

ПЛАНИРОВАНИЕ ГОРНЫХ РАБОТ В РЕЖИМЕ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ СЫРЬЯ НА ОСНОВЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. М. Яковлев

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук,
Екатеринбург, Россия

Аннотация: Ухудшение горнотехнических и горно-геологических условий добычи полезных ископаемых, ужесточение требований к содержанию полезных и вредных компонентов, чистоте, получаемой из минерального сырья продукции, требует современных подходов к ведению горного дела с применением новейших методик геоинформационного моделирования при минимальных финансовых и временных затратах. В статье приведена методика геометризации качественных характеристик месторождений титаномагнетитовых руд с применением геоинформационного обеспечения в горно-геологических информационных системах (ГИС) для выделения технологических типов полезного ископаемого с целью повышения эффективности извлечения ценных компонентов. Предложено оценивать рудное тело месторождения в замкнутых контурах горных выработок и утвержденных блоков подсчета запасов. Для этого выполняется построение каркасных моделей рудных тел на основании оцифрованных сечений с погоризонтных планов, продольных и поперечных разрезов, планов кровли и почвы. На примере оценки изменчивости качественных характеристик титаномагнетитовых руд представлен алгоритм выделения участков, перспективных для применения приемов управления качеством рудоподготовки. Предложенная методика предназначена для автоматизированного планирования горных работ в режиме управления качеством сырья с учетом статистических и экономических критериев и более комплексного использования недр.

Ключевые слова: геометризация, геологические базы данных, геоинформационное моделирование, титаномагнетитовые руды, качество полезного ископаемого, блочное моделирование, планирование горных работ, раздельная добыча и усреднение рудной массы.

Благодарность: Статья подготовлена по материалам НИР, выполняемой по программе ФНИ государственных академий наук Тема 1 – Методы учета переходных процессов технологического развития при освоении глубокозалегающих сложно-структурных месторождений полезных ископаемых. (№0405–2019–0005).

Для цитирования: Яковлев А. М. Планирование горных работ в режиме управления качеством сырья на основе геоинформационного моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5–1. – С. 258–268. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_258.

Planning of mining operations in the quality management mode based on geoinformation modeling

A. M. Yakovlev

Institute of Mining Ural branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Abstract: Deterioration of geological conditions of mineral mining and the tightened requirements imposed on the content of useful and harmful components and on the mineral product requires modern approaches to mining with the use of the latest methods of geoinformation modeling with minimal financial and time costs. The article presents a method of quality-based geometrization of titanomagnetite ore deposit using geoinformation support provided by mining and geological information systems (GGIS) to identify technological types of minerals in order to increase the efficiency of extraction of valuable components. It is proposed to appraise an ore body inside the closed boundaries of underground excavations and certified blocks. For this purpose, the frame models of ore bodies are constructed on the basis of digitized sections of horizon-oriented plans, longitudinal and transverse sections, as well as roof and floor plans. The algorithm of detecting promising areas for application of pretreatment quality control is presented as a case-study of variability of titanomagnetite ore quality. The proposed methodology is intended for automated planning of mining operations in the quality management mode with regard to statistical and economic criteria toward efficient subsoil use.

Key words: geometrization, geological databases, geoinformation modeling, titanomagnetite ores, mineral quality, block modeling, mining planning, separate mining and ore blending.

Acknowledgements: The article is based on the R&D project implemented within the framework of the Basic Research Program of the Governmental Academies of Sciences, Topic 1: Methods to Take into Account Transient Processes in Mining Deep-Seated Mineral Deposits of Complex Structure, No. 0405-2019-0005.

For citation: Yakovlev A. M. Planning of mining operations in the quality management mode based on geoinformation modeling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5–1):258–268. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_258.

Введение

Оценка изменчивости качественных характеристик руд и своевременный учет этого показателя оказывает существенное влияние на эффективность переработки минерального сырья. Резкие колебания содержания полезных компонентов в руде ведут к большим экономическим потерям при её переработке[1].

Одна из главных задач для геологов, маркшейдеров и технологов, решаемая для эффективной и экономически целесообразной работы карьера — поддержание постоянного уровня подачи руды на фабрику и исключение её резких перепадов по качеству. Учет каче-

ственных показателей руд осуществляется при геологическом изучении недр (детальной, эксплуатационной разведке, оперативного опробования), а также при планировании добычных работ. Планирование делится на перспективное (5–10 лет), текущее (год) и оперативное (квартал, месяц и т. п.) [2].

В настоящий момент времени планирование на крупных ГОК осуществляется с использованием специальных горно-геологических информационных систем и прикладных программных продуктов (Surpac, Datamine, Mineshed, Mineframe и т. п.), что позволяет обеспечить наиболее эффективный уровень

сопровождения процессов горного производства, снизить погрешности, повысить точность прогноза и учета движения запасов за счет интеграции с системами диспетчеризации [3–6].

Таким образом, компьютерное моделирование показателей качества минерального сырья служит основой для оценки их изменчивости, выбора и оптимизации системы управления рудопотоками в карьерах.

Описание

Начальным этапом трансформации данных разведки в компьютерную модель является создание «геологической базы данных», содержащей информацию о скважинах и интервалах опробования. Растровая и бумажная информация векторизуются и переводится в цифровой табличный вид. В таких таблицах содержится информация: ID скважины, координаты (x, y, z), опционально: номер геологического профиля. Обязательны данные интервального опробования по количеству и содержанию полезных компонентов и вредных примесей. Может быть включена также иная атрибутивная информация: физико-механические и физические свойства, рассчитанные экономические показатели добычи и др. [7–8].

С целью получения наиболее достоверного прогноза производится корректировка ураганных значений и исправление ошибок в данных, их кластеризация с последующим созданием геологической базы средствами ГГИС (пример фрагмента геологической базы представлен на рис. 1).

Геологическая база данных необходима 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 [9–10]. На ее основе можно произвести предварительную оценку качества сырья на месторождении, без использования «сглаживающих» алгоритмов для разработки выдержанного по качественным показателям календарного плана горных работ (см. рис. 2). Оценивать пространство необходимо в замкнутых контурах: границах горных выработок и утвержденных блоков подсчета запасов, следующим этапом является построение каркасных моделей рудных тел.

Сечения каркасных моделей представляют собой замкнутые контуры, из которых формируется трехмерная модель полезного ископаемого, обладающая объемом и линейными характеристиками трехмерного тела. Каркасная модель рудного тела представляет собой пространственное ограничение интерполяции для построения блочных моделей (рис. 3).

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

- построение каркасных моделей рудных блоков и тел;
- выбор в зависимости от количества скважин рационального алгоритма и параметров блочной модели, размеров блоков;
- интерполяция и экстраполяция данных в модель;
- сохранение модели по результатам расчетов.

Для экстраполяции данных за пределами области разведки применяется написанное на языке программирования Python приложение, в котором после расчета производится комбинирование результатов с данными интерполяции средствами ГГИС. При этом точкам атрибутивных данных задается дополнительный атрибут в зави-

hole_id	samp_id	depth_from	depth_to	rock	rc	roc	feruda
1071	5686	0	12,1	PDL	3	f	17,05
1071	5687	12,1	27,1	PDL	3	x	13,1
1071	5688	27,1	42,1	PDL	3	x	13,3
1071	5689	42,1	57,1	PDL	3	x	12,4
1071	5690	57,1	72,1	POS	5	f	12,5
1071	5691	72,1	87,1	POS	5	f	13,9
1071	5692	87,1	91	POS	5	f	17,5
1072	5693	0	6,4	PDL	3	f	18,15
1072	5694	6,4	21,4	PDL	3	f	16,3
1072	5695	21,4	36,4	PDL	3	x	12,4
1072	5696	36,4	51,4	PDL	3	f	13
1072	5697	51,4	66,4	PDL	3	f	13,7
1072	5698	66,4	81,4	PDL	3	x	10,8
1072	5699	81,4	84	PDL	3	x	10,5
1073	5700	0	7,2	POS	5	x	14,1
1073	5701	7,2	22,2	POS	5	x	16,3
1073	5702	22,2	37,2	POS	5	x	16,25
1073	5703	37,2	52,2	POS	5	x	16,6
1073	5704	52,2	67,2	POS	5	x	11,2
1073	5705	67,2	74,3	POS	5	f	14,9
1073	5706	74,3	77	POS	5	x	4,45
1073	5707	77	82,2	POS	5	x	14,9
1073	5708	82,2	84,3	POS	5	x	13,2

Рис. 1. Образец таблицы исходных данных
Fig. 1. Example of source data table

симости от источника экстраполяции и интерполяции.

При экстраполяции применяются следующие методы:

- аппроксимация функцией, например, полиномами с самоопределяющимися степенями (разработка ИГД УрО РАН, разработчики: д.т.н. Антонов В. А., Яковлев М. В.);
- линейной экстраполяции;
- наименьших квадратов и его вариации;
- экспоненциального сглаживания.

Для интерполяции пространственных данных используются различные варианты кригинга (индикаторный, ранговый и др.) и метод обратных расстояний.

Метод обратных расстояний при своей универсальности, обладает недостатком – создает артефакты – структуры типа «бычий глаз» вблизи

экстремумов. В то же время при малом наборе данных методы кригинга и обратных расстояний дают одинаковый результат, погрешность которого зависит от расстояния между данными и их количеством, а также учетом анизотропии и регулярности сети опробования.

При выборе размеров блока блочной модели необходимо учитывать некоторые факторы, в т. ч. такие, как густота и равномерность разведочной сети скважин, явное отсутствие или наличие направления изменчивости исследуемого компонента, морфология рудных тел и т. п.

Факторы, влияющие на размеры блоков модели:

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

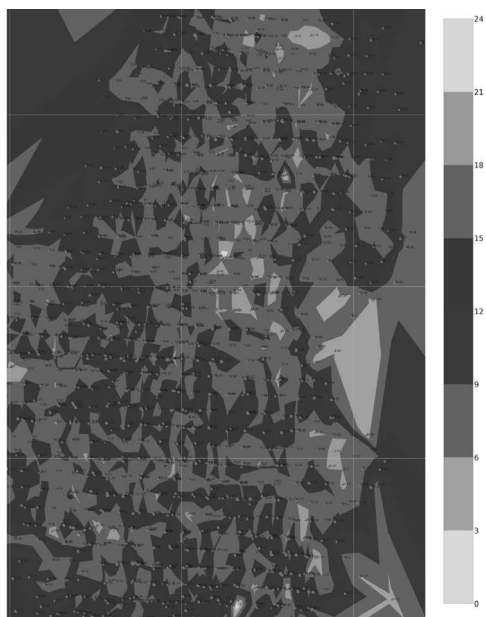


Рис. 2. Фрагмент карты средних содержаний (вертикальная шкала) и коэффициентов вариации (цифры на плане) по скважинам (геологическая база данных)
 Fig. 2. Fragment of map of average contents (vertical scale) and variation factors (figures) per boreholes (geological data base)

– пространственная изменчивость содержаний полезных компонентов и параметров системы обработки месторождения.

В современных ГГИС размер блока блочной модели рекомендуется определять с помощью количественного анализа области поиска методом кригинга для минимизации смещений и дисперсии оценки.

Блочная модель является финальной стадией компьютерного моделирования, она — основа для горно-геометрических расчетов и оформления горно-графической документации. В качестве примера на рис. 4 представлена карта распределения содержания ванадия в титаномагнетитовой руде Гусевогорского месторождения в виде изолиний в пределах Северного карьера, построенная на основе блочной модели месторождения.

Результаты

В результате исследований разработана методика геоинформационного моделирования качества руд (рис. 5), построены каркасные и блочные модели, на основе которых выполнен анализ изменчивости качественных показателей по пространственным осям и по глубине месторождения, а также по разведочным профилям (см. рис. 6—8). Основная идея анализа

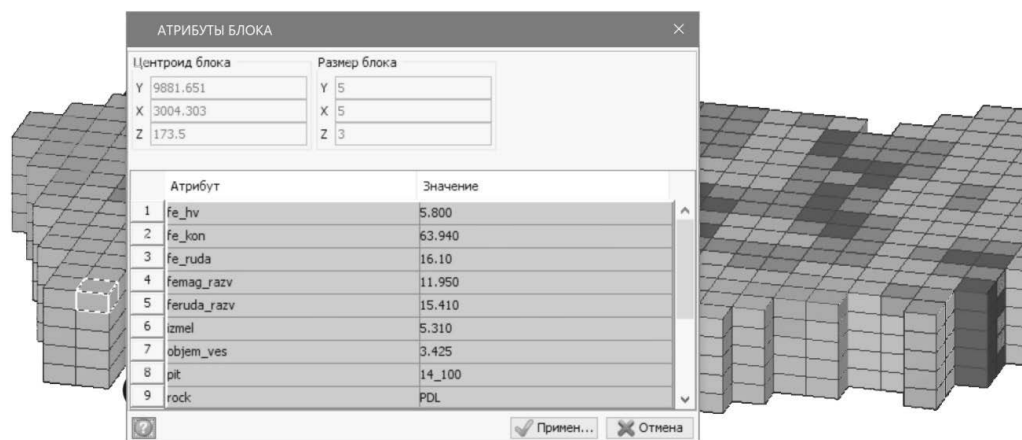
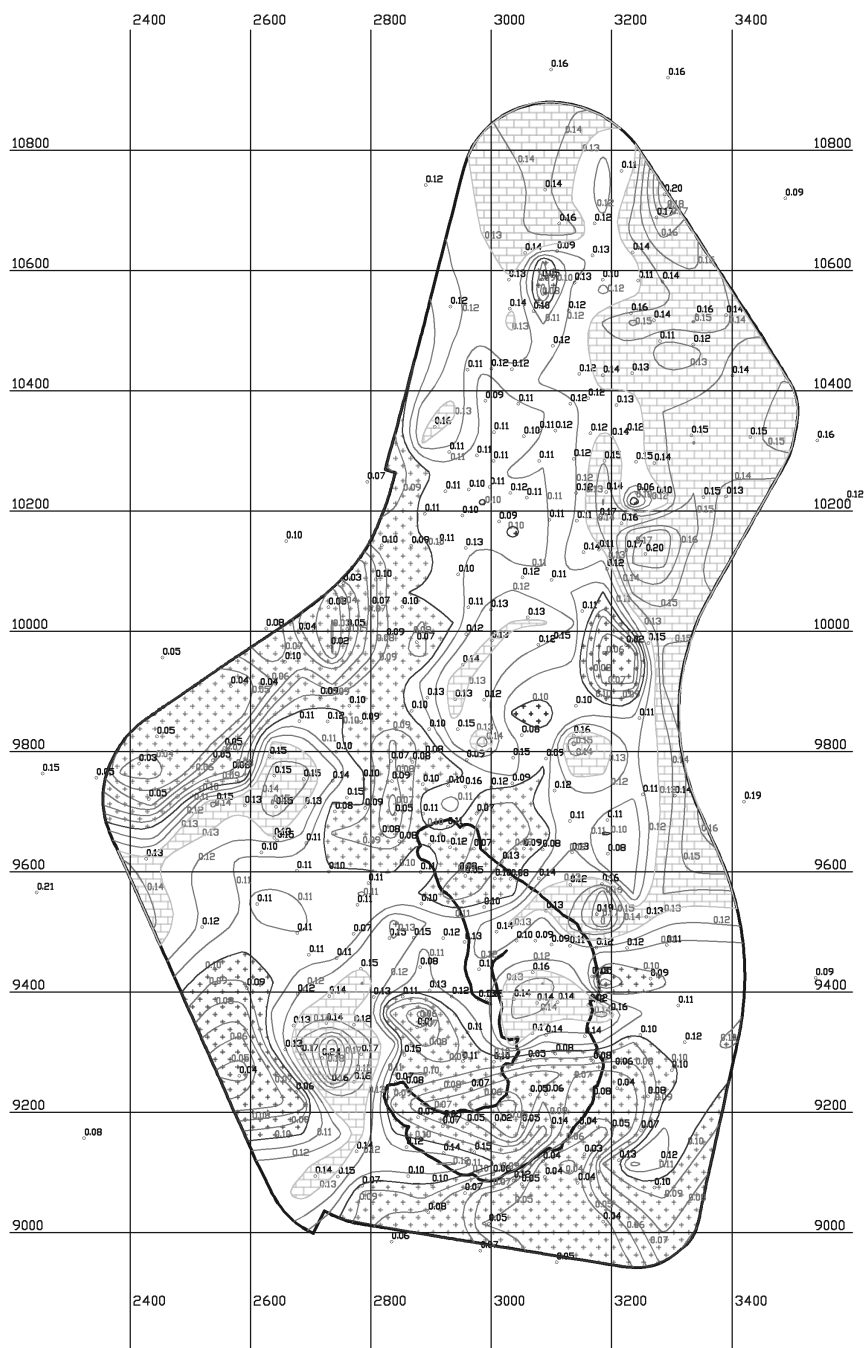



Рис. 3. Блочная модель участка с атрибутивными данными
 Fig. 3. Block model of site with attribute data



 — зона с повышенным содержанием ванадия ($V_{2O_5} > 0,13\%$)

• - зона с пониженным содержанием ванадия ($V_{2O_5} < 0,1\%$)

Рис. 4. Распределение содержания ванадия на горизонте +160 м Северного карьера
 Fig. 4. Distribution of vanadium content on Level +160 m in Severny open pit

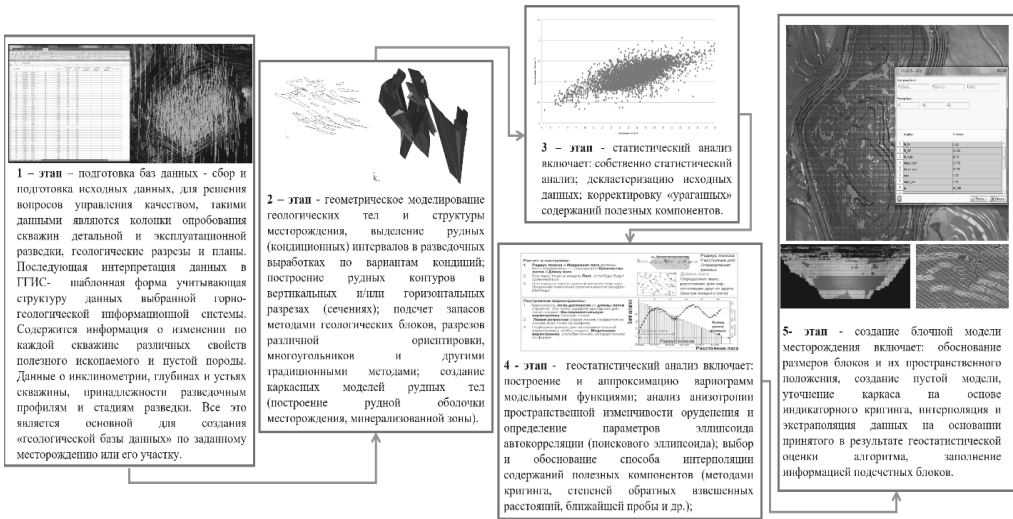


Рис. 5. Этапы геоинформационного моделирования
Fig. 5. Stages of geoinformation modeling

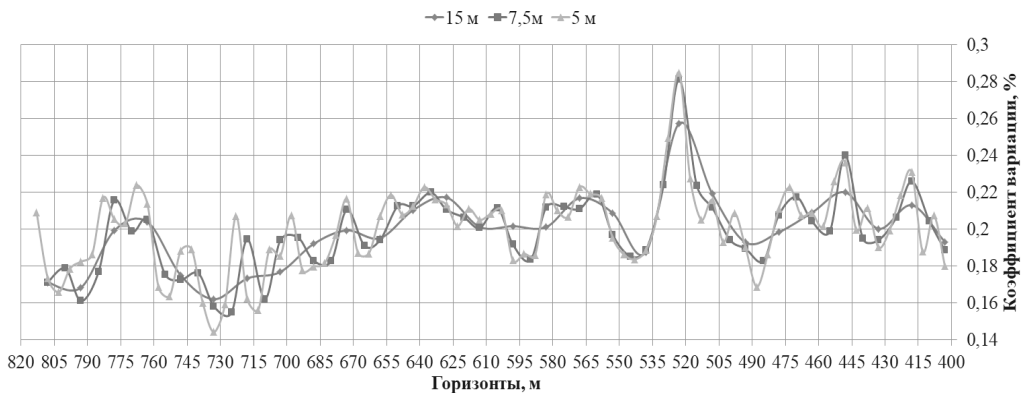


Рис. 6. Распределение коэффициентов вариации содержания ванадия на горизонтах
Fig. 6. Vanadium content variation factors per levels

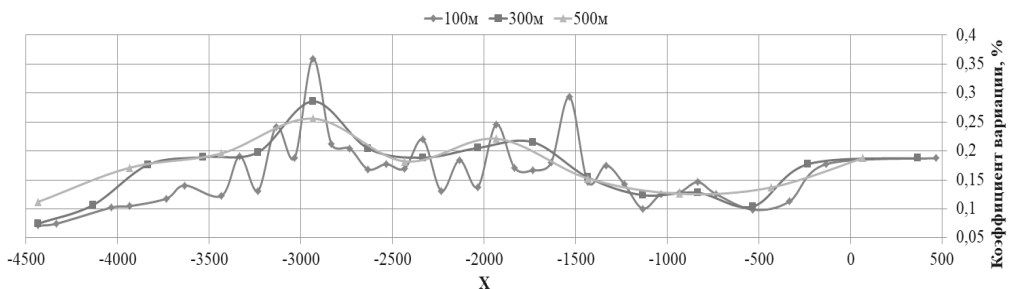


Рис. 7. Распределение коэффициентов вариации ванадия при ориентации фронта горных работ вдоль короткой оси – X
Fig. 7. Vanadium content variation factors in orientation of mining front along short axis X

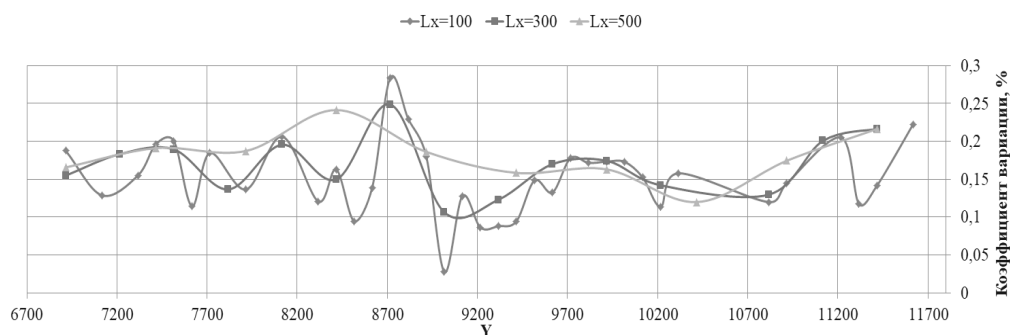


Рис. 8. Распределение коэффициентов вариации ванадия при ориентации фронта горных работ вдоль длинной оси – Y

Fig. 8. Vanadium content variation factors in orientation of mining front along long axis Y

заключается в разбиении месторождения на участки со сравнительно однородным или, наоборот, максимально неоднородным качественным составом.

Установлено, что в случае закономерного размещения показателей, характеризующих качество руды в недрах, т. е. при низкочастотном спектре их дисперсии, возникает необходимость в выборе направления развития фронта работ. При малой ковариации показателей качества подобный выбор не дает существенного технологического или экономического эффекта [11 – 12].

На рис. 6–8 представлены графики изменения коэффициентов вариации по горизонтам отработки при различных значениях высоты уступа (5, 7,5 и 15 м) и ориентации фронта горных работ.

Участки с максимальным отклонением значений коэффициента вариации от синего графика (рис. 6, уступ высотой 15 м) или резкими амплитудными колебаниями (+790...+760 м, +535...+505 м) являются перспективными для управления качеством и использования системы внутрикарьерного усреднения, либо технических приемов управления качеством (подуступы, селективная выемка).

При оценке дополнительно рекомендуется учитывать гистограмму распределения полезного компонента в перспективных для управления качеством участках месторождения и количество геоданных, например, при двухмодальном виде распределения полезного компонента рекомендуется выделить дополнительные сорта или типы руды.

Выводы

Для оценки качественных характеристик руд и учета движения запасов месторождения разработана методика геометризации качественных характеристик ПИ с учетом их изменчивости. Основа разработанной методики заключается в поэтапном исследовании данных геологического опробования с экспресс-анализом геологической базы данных автоматизированными средствами Python, построением цифротопографических моделей поверхностей, отвалов, каркасных моделей горных выработок и тел полезных ископаемых. С получением финального результата в виде блочной модели и большого количества атрибутивных данных, их совокупный учет позволяет повысить эффективность планирования горных работ в режиме управления качеством сырья.

Методика апробирована при оценке изменчивости качественных характеристик титаномагнетитовой руды. При этом установлена максимальная амплитуда колебаний качества в зоне координатных отметок — Z: 520...535, X: — 3000...-2700, Y: 8600...8800. Максимальная частота колебаний качества отмечена по глубине разработки, а наименьшая — по оси X вкрест простирания рудного тела. Анализ показал, что коэффициенты вариации качественных показателей менее 33 %, поэтому для стабилизации качества руды рекомендуется использовать внутрикарьерные перегрузочные склады с функцией усреднения в зависимости от требуемого среднего

содержания на обогатительном переделе. В участках максимальных амплитуд качества рекомендуется произвести доразведку участков месторождения, т. к. возможно высокие значения изменчивости связаны с недостаточной изученностью массива в данных координатных отметках.

Дальнейшие исследования предполагается сосредоточить на анализе данных годового планирования и формировании в автоматизированном режиме годового плана развития горных работ, а также поиске новых статистических и экономических критериев по оценке качества сырья и комплексного использования недр.

СПИСОК 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/ В. Л. Яковлев // Проблемы недропользования [электронный ресурс]: рецензируемое сетевое периодическое научное издание/ ИГД УрО РАН. — 2017. — № 2. — С.5 — 14. — режим доступа: // trud.igduran.ru.
2. Корнилков С. В. Прогноз качественных показателей добываемого сырья на основе геоинформационных технологий / Корнилков С. В., Аленичев В. М., Лаптев Ю. В., Яковлев А. М. // Горный журнал. 2017. № 12. С. 10 — 15.
3. Кантемиров В. Д. Возможности компьютерного моделирования для решения вопросов управления качеством минерального сырья/ В. Д. Кантемиров, Р. С. Титов, А. М. Яковлев // Проблемы недропользования [Электронный ресурс]: рецензируемое сетевое периодическое научное издание/ ИГД УрО РАН. — 2016. — № 4. — С. 170 — 176 — Режим доступа: // trud.igduran.ru.
4. Туртыгина Н. А., Охрименко А. В., Ковальчук А. А., Калашников К. А. Планирование горных работ как организационный способ управления качеством минерального сырья в рудничной системе // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2018. — № 517. — С. 3 — 11
5. Наговицын О. В. Лукичев С. В., Алисов А. Ю. Решение задач проектирования и планирования открытых горных работ в системе MineFrame // Записки Горного Института. — 2012. — № 198. — С. 49 — 54
6. Topal, E. and Ramazan, S. Strategic mine planning model using network flow model and real case application. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, vol. 26, no. 1., 2012, pp. 29 — 37.
7. Lamghari A., Dimitrakopoulos R., and Ferland J. A. A hybrid method based on linear programming and variable neighborhood descent for scheduling production in open-pit mines. Journal of Global Optimization, vol. 63, no. 3., 2015, pp. 555 — 582.
8. Jélvez, E., Morales, N., Nancel-Penard, P., Peypouquet, J., and Reyes, P. Aggregation heuristic for the open-pit block scheduling problem. European Journal of Operational Research, vol. 240. 2015.pp. 1169 — 1177. doi: 10.1016/j.ejor.2015.10.044

9. Samui P., Kumari S., Vladimir M, Kurup P. Modeling in Geotechnical Engineering. Academic Press, 2020, 516p.
10. Dauphine A. Geographical Models with Mathematica. ISTE Press – Elsevier, 2017, 314p.
11. Samavati M., Essam D., Nehring M., Sarker R. A new methodology for the open-pit mine production scheduling problem // Omega 2018, 81, pp.169–182.
12. Nelis G., Morales N., Widzyk-Capehart E. Comparison of different approaches to strategic open-pit mine planning under geological uncertainty // In Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection – MPES 2018, Widzyk-Capehart, E., Hekmat, A., Singhal, R., Eds., Springer: Cham, Switzerland, 2019, pp. 95–105. **TMAS**

REFERENCE

1. Yakovlev V. L. *Issledovanie perekhodnykh processov novykh metodologicheskij podhod k razrabotke i razvitiyu innovacionnykh tekhnologij dobychi i rudopodgotovki mineral'no gosyr'ya pri osvoenii glubokozalezgayushchih slozhnostrukturnykh mestorozhdenij* [Research of transition processes – a new methodological approach to the development and development of innovative technologies for mining and ore preparation of mineral raw materials in the development of deep-lying complex-structured deposits]. Problemy nedropol'zovaniya [elektronnyj resurs]: recenziruemoesetevoeperiodicheskoe nauchnoe izdanie. IGD UrO RAN. 2017. no. 2. pp. 5–14. rezhim dostupa: . trud.igduran.ru. [In Russ]
2. Kornilkov S. V., Alenichev V. M., Laptev Yu. V., Yakovlev A. M. Forecast of quality indicators of extracted raw materials on the basis of geoinformation technologies. *Gornyj zhurnal*. 2017. no. 12. S. 10–15. [In Russ]
3. Kantemirov V. D., Titov R. S., Yakovlev A. M. *Vozmozhnost kompyuternogo modelirovaniya dlya resheniya voprosov upravleniya kachestvom mineral'no gosyr'ya* [Possibilities of computer modeling for solving problems of quality management of mineral raw materials]. Problemy nedropol'zovaniya [Elektronnyj resurs]: recenziruemoesetevoeperiodicheskoe nauchnoe izdanie/ IGD UrO RAN. 2016. no. 4. pp. 170–176 Rezhim dostupa: . trud.igduran.ru. [In Russ]
4. Turtygina N. A., Ohrimenko A. V., Koval'chuk A. A., Kalashnikov K. A. Mining planning as an organizational way to manage the quality of mineral raw materials in the mining system. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018. no. S17. pp. 3–11 [In Russ]
5. Nagovicyn O. V. Lukichev S. V., Alisov A. Yu. Solving problems of design and planning of open pit mining operations in the MineFrame system. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2012. no. 198. pp. 49–54 [In Russ]
6. Topal, E. and Ramazan, S. Strategic mine planning model using network flow model and real case application. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, vol. 26, no. 1., 2012, pp. 29–37.
7. Lamghari A., Dimitrakopoulos R., and Ferland J. A. A hybrid method based on linear programming and variable neighborhood descent for scheduling production in open-pit mines. *Journal of Global Optimization*, vol. 63, no. 3., 2015, pp. 555–582.
8. Jélvez, E., Morales, N., Nancel-Penard, P., Peypouquet, J., and Reyes, P. Aggregation heuristic for the open-pit block scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, vol. 240. 2015. pp. 1169–1177. doi: 10.1016/j.ejor.2015.10.044
9. Samui P., Kumari S., Vladimir M, Kurup P. Modeling in Geotechnical Engineering. Academic Press, 2020, 516p.
10. Dauphine A. Geographical Models with Mathematica. ISTE Press Elsevier, 2017, 314 p.
11. Samavati M., Essam D., Nehring M., Sarker R. A new methodology for the open-pit mine production scheduling problem. Omega 2018, 81, pp.169–182.

12. Nelis G., Morales N., Widzyk-Capehart E. Comparison of different approaches to strategic open-pit mine planning under geological uncertainty. In Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection – MPES 2018, Widzyk-Capehart, E., Hekmat, A., Singhal, R., Eds., Springer: Cham, Switzerland, 2019, pp. 95 – 105.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Яковлев Андрей Михайлович – старший научный сотрудник, сектор Управления качеством минерального сырья, Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия, quality@igduran.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yakovlev A. M., researcher, Quality management sector, Institute of Mining of Ural branch of RAS, Ekaterinburg, Russia, quality@igduran.ru.

Получена редакцией 15.12.2020; получена после рецензии 18.02.2021; принята к печати 10.04.2021.

Received by the editors 15.12.2020; received after the review 18.02.2021; accepted for printing 10.04.2021.

