technological conditions for the development of deposits.

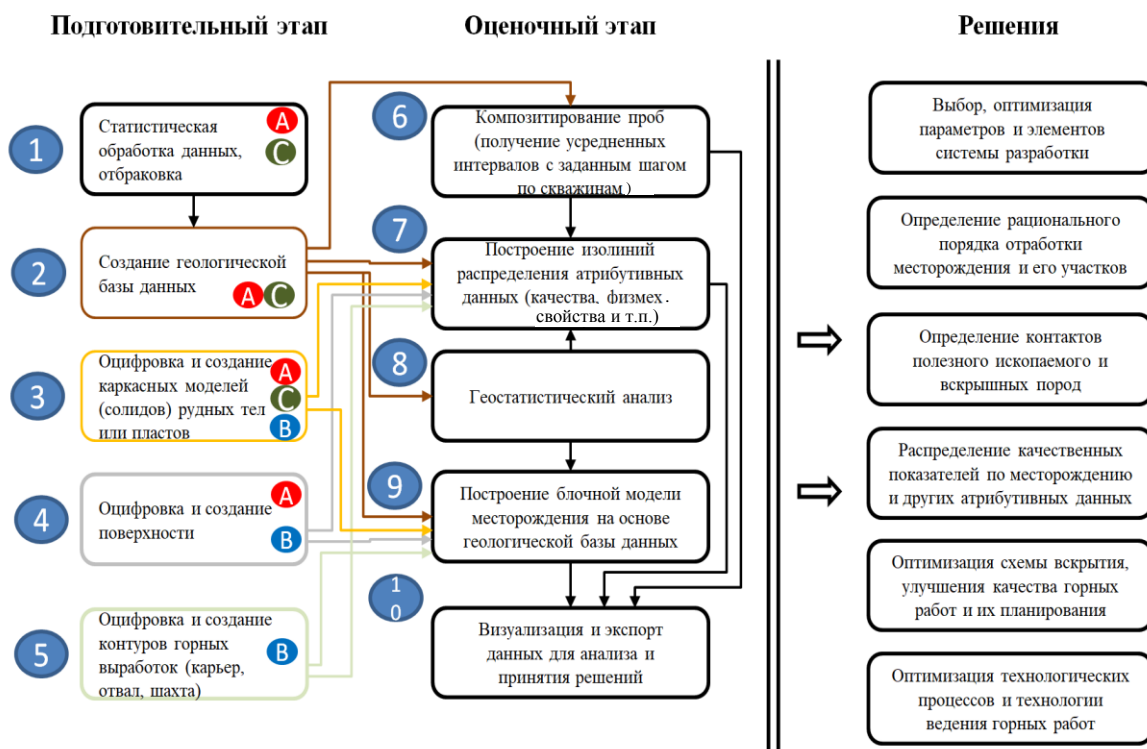
*Key words:* mining and geological information system, GGIS, qualitative characteristics of ores, block modeling, geometrization, geological database.

#### Введение

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

\* Тема 1. Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем (FUWE-2022-0005), рег. №1021062010531-8-1.5.1.

характеристик ПИ, включая распределение содержания в рудном массиве ценных компонентов и вредных примесей [1, 2]. 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: подсчета запасов, проектирования предприятия, планирования горных работ, обоснования кондиций ПИ, нормирования потерь ПИ, комплексного использования недр, выбора технологического оборудования и др. Основные задачи геометризации: создание наиболее точной модели месторождения ПИ при минимальном числе исходных данных (рис. 1).



Используемые исходные данные:

- A** Данные детальной разведки (запасы, планы, контуры, интервал. колонки скважин, качество и др.).
- B** Проекты, технико-экономическое обоснование (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

### Материалы исследований

Начальным этапом (на рис. 1 позиции 1-2) 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 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).

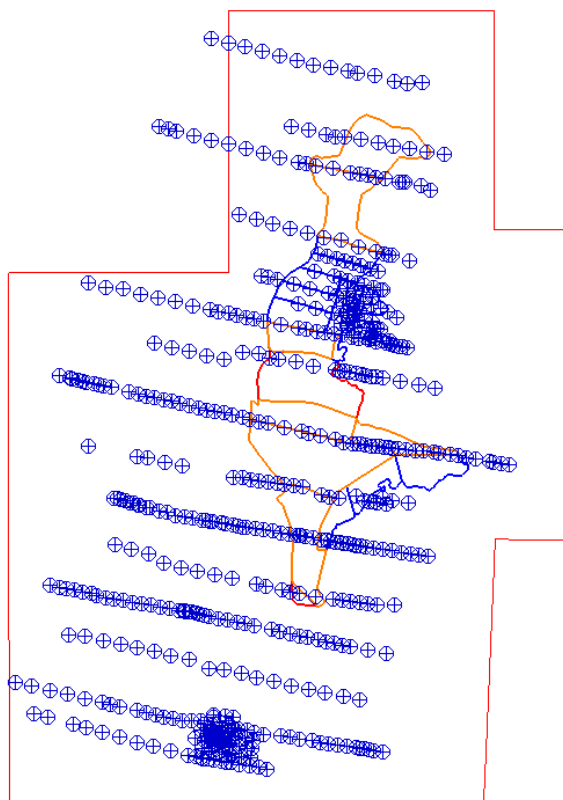


Рис. 2. План геологической базы данных в форме массива скважин на фоне блоков подсчета запасов Серовского месторождения комплексных руд

Геологическая база данных является основой для геостатистического анализа и построения вероятностных распределений качественных показателей в пространстве на основе кригинга, метода обратных расстояний, радиально-базисных функций и других методов интер- и экстраполяции [3 – 4]. 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. 2 – 4 [5].

Следующий этап 3 (см. 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.

Таблица 1

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

Элемент	Кол-во данных	min	max	Сред.	$\sigma$	R	Медиана	Квар
Мощность покрывающей рудное тело 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	min	max	Сред.	$\sigma$	R	Медиана	Квар
Железо	2236	3,28	57,07	35,9	9,78	53,8	37,2	27,3
Никель	2236	0,01	2,2	0,2	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	7,46	1,68	0,74	7,446	1,64	44,3

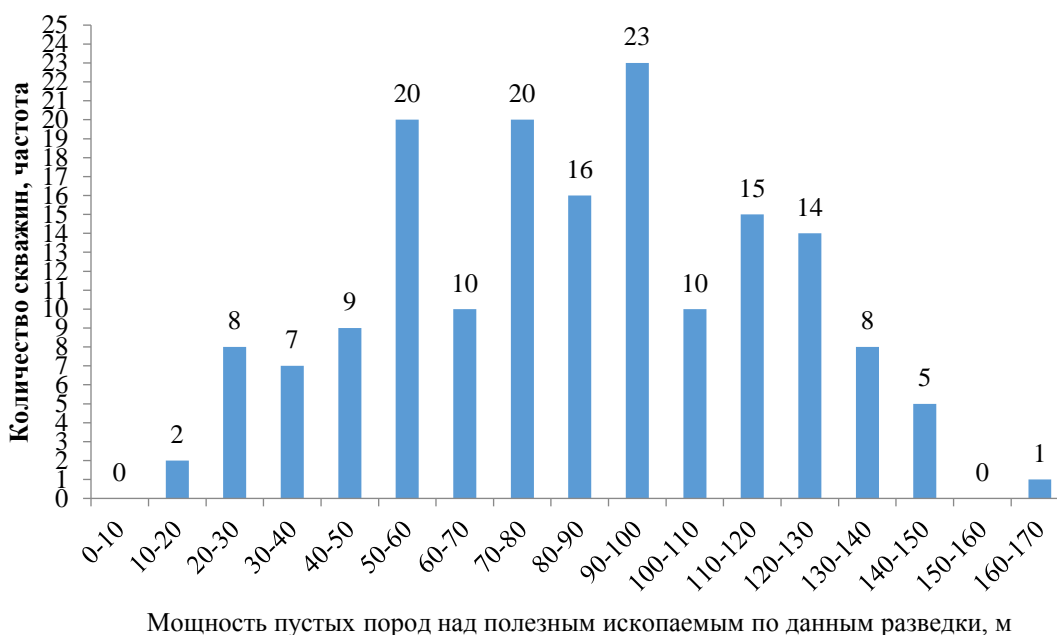


Рис. 3. Глубина подсечения разведочными скважинами полезного ископаемого на Серовском месторождении комплексных руд



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

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 [6 – 7]. 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.

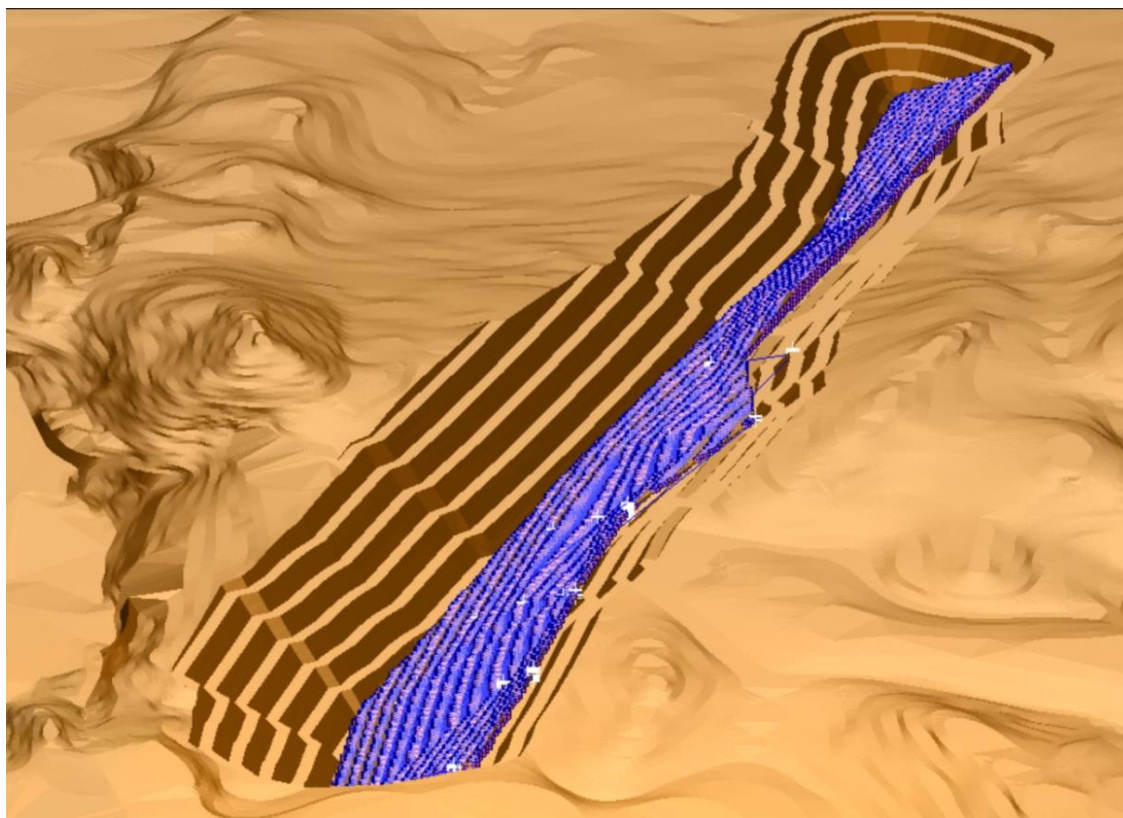


Рис. 5. Каркасная модель угольного пласта и цифровая топографическая модель рельефа с карьером в проектном контуре на конец отработки угольного разреза Одегельдей

#### *Результаты исследований*

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 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 [8 – 10].

Предназначение топографических моделей – горно-геометрические расчеты, планирование горных работ и использование в качестве базы для построения блочных моделей. На рис. 6 представлена карта изомощностей 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.



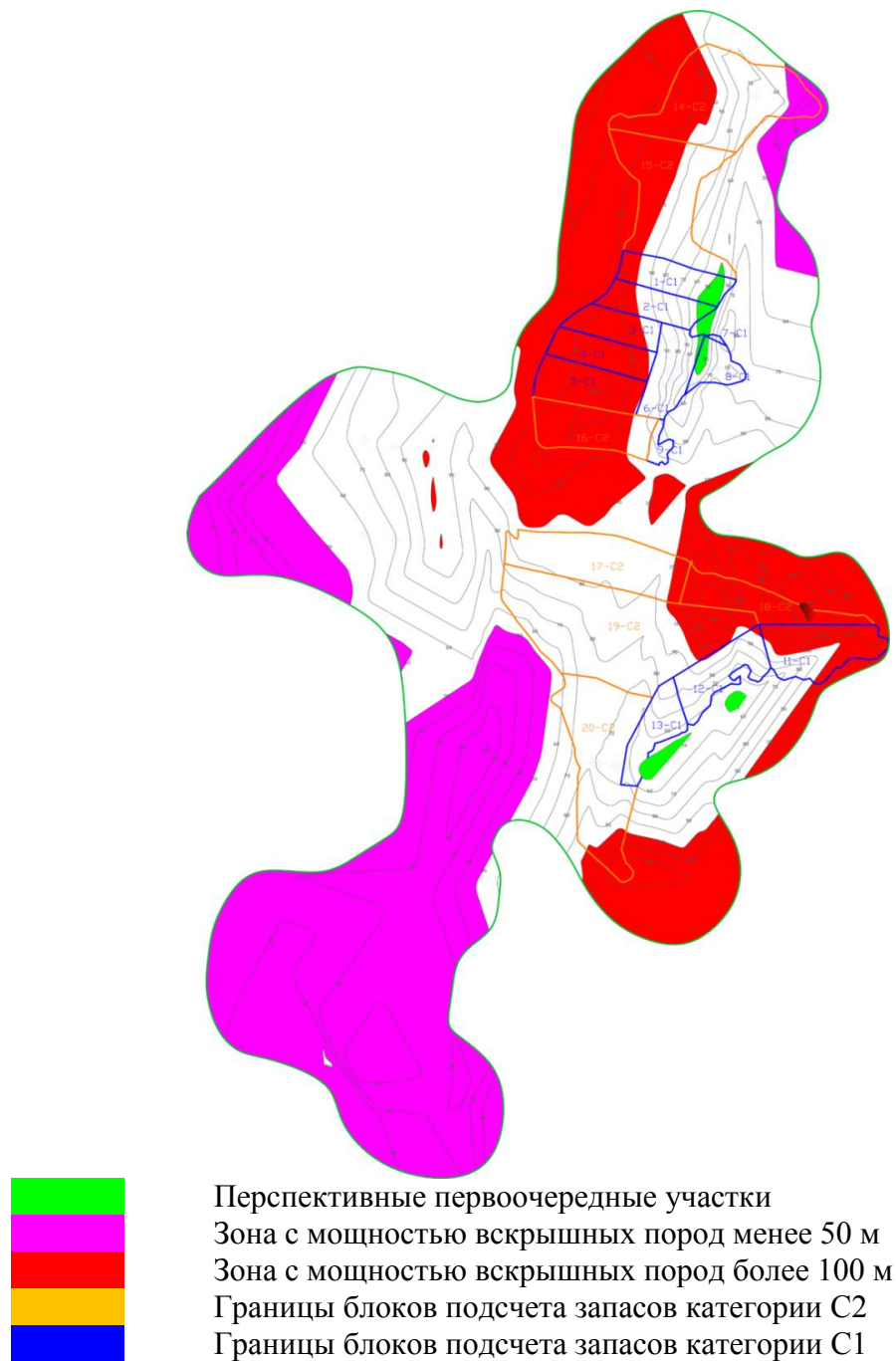


Рис. 6. Карта изомощностей вскрышных пород Серовского месторождения комплексных руд в зоне прогноза с выделением перспективных (по качественным характеристикам и мощности вскрыши) участков первоочередной отработки (выделено зеленым цветом)

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 отдельно. 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. 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 [11].

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 с учетом анизотропии, кластеризации данных. В зависимости от вида распределения качественных показателей ПИ в рудном массиве обосновывается выбор метода интерполяции данных (индикаторный кригинг, с внешним дрейфом или др.) [12 – 14]. 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 определиться 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) [15 – 20].

Для разработки блочных моделей использовались встроенные в 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%) (рис. 8).

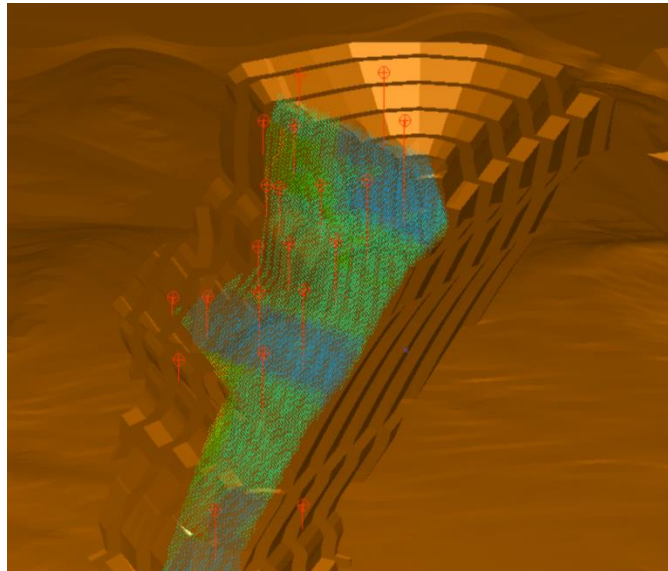


Рис. 7. Облако точек, характеризующее блочную модель с качественными характеристиками угля разреза Одегельдей (зольность, теплота сгорания, выход летучих веществ и т.п.)

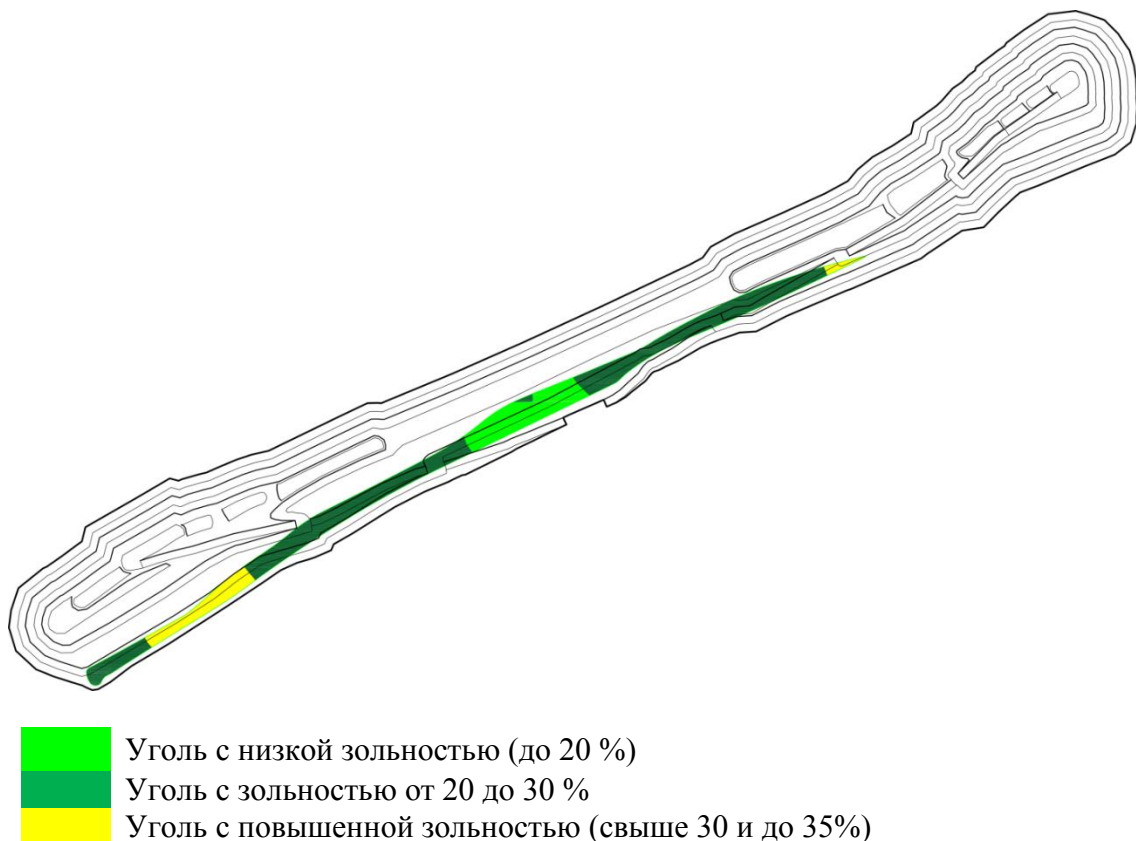


Рис. 8. План гор. +1260 м разреза Одегельдей в конечном положении с указанием зон высокозольного и низкозольного угля

#### *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; анализа соответствующих особенностей моделируемого объекта и определения условий для его моделирования; обоснования и выбора соответствующего метода пространственной интерполяции данных (метод «обратных расстояний» или др.); композитирования данных по скважинам с заданным интервалом; создания 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 совершенствования планирования горных работ в режиме управления качеством.

### Список литературы

1. Яковлев В.Л., 2017. Исследование переходных процессов – новый методологический подход к разработке и развитию инновационных технологий добычи и рудоподготовки минерального сырья при освоении глубокозалегающих сложноструктурных месторождений. *Проблемы недропользования*, № 2, С. 5 – 14. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.02.005

2. Яковлев В.Л., Корнилков С.В., Соколов И.В., 2018. *Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья: монография*; под редакцией В. Л. Яковлева. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 360 с.

3. Кузнецов О.Л., Никитин А.А., Черемисина Е.Н., 2005. *Геоинформатика и геоинформационные системы*. Москва: ВНИИгеосистем, 453 с.

4. Демьянов В.В., Савельева Е.А., 2010. *Геостатистика: теория и практика*. Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. Москва: Наука, 327 с.

5. Кантемиров В.Д., Титов Р.С., Яковлев А.М., 2016. Возможности компьютерного моделирования для решения вопросов управления качеством минерального сырья. *Проблемы недропользования*, № 4, С. 170 – 176. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.170

6. Ясковский П.П., 2001. *Горно-геологические условия при оценке месторождений*. Москва: МГГА, 37 с.

7. Dell'Accio F., Filomena Di Tommaso, 2020. On the hexagonal Shepard method. *Applied Numerical Mathematics*, Volume 150, April, P. 51 – 64.

8. Badel M., Saeed Angorani, Masoud Shariat Panahi, 2011. The application of median indicator kriging and neural network in modeling mixed population in an iron ore deposit. *Computers & Geosciences*, Volume 37, Issue 4, April, P. 530 – 540.
9. Afzal P., Nasser Madani, Shahab Shahbeik, Amir Bijan Yasrebi, 2015. Multi-Gaussian kriging: a practice to enhance delineation of mineralized zones by Concentration–Volume fractal model in Dardevey iron ore deposit, SE Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, Volume 158, November, P. 10 – 21.
10. Mohammadpour M., Abbas Bahroudi, Maysam Abedi, Gholamreza Rahimpour, Farzaneh Mami Khalifani, 2019. Geochemical distribution mapping by combining number-size multifractal model and multiple indicator kriging. *Journal of Geochemical Exploration*, Volume 200, May, P. 13 – 26.
11. Afeni T.B. Victor Oluwatosin Akeju, Adeyemi Emman Aladejare, 2020. 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.
12. Marques D.M., João Felipe C. L. Costa, 2014. Choosing a proper sampling interval for the ore feeding a processing plant: A geostatistical solution. *International Journal of Mineral Processing*, Volume 131, 10 September, P. 31 – 42.
13. Mery N., Xavier Emery, Alejandro Cáceres, Diniz Ribeiro, Evandro Cunha, 2017. Geostatistical modeling of the geological uncertainty in an iron ore deposit. *Ore Geology Reviews*, Volume 88, August, Pages 336 – 351.
14. Корнилков С.В., Аленичев В.М., Лаптев Ю.В., Яковлев А.М., 2017. Прогноз качественных показателей добываемого сырья на основе геоинформационных технологий. *Горный журнал*, № 12, С. 10 – 15.
15. Яковлев В.Л., Лаптев Ю.В., Яковлев А.М., 2014. Геоинформационная оценка изменчивости качества титаномагнетитовых руд Гусевогорского месторождения. *Литосфера*, № 5, С. 122 – 128.
16. Яковлев А.М., 2021. Апробация алгоритмов автоматизированной обработки геологических баз данных в технологических схемах управления качеством минерального сырья. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5 – 1, С. 248 – 257.
17. Яковлев А.М., 2021. Планирование горных работ в режиме управления качеством сырья на основе геоинформационного моделирования. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5 – 1, С. 258 – 268.
18. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С., 2020. Оценка качественных показателей полезных ископаемых с использованием геоинформационных технологий блочного моделирования. *Геоинформатика*. № 3, С. 29 – 37.
19. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С., 2019. Геоинформационные технологии при моделировании качественных характеристик руд. *Геоинформатика*, №. 3, С. 12 – 18.
20. M. W. A. Asad, 2005. Cutoff grade optimization algorithm with stockpiling option for open pit mining operations of two economic minerals. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Volume 19, Issue 3, P. 176 – 187.

## References

1. Yakovlev V.L., 2017. Issledovanie perekhodnykh protsessov – novyi metodologicheskii podkhod k razrabotke i razvitiyu innovatsionnykh tekhnologii dobychi i rudopodgotovki mineral'nogo syr'ya pri osvoenii glubokozalegayushchikh slozhnostrukturnykh mestorozhdenii [Study of transients as a new methodological approach to the creation and development of innovative technologies for the extraction and ore preparation of mineral raw materials in the development of deep-lying complex-structured deposits]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 2, P. 5 – 14. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.02.005

2. Yakovlev V.L., Kornilkov S.V., Sokolov I.V., 2018. Innovatsionnyi bazis strategii kompleksnogo osvoeniya resursov mineral'nogo syr'ya: monografiya [Innovative basis of the strategy of integrated development of mineral resources: monograph]; pod redaktsiei V.L. Yakovleva. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 360 p.
3. Kuznetsov O.L., Nikitin A.A., Cheremisina E.N., 2005. Geoinformatika i geoinformatsionnye sistemy [Geoinformatics and geoinformation systems]. Moscow: VNIIGeosistem, 453 p.
4. Dem'yanov V.V., Savel'eva E.A., 2010. Geostatistika: teoriya i praktika [Geostatistics: theory and practice]. Institut problem bezopasnogo razvitiya atomnoi energetiki RAN. Moscow: Nauka, 327 p.
5. Kantemirov V.D., Titov R.S., Yakovlev A.M., 2016. Vozmozhnosti komp'iuternogo modelirovaniya dlya resheniya voprosov upravleniya kachestvom mineral'nogo syr'ya [Possibilities of computer modeling for solving issues of quality management of mineral raw materials]. Problemy nedropol'zovaniya, № 4, S. 170 – 176. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.170
6. Yaskovskii P.P., 2001. Gorno-geologicheskie usloviya pri otsenke mestorozhdenii [Mining and geological conditions in the evaluation of deposits]. Moscow: MGGA, 37 p.
7. Dell'Accio F., Filomena Di Tommaso, 2020. On the hexagonal Shepard method. *Applied Numerical Mathematics*, Volume 150, April, P. 51 – 64.
8. Badel M., Saeed Angorani, Masoud Shariat Panahi, 2011. The application of median indicator kriging and neural network in modeling mixed population in an iron ore deposit. *Computers & Geosciences*, Volume 37, Issue 4, April, P. 530 – 540.
9. Afzal P., Nasser Madani, Shahab Shahbeik, Amir Bijan Yasrebi, 2015. Multi-Gaussian kriging: a practice to enhance delineation of mineralized zones by Concentration–Volume fractal model in Dardevey iron ore deposit, SE Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, Volume 158, November, P. 10 – 21.
10. Mohammadpour M., Abbas Bahroudi, Maysam Abedi, Gholamreza Rahimpour, Farzaneh Mami Khalifani, 2019. Geochemical distribution mapping by combining number-size multifractal model and multiple indicator kriging. *Journal of Geochemical Exploration*, Volume 200, May, P. 13 – 26.
11. Afeni T.B. Victor Oluwatosin Akeju, Adeyemi Emman Aladejare, 2020. 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.
12. Marques D.M., João Felipe C. L. Costa, 2014. Choosing a proper sampling interval for the ore feeding a processing plant: A geostatistical solution. *International Journal of Mineral Processing*, Volume 131, 10 September, P. 31 – 42.
13. Mery N., Xavier Emery, Alejandro Cáceres, Diniz Ribeiro, Evandro Cunha, 2017. Geostatistical modeling of the geological uncertainty in an iron ore deposit. *Ore Geology Reviews*, Volume 88, August, Pages 336 – 351.
14. Kornilkov S.V., Alenichev V.M., Laptev Yu.V., Yakovlev A.M., 2017. Prognoz kachestvennykh pokazatelei dobyvaemogo syr'ya na osnove geoinformatsionnykh tekhnologii [Forecast of quality indicators of extracted raw materials based on geoinformation technologies]. *Gornyi zhurnal*, № 12, P. 10 – 15.
15. Yakovlev V.L., Laptev Yu.V., Yakovlev A.M., 2014. Geoinformatsionnaya otsenka izmenchivosti kachestva titanomagnetitovykh rud Gusevogorskogo mestorozhdeniya [Geoinformation assessment of the quality variability for titan-magnetite ores of the Gusevogorskoye deposit]. *Litosfera*, № 5, P. 122 – 128.
16. Yakovlev A.M., 2021. Aprobatsiya algoritmov avtomatizirovannoi obrabotki geologicheskikh baz dannykh v tekhnologicheskikh skhemakh upravleniya kachestvom mineral'nogo syr'ya [Approbation of algorithms for automated processing of geological databases in technological management schemes of mineral raw material quality]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 5 – 1, P. 248 – 257.

17. Yakovlev A.M., 2021. Planirovanie gornykh работ v rezhime upravleniya kachestvom syr'ya na osnove geoinformatsionnogo modelirovaniya [Planning of mining operations in the raw material quality management mode based on geoinformation modeling]. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, № 5 – 1, P. 258 – 268.

18. Kantemirov V.D., Yakovlev A.M., Titov R.S., 2020. Otsenka kachestvennykh pokazatelei poleznykh iskopaemykh s ispol'zovaniem geoinformatsionnykh tekhnologii blochnogo modelirovaniya . [Assessment of qualitative indicators of minerals using geoinformation technologies of block modeling]. *Geoinformatika*. № 3, P. 29 – 37.

19. Kantemirov V.D., Yakovlev A.M., Titov R.S., 2019. Geoinformatsionnye tekhnologii pri modelirovanii kachestvennykh kharakteristik rud [Geoinformation technologies in modeling the qualitative characteristics of ores]. *Geoinformatika*, №. 3, P. 12 – 18.

20. M. W. A. Asad, 2005. Cutoff grade optimization algorithm with stockpiling option for open pit mining operations of two economic minerals. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Volume 19, Issue 3, P. 176 – 187.