

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ БАЗ ДАННЫХ С ЦЕЛЬЮ РАЙОНИРОВАНИЯ В КАРЬЕРЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТИПОВ И СОРТОВ РУД

В. Л. Яковлев, В. Д. Кантемиров, А. М. Яковлев, Р. С. Титов
Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация: Приведены результаты разработанной методики оценки качественных показателей полезных ископаемых на основе технологий блочного моделирования с использованием современных горно-геологических информационных систем. Предложена блок-схема моделирования качественных показателей полезного ископаемого и приведены результаты ее использования на примере Гусевогорского месторождения титаномagnetитов и Серовского месторождения комплексных руд. Представленная методика 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. На основе компьютерного моделирования получена взаимосвязь технологических решений по отработке месторождений открытым способом и этапов моделирования. Подтверждена универсальность предложенной методики блочного моделирования качества ПИ, которая может быть использована на любом месторождении для решения конкретных горнотехнических задач. Полученные результаты служат основой для разработки методов управления качеством минерального сырья и совершенствования планирования горных работ в режиме управления качеством. Предложенная методика универсальна и позволяет производить оценку качественных показателей полезных ископаемых для выбора рациональных приемов управления качеством минерального сырья.

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

Благодарность: Авторы выражают особую признательность и большую благодарность коллегам из лаборатории управления качеством минерального сырья ИГД УрО РАН, а также коллективу редакции «Маркшейдерия и недропользование» за поддержку и помощь в написании и оформлении статьи. Работа выполнена в рамках НИР 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

Для цитирования: Яковлев В. Л., Кантемиров В. Д., Яковлев А. М., Титов Р. С. Методика оценки геологических баз данных с целью районирования в карьере технологических типов и сортов руд. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 12-20. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_12_20.

METHODOLOGY FOR EVALUATING GEOLOGICAL DATABASES FOR THE PURPOSE OF ZONING TECHNOLOGICAL TYPES AND GRADES OF ORES IN OPEN-PITS

V. L. Yakovlev, V. D. Kantemirov, A. M. Yakovlev, R. S. Titov
Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

Abstract: The article presents the provisions of the developed methodology 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 presented on the example of the Gusevogorsky deposit of titanomagnetites and the Serov deposit of complex ores. The presented methodology allows us 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 and geological and mining-technological conditions of field development. Based on the analysis of computer modeling techniques, a flowchart has been developed showing the relationship between technological solutions for open-pit mining and modeling stages. The article uses examples to confirm the universality of the proposed method of block modeling of the quality of PI, which can be used at any field to solve specific mining problems. The presented scientific results serve as a basis for

the development of methods for managing the quality of mineral raw materials and improving the planning of mining operations in the quality management mode. The proposed methodology is universal and allows for the assessment of the quality indicators of minerals for the selection of rational methods of quality management of mineral raw materials.

Keywords: mining and geological information system, GIS, qualitative characteristics of ores, block modeling, geometrization, geological database

Gratitude: The authors express special gratitude and great gratitude to their colleagues from the Laboratory of Mineral Raw Materials Quality Management of the IGD Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, as well as to the editorial staff of «Surveying and Subsoil Use», for their support and assistance in writing and formatting the article. Methodological foundations of the strategy of integrated development of reserves of solid mineral deposits in the dynamics of development of mining systems (FUWE-2022-0005), reg. №.1021062010531-8-1.5.1.

For citation: Yakovlev V. L., Kantemirov V. D., Yakovlev A. M., Titov R. S. Methodology for evaluating geological databases for the purpose of zoning technological types and grades of ores in open-pits. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):12-20. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_12_20.

Введение

Эффективность освоения месторождений минерального сырья во многом связана с достоверностью геологической информации о параметрах залегания рудных тел с учетом природной изменчивости качества запасов полезных ископаемых (ПИ). Большинство рудных месторождений залегают в сложной геологической обстановке в виде линз, жил и пластов переменной мощности. Рудные тела во многих случаях имеют включения пустых пород или некондиционных руд разных размеров и формы, при этом элементы залегания рудных тел меняются в широких пределах. В еще большей степени изменяется качественный состав ПИ.

В связи с этим на современном этапе механизации горных работ при больших скоростях перемещения добычного фронта на глубоких горизонтах карьеров сложноструктурных месторождений и существенной изменчивости физико-геологической среды решающее влияние на эффективность всех процессов добычи и переработки минерального сырья оказывают принятые технологии geometrization рудных тел и их последующей рудоподготовки [1].

Пространственное распределение типов руд и их количественное соотношение формируют стратегию отработки месторождения в режиме управления качеством минерального сырья [2]. Выбор технологий управления качеством сырья перед его подачей на обогащение производится по результатам оценки качественных характеристик ПИ, выделения в рудном массиве природных типов руд, обоснования характеристик технологических типов руд и их районирования в карьерном пространстве.

Выделение типов руд производится по ряду признаков, связанных с их минеральным и химическим составом [3–4].

Природный (геологический) тип руды — руда, обладающая относительно устойчивым минеральным составом, текстурой и структурой, специфическими физическими свойствами, имеющая достаточно четкую пространственную обособленность. Название природного типа руды дается на основе главных рудообразующих минералов.

Природная разновидность руды — руда, выделяемая на основе более мелких признаков: присутствия второстепенных и редких минералов, минералов — носителей полезных и вредных примесей, текстурно-структурных особенностей и др.

Технологический тип руды — руда устойчивого минерального и химического состава, которая перерабатывается по определенной схеме обогащения. Основное условие выделения технологического типа — возможность его раздельной

добычи и переработки. Технологический тип подразделяется на сорта.

Технологический сорт руды — руда, имеющая общую для данного технологического типа схему переработки, но отличающаяся технологическими показателями переработки (например, степень извлечения ценного компонента, содержание металла в концентрате и др.).

В настоящее время на ряде крупных месторождений руд черных металлов выделяется от 2 до 6 технологических сортов руды. Технологические сорта одного и того же типа, как правило, перерабатываются совместно в определенных соотношениях. Технологический сорт может соответствовать природной разновидности руды в составе природного типа руды.

Большинство технологических типов руд подвергаются многостадийному обогащению перед подачей их на металлургическое производство, при этом ставится задача по максимальному извлечению ценного компонента в концентрат, которая более полно реализуется при раздельной добыче и обогащении выделенных типов и сортов руд [5].

Одним из направлений повышения эффективности рудоподготовки минерального сырья перед его обогащением является широкое внедрение в практику горного производства горно-геологических информационных систем (ГИС), с помощью которых можно с высокой достоверностью районировать в карьерном пространстве технологические типы и сорта руд [6] и планировать развитие открытых горных работ.

Цель работы: разработка методики оценки геологических баз данных с целью районирования в карьере технологических типов и сортов руд.

Материал и методы исследования

Исходной базой для оценки качественных характеристик руд и их распределения в недрах являются лабораторные исследования керновых проб, полученных при производстве детальной и эксплуатационной разведки месторождений.

Характер распределения и взаимосвязи ценных компонентов в составе руды представлен на примере Северной залежи Гусевогорского месторождения титаномагнетитов. Выполнен корреляционно-регрессионный анализ данных детальной разведки в пределах действующего Северного карьера ОАО «ЕВРАЗ КГОК» (табл. 1). Анализ геоданных методами статистики позволил уточнить качественные характеристики руды, что в сочетании с другими методами оценки позволило выделить зоны с повышенным и пониженным содержанием железа, титана и ванадия.

Таблица 1 / Table 1

Статистический анализ данных детальной разведки
по Северному карьеру АО «ЕВРАЗ КГОК» /
Statistic analysis of detailed exploration data on the Northern
Open-pit of EVRAZ KGOK

Химический элемент / Chemical element	Среднее значение / Average value, %	Стандартное отклонение / Std	Коэффициент корреляции / Ratio correlations	Уравнение регрессии связи содержания ценных компонентов / Regression equation of the relationship of the contents of valuable components
Fe	14,16	3,34	Fe - Ti = 0,69	Ti = 0,0743 Fe - 0,1094 R2 = 0,487 Fe (14-18 %) ~ Ti < 0,93-1,28 %
Fe(mg)	63,35	3,93	Fe - Fe(mg) = 0,35	—
Ti	0,99	0,36	Ti - V = 0,92	V = 0,1185 Ti - 0,0083 R2 = 0,8468 Ti (0,93-1,28 %) - V (0,1-0,14 %)
V	0,1	0,04	Fe - V = 0,68	V = 0,0092 Fe - 0,0264 R2 = 0,4687 Fe (14 - 18 %) ~ V (0,1-0,13 %)

На основе статистического анализа и обобщения действующих технологических критериев к железорудному сырью Гусевгорского месторождения установлен комплексный показатель обогатимости, который может быть использован для горно-геометрических построений и районирования технологических типов руд (показано на примере Северного карьера, табл. 2).

Для предварительного анализа технологических свойств руды также предлагается использовать метод оценки контрастности содержания ценных компонентов в ПИ.

В общем случае контрастность руды — это степень неравномерности распределения полезного компонента в руде, установленная по определенным ее объемам [7–8]. С геологической точки зрения контрастность отражает природную гетерогенность руд, т. е. изменчивость оруденения по содержанию полезных компонентов, неравномерность их распределения в рудном теле. Контрастность руды изучают как в условиях естественного залегания рудного тела, так и в различных объемах или порциях отбитой руды вплоть до

единичных кусков. Этот метод оценки обогатимости руд применим на любом этапе рудоподготовки и обогащения.

Количественно контрастность характеризуется показателем контрастности M , который представляет собой средневзвешенное относительное отклонение содержания полезного компонента в отдельных кусках, порциях или интервалах опробования от среднего его содержания в руде (классе руды):

$$M = \frac{1}{q_0} \sum_{i=1}^{i=n} |q_i - q_0| m_i, (1)$$

где q_0 — среднее содержание полезного компонента в руде (классе руды);

q_i — то же, но в отдельных кусках, порциях или интервалах опробования, доля каждого из которых от общей массы исследуемой пробы или общей длины интервала опробования составляет m_i ;

n — число кусков, порций или интервалов опробования.

Величина показателя контрастности может изменяться в пределах от 0 до 2.

По показателю контрастности руды можно подразделять на следующие группы:

$M < 0,5$ — неконтрастная;

$M = 0,5-0,7$ — низкоконтрастная;

$M = 0,7-1,1$ — контрастная;

$M = 1,1-1,5$ — высококонтрастная;

$M > 1,5$ — особоконтрастная.

Чем выше показатель контрастности, тем легче и лучше обогащается руда. Если величина M находится в пределах 0,5–0,7, то при благоприятных прочих условиях обогащение дает более высокие результаты. При показателе 0,7–1,2 можно ожидать хороших технологических результатов обогащения. Руды с более высокой контрастностью могут быть отнесены к легкообогатимым.

Метод предварительной оценки качественных характеристик титаномагнетитовой руды с помощью показателя контрастности опробован на примере моделирования распределения контрастности руд в пределах гор. +160 м Северного карьера АО «ЕВРАЗ КГОК». Исходными для моделирования явились данные детальной разведки. Для построения модели исследуемый массив скважин условно разбит на равные участки-квадраты (с координатами по осям X, Y).

Всего выделено 20 условных квадратов (табл. 3, рис. 1, 2 (см. цветную вклейку на стр. 81) с шагом Π_x и Π_y :

$$\Pi_x = \frac{X_{max} - X_{min}}{5}; (2)$$

Таблица 2 / Table 2

Соотношения между различными типами руд по комплексному показателю обогатимости в пределах гор. +160 м Северного карьера
Ratios between different types of ores according to the complex indicator of enrichment within the mountains. +160 m of the Northern open-pit

№	Комплексный показатель обогатимости / Comprehensive indicator of enrichment	Категория по вкрапленности / Category of inclusiveness	Содержание железа в магнитной фракции / Iron content in the magnetic fraction, %	Распределение по горизонту / Distribution over the horizon		
				%	тыс. м ²	тыс. м ³
1	Легкообогатимые	Крупновкрапленные	>64,4	1,1	14,5	219
2	Нормальнообогатимые	Крупно- или средневкрапленные	62,61–64,4 (или >64,4)	26,3	356,3	5 345
3	Среднеобогатимые	Средневкрапленные	62,61–64,4	25,7	346,7	5 200
4	Труднообогатимые	Мелко-, тонко- и дисперсновкрапленные	<62,6	42,3	572	8 580
5	Средневкрапленные	Средневкрапленные	Нет данных	4,6	61,5	922
Итого				100	1351	20 266

Таблица 3 / Table 3

Средние содержания ценных компонентов в условном квадрате гор. +160 м Северного карьера
Average contents of valuable components in the conditional square of mountains. +160 m of the Northern open-pit

№ по оси (axis) Y	Среднее содержание полезного компонента (химического элемента) в условном квадрате / Average content of a useful component (chemical element) in a conditional square, %											
	1			2			3			4		
	Fe	Ti	V	Fe	Ti	V	Fe	Ti	V	Fe	Ti	V
A							15,8	1,41	0,14	12,6		0,09
B				14,3	1,05	0,10	15,4	1,15	0,12	15,7	1,39	0,14
C	14,6	0,61	0,06	13,2	0,89	0,09	14,6	1,04	0,12			
D	12	1,07	0,12	14,4	1,06	0,12	14,4	0,98	0,11	14,5		0,11
E	12,2		0,09	13,9	1,02	0,11	14,2	0,71	0,07			

$$\Pi_y = \frac{Y_{max} - Y_{min}}{5}, (3)$$

где X_{max} , X_{min} — крайние отметки координат скважин по оси X;
 Y_{max} , Y_{min} — крайние отметки координат скважин по оси Y.

Условному квадрату присваивается номер в соответствии с принятой системой координат (например, C2). В каждом квадрате рассчитываются следующие характеристики: среднее содержание в руде ценных компонентов железа общего, титана и ванадия; коэффициенты вариации показателей содержания; коэффициенты контрастности содержания ценных компонентов. Результаты расчетов представлены в таблице 3 и на рисунке 1.

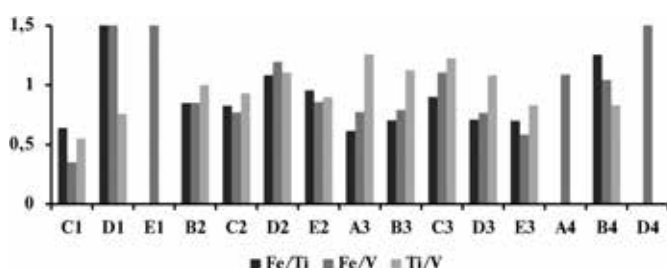


Рис. 1. Показатели контрастности в условных квадратах между представленными в руде ценными компонентами

Fig. 1. Contrast indicators in conditional squares between the valuable components represented in the ore

По результатам исследований отмечается достаточно четко выраженная локализация стабильных по содержанию скважинных проб в северном борту карьера. Установлена высокая колеблемость анализируемых параметров по содержанию ванадия и достаточно однородное содержание железа общего в пределах исследуемого участка карьера. Установлено, что практически по всему исследуемому полю показатели контрастности содержания титана и ванадия в руде выше, чем по железу. В таблице 4 представлено распределение руды по показателю контрастности в пределах гор. +160 м на Северном карьере.

Установлено, что контрастность между элементами в пределах гор. +160 м различается достаточно сильно, так, на западном борту карьера отмечается более высокая контрастность содержания железа, чем титана (в 4 раза). Предполагается, что, отрабатывая северный борт и центральный участок, можно минимизировать колебания качественных показателей ценных компонентов. Следует отметить, что показатель контрастности, характеризующий определенную степень неоднородности руды (класса руды), не может в полной мере свидетельствовать о возможности ее обогащения и не отражает технологические результаты обогащения. Его

использование рекомендуется для предварительного качественного анализа комплексных руд при различных способах ведения горных работ, разных схемах рудоподготовки и предварительного обогащения.

Таблица 4 / Table 4

Распределение руды по показателю контрастности на гор. +160 м
Ore distribution by contrast index at a height of +160 m

Тип руды по показателю контрастности / Type of ore in terms of contrast	Распределение по горизонту / Distribution over the horizon		
	%	тыс. м ²	тыс. м ³
Особоконтрастные (M > 1,5)	13,6	184,1	2 762,2
Высококонтрастные (1,2 < M < 1,5)	24,7	334,4	5 015,3
Контрастные (0,4 < M < 1,2)	33,8	457,1	6 855,4
Неконтрастные (M < 0,4)	26,8	363,1	5 446,2
Отсутствуют данные	1,1	15,1	226,9
Итого	100	1351	20 266

Результаты оценки контрастности химических и текстурно-структурных свойств рудного сырья могут стать основой для обоснования выбора технологических схем рудоподготовки в карьере (усреднение, сортировка, селективная отработка, предобогащение и т. п.) [9]. На рисунке 2 представлены результаты районирования технологических типов руд в пределах гор. +160 м Северного карьера по разным методикам: комплексному показателю обогатимости (содержанию железа в магнитной фракции проб и размера вкрапленности) и показателю контрастности.

Анализ прогноза распределения в карьере различных типов руд, выполненного по представленным методикам оценки, свидетельствует о достаточно похожих результатах районирования. Так, районом основного сосредоточения труднообогатимых руд, по другому методу — неконтрастных, являются северный и западный борты карьера. Легко- и нормальнообогатимые руды, как и выделенные по другой методике, — особо- и высококонтрастные, соответственно, расположены в основном в центральной части карьера.

Установленные на гор. +160 м суммарные объемы легко-, нормально- и среднеобогатимых руд (14,6 млн м³) примерно соответствуют выделенным по методике оценки контрастности суммарным объемам особо-, высоко- и контрастным рудам на горизонте (10,8 млн м³), разница составляет примерно 30 %.

Полученные результаты позволяют предварительно погоризонтно оценить в карьере степень изменчивости полезных компонентов в руде и сделать прогноз распределения определенных типов руд с целью последующего более детального выделения технологических типов руд для задач планирова-

ния горных работ и управления качеством минерального сырья и повышения эффективности обогащения [10–11].

На следующей стадии оценки качества рудного сырья в карьерах производится геометризации типов и сортов руд, при этом используется моделирование горно-геологических объектов и анализ запасов месторождений рудных ПИ на основе распространенных в РФ программных продуктов (MINEFRAME, SURPAC, DATAMINE и др.). С помощью этих систем 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. Моделирование пространственного распределения качества ПИ месторождения производится на основе технологии блочного моделирования. Блочное моделирование заключается в разделении изучаемого геологического объекта месторождения (залежь, рудное тело, блок подсчета запасов и т. п.) на элементарные геометрические единицы – блоки. Основной задачей блочного моделирования является количественно-качественная оценка массива недр на основании математических методов: статистики, теории вероятности и теории случайных функций [12–15].

Для автоматизации процессов планирования горных работ в режиме управления качеством минерального сырья разработана методика создания блочных моделей месторождений ПИ (рис. 3).

Разработка блочной модели месторождения (участка, рудного тела и т. п.) производится по этапам.

Первым этапом создания блочной модели является сбор и подготовка исходных данных – колонок опробования скважин детальной и эксплуатационной разведки, оценка геологических разрезов и планов.

Второй этап создания блочной модели. Таблицы трансформируют в шаблонную форму, учитывающую структуру

данных выбранной горно-геологической информационной системы. В них содержится информация об изменении по каждой скважине различных свойств полезного ископаемого и пустой породы, данные об инклинометрии, о глубинах и координатах устьев скважин, принадлежности скважин к разведочным профилям и стадиям разведки. Все эти параметры являются основными для создания геологической базы данных по заданному месторождению или его участку.

Третий этап создания блочной модели. Композитирование проб – приведение всех проб по скважинам к равному интервалу (шагу) опробования.

Выполняется первичная статистическая обработка по всему массиву проб:

- по каждому рудному телу;
- каждому типу руды;
- каждому виду опробования.

Полученные данные позволяют определить тип распределения минерализации (нормальные, логнормальное и т. п.) и неоднородность массива данных, которое может быть связано с несколькими генерациями минерализации полезного компонента. Корреляционный анализ позволяет предварительно выявить экстремальные значения проб, не укладывающиеся в общую линию регрессии. На этом этапе возможно применить и другие виды многомерного статистического анализа.

Четвертый этап создания блочной модели. После композитирования производится построение каркасных и блочных моделей, задаются размеры блоков, определяются пространственные границы.

Пятый этап создания блочной модели. Интерполяция и экстраполяция оцениваемых качественных характеристик (содержание ценных компонентов ПИ и др.) методами геостатистики.

Шестой этап создания блочной модели. На основании анализа полученной информации делаются выводы о степени



Рис. 3. Блок-схема методики построения блочной модели месторождения
Fig. 3. Block diagram of the methodology for constructing a block model of the deposit

неоднородности месторождения, обосновывается необходимость их деления на участки однородного строения (домены). Домены выделяются с учетом густоты разведочной сети, морфологических характеристик рудных тел или их отдельных частей, природных типов и промышленных сортов руд, изменчивости оруденения и геостатистических критериев — резкого изменения градиента моделируемых характеристик месторождения. В пределах доменов строятся каркасы рудных тел.

Основной инструмент геостатистики — *вариограмма* (график, функция), используется для определения пространственной корреляции между произвольно размещенными реальными данными наблюдений.

Седьмой этап создания блочной модели. Обоснование размеров блоков (ячеек) для месторождений всех морфологических типов должно выполняться с учетом нескольких факторов: плотности разведочной сети, характеристики геологической структуры месторождения, сложности конфигурации границ рудных тел, пространственной изменчивости содержания полезных компонентов и параметров системы отработки месторождения. Форма блока должна соответствовать структуре моделируемого месторождения и характеру его анизотропии. Размер основных ячеек не должен быть меньше половины среднего расстояния между пробями в направлении разведочного профиля.

Адекватность блочной модели зависит от качества и полноты исходных материалов. Чем больше информации будет введено в базу данных (БД) для создания блочной модели (БМ), тем достовернее будет эта БМ. При этом качество исходных материалов проверяется по всем основным стадиям и видам работ начиная от методики проведения разведочных работ, топографо-геодезических работ, опробования и химико-аналитических работ.

На основе полученных моделей месторождения или его части производится геометризация качественных параметров ПИ с нанесением на плане горных работ изолиний, показывающих содержание ценного компонента в руде, с последующим выделением и оконтуриванием в карьерном пространстве рудных зон одинакового качества.

Для интерпретации геоданных в ГГИС предлагается два основных метода: экспресс и детальный. Методы различаются трудоемкостью выполнения, детальностью и возможностью корректировок построенных моделей в зависимости от установленных или изменившихся требований к качеству полезного ископаемого.

На рисунке 4 (см. цветную вклейку на стр. 81) представлена блок-схема выбора метода моделирования и интерпретации геоданных.

Выбор метода зависит от объема геоданных в сформированной базе, решаемых задач и сроков их выполнения. Рекомендуется при сравнительно небольшом объеме геоданных (блок, уступ, участок карьера) использовать экспресс-метод на основе метода обратных расстояний (детерминистический способ), при большом объеме исходных данных предлагается использовать детальный метод блочного моделирования на основе методов геостатистики (кригингас линейной вариограммой).

Достоинства методов геоинформационного моделирования:

— экспресс-метод позволяет оперативно (в полуавтоматическом режиме при непосредственном контроле оператора) получать представления об основных закономерностях пространственного размещения компонентов полезного ископае-

мого при минимальном количестве вычислительных операций;

— детальный метод позволяет в автоматическом режиме производить подсчет запасов на ПК ЭВМ, выделять технологические типы и сорта руд, минимизировать затраты времени на представление результатов, производить моделирование параметров системы разработки, оценить календарный план.

Недостатки методов геоинформационного моделирования:

— экспресс-метод при изменениях исходных данных и требований к кондициям руд или критериям принадлежности руды к определенному технологическому сорту (содержание полезных и вредных компонентов и др.) предполагает трудоемкую ручную обработку изменившихся границ (параметров) зон районирования, а комплексный показатель качества потребует дополнительных расчетов на стадии корректировки геологической базы;

— детальный метод более трудоемкий, так как при его применении необходимо производить большой объем дополнительных исследований и вычислений (геостатистика, создание каркасных моделей, интерполяция в блочную модель и т.п.), а первоначальные затраты времени превышают по сравнению с экспресс-методом в 5–10 раз.

Результатом обоих методов является модель распределения в карьерном пространстве качественных показателей технологических типов руд. Следовательно, оба метода имеют свои области применения в зависимости от постановки задачи и сроков её выполнения и при необходимости могут дополнять друг друга.

С использованием предложенных методов в качестве примера выполнена оценка распределения качественных параметров руд для ряда месторождений.

Гусевогорское и Собственно-Качканарское месторождения титаномагнетитов. На рисунках 5, 6 (см. цветную вклейку на стр. 82) представлены схемы районирования в карьерах АО «ЕВРАЗ КГОК» технологических типов руд по содержанию TiO_2 .

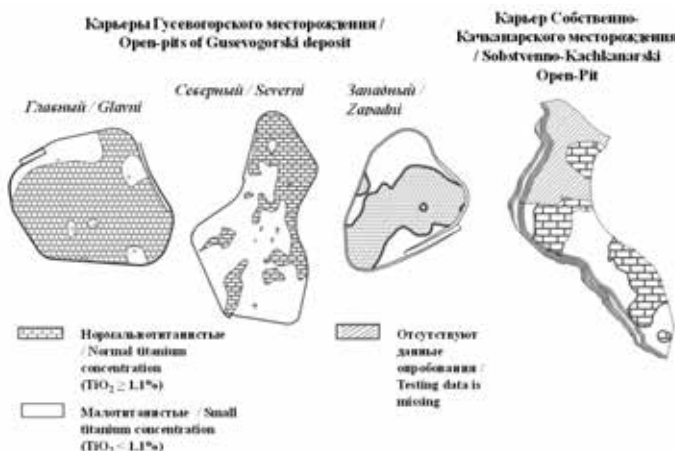


Рис. 5. Распределение в карьерах АО «ЕВРАЗ КГОК» технологических типов руд по содержанию TiO_2

Fig. 5. Distribution of technological types of ores in the open-pits of EVRAZ KGOK by TiO_2 content

Комплексные исследования руд Гусевогорского месторождения показали, что малотитанистая их разновидность по сравнению с нормальнотитанистой имеет более высокую обогатимость и измельчаемость и меньшую магнитную

жесткость. Учитывая большие различия в обогатимости и измеляемости малотитанистой и нормальнотитанистой разновидностей этих руд, целесообразно их выделить в разные технологические типы. Таким образом, выделение технологических типов руд по содержанию TiO_2 имеет существенное значение при их переработке.

Серовское месторождение комплексных руд. Месторождение расположено на восточном склоне Северного Урала.

По результатам геологических исследований на месторождении выявлено два природных типа руд:

- бобово-конгломератовые железные руды, составляющие основной объем месторождения;
- силикатные латеритные никелевые руды.

На основании данных о химическом составе руд выделено три технологических типа (табл. 5).

Таблица 5 / Table 5

**Химический состав основных ценных компонентов
бобово-конгломератовых руд
Chemical composition of the main valuable components
of bean-conglomerate ores**

Компонент / Components	Технологические типы руд / Technological types of ores			Средний состав бобово-конгломератовой руды в % соотношении разновидностей / Average composition of bean-conglomerate ore in % ratio of varieties: I – 20, II – 45, III – 35.
	1	2	3	
	Руда бобово-конгломератова плотная / Bean-conglomerate dense ore (I)	Руда бобово-конгломератова рыхлая / Bean-conglomerate loose ore (II)	Руда охристая и охристая / Ore is ochreous and ochreous-clay (III)	
Feобщ, %	46,99	36,35	42,79	40,73
Cr ₂ O ₃ , %	2,92	2,51	2,92	2,75
Ni, %	0,11	0,35	0,22	0,21
Co, %	0,038	0,048	0,041	0,042

Результаты моделирования распределения выделенных руд на гор. +40 м перспективного карьера Серовского месторождения представлены на рисунке 7 (см. цветную вклейку на стр. 82). Таким образом, по геологическим данным Серовского месторождения комплексных руд выполнен анализ горно-геологических условий, статистический регрессионный анализ качественных показателей руд, построены геoinформационные модели, на основании которых выделены и районированы 2 природных и 3 технологических типа руд.

Результаты моделирования позволят разработать стратегию освоения комплексного месторождения.

Заключение

Экспериментально-аналитические исследования позволили сформулировать основные положения методики моде-

лирования качественных характеристик ПИ, геометризации в карьерном пространстве природных и технологических типов и сортов рудного сырья.

Усовершенствованы методы блочного моделирования качественных показателей руд в режиме управления качеством сырья.

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 рудо-подготовки на горном предприятии.

Этап подготовки данных для создания блочной модели включает в себя следующие операции: условную классификацию по типу встречаемых петрографических разностей в опробуемых взрывных скважинах; разбиение на петрографические интервалы по глубине скважины; трансформацию подготовленных данных в соответствующий формат.

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 (применен метод «обратных расстояний»); композитирования данных по скважинам с заданным интервалом; создания блочной модели.

Разработанный метод оценки изменчивости блочной модели по различным пространственным направлениям позволяет рассмотреть множество вариантов развития открытых горных работ.

С использованием разработанных усовершенствованных блочных моделей распределения качественных показателей руд установлена зональность размещения руд на карьерах ОАО «ЕВРАЗ КГОК», а также перспективного для освоения Серовского месторождения комплексных руд.

Выводы

1. Разработаны основные методологические подходы к выделению по качественным признакам и районированию в карьерном пространстве технологических типов и сортов руд на основе геометризации и компьютерного блочного моделирования.

2. Разработанные усовершенствованные методы блочного моделирования качественных показателей рудного сырья и геометризации в карьерном пространстве технологических типов руд позволяют повысить эффективность планирования развития горных работ и обогащения сырья с целью максимального извлечения ценных компонентов и получения высококачественных концентратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCE

1. Яковлев ВЛ. Исследование переходных процессов – новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов. Екатеринбург: УрО РАН, 2019. 284 с. [Yakovlev VL. The study of transients – a new direction in the development of the methodology of integrated exploration of georesources. Yekaterinburg, 2019 (In Russ.).]

2. Яковлев ВЛ, Корнилов СВ, Соколов ИВ. Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья; под ред. член-корр. РАН В. Л. Яковлева. Екатеринбург: УрО РАН, 2018. 360 с. [Yakovlev VL, Kornilov SV, Sokolov IV. The innovative basis of the strategy of integrated development of mineral resources. Yekaterinburg, 2018 (In Russ.).]
3. Яковский ПП. Горно-геологические условия при оценке месторождений. М.: МГГА, 2001. 37 с. [Yaskovsky PP. Mining and geological conditions in the assessment of deposits. Moscow, 2001.]
4. Смирнов ВИ. Геология полезных ископаемых. М.: Недра, 1982. 672 с. [Smirnov VI. Geology of minerals. Moscow, 1982 (In Russ.).]
5. Корнилов СВ, Дмитриев АН, Пелевин АЕ, Яковлев АМ. Раздельная переработка руд Гусевогорского месторождения. *Горный журнал*. 2016;(5):86–89. [Kornilov SV, Dmitriev AN, Pelevin AE, et al. Separate processing of ore from the Gusevogorsky deposit. *Mining Journal*. 2016;5:86-9 (In Russ.). DOI: 10.17580/gzh.2016.05.12.]
6. Кантемиров ВД, Титов РС, Яковлев АМ. Примеры технических решений по снижению горно-геологических рисков при отработке сложноструктурных месторождений. *Маркшейдерия и недропользование*. 2022;4(120):19–32. [Kantemirov VD, Titov RS, Yakovlev. Examples of technical solutions to reduce mining and geological risks during the development of complex-structured deposits. *Surveying and Subsoil Use*. 2022;4(120):19-32 (In Russ.).]
7. Пухальский ЛЧ. Теория контрастности урановых руд. М.: Госатомиздат, 1963. 176 с. [Puhalsky LCh. The theory of contrast of uranium ores. Moscow, 1963 (In Russ.).]
8. Мокроусов ВА. Контрастность руд, ее определение и использование при оценке обогатимости. *Минеральное сырье*. 1960;(1):70–75. [Mokrousov VA. Contrast of ores, its definition and use in the assessment of enrichment. *Mineral raw materials*. 1960;1:70-5 (In Russ.).]
9. Ревнивцев ВИ, Азбель ВИ, Баранов ЕГ. [и др.]. Подготовка минерального сырья к обогащению. М.: Недра, 1987. 307 с. [Revnitsev VI, Azbel VI, Baranov EG, et al. Preparation of mineral raw materials for enrichment. Moscow, 1987 (In Russ.).]
10. Noriega R, Pourrahimian Y. A systematic review of artificial intelligence and data-driven approaches in strategic open-pit mine planning. *Resour. Policy*. 2022;77:102727. DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.102727.
11. Blom M, Pearce AR, Stuckey PJ. Short-term planning for open pit mines: A review. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2019;33(5):318–339. DOI: 10.1080/17480930.2018.1448248
12. Jelvez E, Morales N, Ortiz JM. Stochastic Final Pit Limits: An Efficient Frontier Analysis under Geological Uncertainty in the Open-Pit Mining Industry. *Mathematics*. 2021;10(1):100. DOI: 10.3390/math10010100
13. Monestiez P, Allard D, Froidevaux R. GeoENV III – Geostatistics for Environmental Applications. New York: Springer, 2001. 555 p.
14. Демьянов ВВ, Савельева ЕА. Геостатистика: теория и практика. М.: Наука, 2010. 327 с. [Demyanov VV, Savelyeva EA. Geostatistics: theory and practice. Institute of Problems of Safe Development of Nuclear Energy of the Russian Academy of Sciences. Moscow, 2010 (In Russ.).]
15. Кузнецов ОЛ, Никитин АА, Черемисину ЕН. Геоинформатика и геоинформационные системы. М.: ВНИИГеосистем, 2005. 453 с. [Kuznetsov OL, Nikitin AA, Cheremisin EN. Geoinformatics and geoinformation systems. Moscow, 2005 (In Russ.).]

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS



Яковлев Виктор Леонтьевич –
член-корреспондент РАН, советник РАН, д-р
техн. наук, профессор, Институт горного дела
УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия, ORCID 0000-
0001-5860-9626, e-mail: yakovlev@igduran.ru

Viktor L. Yakovlev –
Corresponding Member of the Russian Academy of
Sciences, Adviser of the Russian Academy of Sciences,
Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute of Mining, Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg,
Russian Federation, ORCID 0000-0001-5860-9626,
e-mail: yakovlev@igduran.ru



Кантемиров Валерий Данилович –
канд. техн. наук, заведующий лабораторией
Управления качеством минерального
сырья, Институт горного дела УрО РАН, г.
Екатеринбург, Россия, ORCID 0000-0001-6486-
2740, e-mail: ukrkant@mail.ru

Valery D. Kantemirov –
Cand. Sci. (Eng.), Quality management laboratory
chief, Institute of Mining of Ural branch of RAS,
Yekaterinburg, Russian Federation, ORCID 0000-
0001-6486-2740, e-mail: ukrkant@mail.ru



Титов Роман Сергеевич –
старший научный сотрудник, лаборатория
управления качеством минерального сырья,
Институт горного дела УрО РАН, г.
Екатеринбург, Россия, ORCID 0000-0002-3569-
2743, e-mail: ukr07@mail.ru

Roman S. Titov –
senior researcher, Quality management laboratory,
Institute of Mining of Ural branch of RAS,
Yekaterinburg, Russian Federation, ORCID
0000-0002-3569-2743,
e-mail: ukr07@mail.ru



Яковлев Андрей Михайлович –
канд. техн. наук, старший научный сотрудник,
лаборатория Управления качеством
минерального сырья, Институт горного
дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия,
ORCID 0000-0001-8285-6387,
e-mail: quality@igduran.ru

Andrei M. Yakovlev –
Cand. Sci. (Eng.), senior researcher, Quality
management laboratory, Institute of Mining of Ural
branch of RAS, Yekaterinburg, Russian Federation,
ORCID 0000-0001-8285-6387,
e-mail: quality@igduran.ru

Критерии авторства / Contribution:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей / The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.