

АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ БАЗ ДАННЫХ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО

А. М. Яковлев

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

Аннотация: Ужесточение требований к качеству минерального сырья и продуктам обогащенного передела перерабатывающей промышленностью, а также тенденции к падению средних содержаний полезных компонентов, росту вредных примесей, увеличению глубины отработки и расстояний транспортирования, требуют современных подходов к оценке георесурсов, комплексному их освоению и повышению экономической эффективности горных работ. Приведены результаты исследований по автоматизированной обработке геологической информации детальной и эксплуатационной разведки в унифицированном формате баз данных современных горно-геологических информационных систем для решения задач управления качеством и планирования развития горных работ. Рассмотрен алгоритм экспресс-оценки изменчивости атрибутивных признаков качества полезного ископаемого на основе общедоступных программ учета информации и высокоуровневого языка программирования Python. Моделированием выполнен анализ изменения оцениваемых параметров качества полезного ископаемого в различных направлениях отработки месторождения (продольное, поперечное) с участками, характеризующимися разным шагом подвигания фронта горных работ и длиной экскаваторных блоков. Установлена корреляционная связь между количеством скважин и интервалами опробования с расчетными значениями коэффициентов вариации. Для различных значений коэффициента вариации и степени сложности контактов «руда-порода» предложены соответствующие схемы управления качеством ПИ.

Ключевые слова: геоинформатика, геологические базы данных, моделирование, планирование горных работ, управление качеством минерального сырья, автоматизация, экспресс-оценка, геометризация.

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. Апробация алгоритмов автоматизированной обработки геологических баз данных в технологических схемах управления качеством полезного ископаемого // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5–1. – С. 248–257. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_248.

Testing of algorithms for automated processing of geological databases in mineral quality control flowcharts

A. M. Yakovlev

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

Abstract: The toughened requirements imposed on the quality of minerals and processing products, as well as the tendency of drop in the average contents of useful components, increase in harmful impurities, growing mining depths and haulage distances call for modern approaches to the appraisal of geo-resources, to the integrated management and to enhancement of mining efficiency. The article presents the research results on automated processing of detailed and operational exploration information in a unified format of databases of modern mining and geological information systems for solving problems connected with mining quality management and planning. The express analysis algorithm of the variability of mineral quality attributes is based on public information programs and on the high-level programming language Python. Modeling is used to analyze the change in the estimate parameters of mineral quality in different directions of mine field development (longitudinal, transverse) with sections characterized by different steps of mining front advance and excavation panel lengths. The number of wells and sampling intervals are correlated with the calculated coefficients of variation. The mineral quality control flowcharts are proposed for different coefficients of variation and degrees of complexity of ore–rock interfaces.

Key words: geoinformation science, geological databases, modeling, mine planning, mineral quality management, automation, express-analysis, geometrization.

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. Testing of algorithms for automated processing of geological databases in mineral quality control flowcharts. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5–1):248–257. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_248.

Введение

На горнодобывающих предприятиях в связи с ухудшением горно-геологических условий и истощением минерально-сырьевой базы все чаще требуются новые подходы к ведению горных работ и их планированию:

- применение горно-геологических информационных систем (ГГИС);

- автоматизированных технологий диспетчеризации;

- опробования, основанного на различных физических методах;

- систем управления качеством — нагрузка на забои, внутрикарьерные склады, мобильные комплексы и обо-

рудование в карьере для отделения пустых пород и снижения затрат на транспортирование и многое другое.

В то же время, имеют место негативные последствия, в т. ч., затраты на внедрение передовых технологий могут оказаться значительными, и их внедрение сделает предприятие нерентабельным в глазах инвесторов и/или владельцев[1].

Предлагаемая в статье методика позволяет произвести экспресс-оценку месторождения, выделить перспективные для отработки участки, спланировать стратегию и тактику развития горных работ, используя в качестве

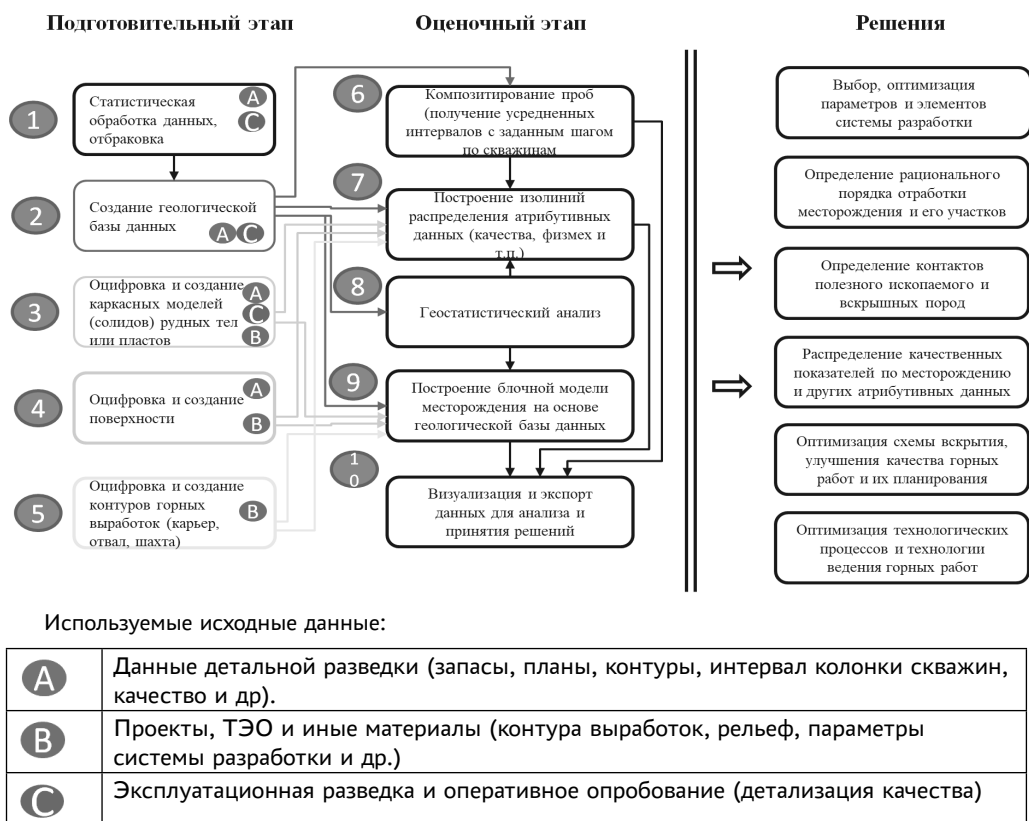


Рис. 1. Задачи, решаемые с применением ГГИС

Fig. 1. Problems solvable using Mining and Geology Information System (MGIS)

критерия выбора любой расчетный атрибутивный показатель: содержание полезного компонента, физико-механические свойства, коэффициент вскрыши и т. п.

Задачи, решаемые с применением ГГИС приведены на рис. 1 в разделе «Решения» [2–3].

Описание

Основной для автоматизированной экспресс-оценки является геологическая база данных формата современных ГГИС [4–5], состоящая из интервальных данных скважинного опробования с привязкой к некоей системе координат и атрибутивных данных. Данными могут быть не только данные деталь-

ной или эксплуатационной разведки, но и заметки персонала, если сырье обладает визуально или инструментально отличительными свойствами, условием привязки являются лишь координаты и атрибутивный признак, например, данные химического анализа, трещиноватость, средний размер куска и т. п.

Алгоритм экспресс оценки состоит из следующих этапов:

1- Подготовка исходных данных, таблица формата Excel.

2- Расчет и визуализация результата с применением высокоуровневого языка программирования Python (выбран по причине большого количества бесплатных модулей для ана-

№ сектора	Х от	Х до	У от	У до	Кол-во скважин	Содержание полезного компонента					
						Среднее, %	Квар, %	Медиана, %	Кол-во проб, шт.	Мин., %	Макс., %
1	2124	2624	8618	9118	47	14,3	21,0	15,1	706	7,09	26,7
2	2124	2624	9118	9618	66	14,2	22,3	14,7	1066	7,02	29,1
3	2124	2624	9618	10118	137	15,6	13,6	15,8	2050	7,03	22
4	2124	2624	10118	10618	6	13,3	28,4	14,1	53	7,2	20,06
5	2624	3124	8618	9118	160	14,7	16,5	14,9	2297	7,08	28
6	2624	3124	9118	9618	264	15,8	15,6	15,9	4438	7,08	26,55
7	2624	3124	9618	10118	284	15,1	17,1	15,3	4834	7,02	27,8
8	2624	3124	10118	10618	182	15,2	14,8	15,5	3531	7,1	26,3
9	2624	3124	10618	11118	59	15,3	16,3	15,5	890	7,06	30,7
10	2624	3124	11118	11618	2	14,3	21,3	15,6	8	8,3	17,2
11	2624	3124	11618	12118	1	17,2	14,4	17,7	33	7,2	20,3
12	2624	3124	12118	12618	1	11,0	31,2	10,5	9	8	18
13	3124	3624	8618	9118	93	15,2	23,0	15,2	1298	7,1	58,6
14	3124	3624	9118	9618	150	16,1	19,6	16,0	2247	7,1	52,5
15	3124	3624	9618	10118	108	16,1	18,4	16,3	1591	7,1	33,8
16	3124	3624	10118	10618	201	15,9	17,7	16,3	3654	7,03	40,1
17	3124	3624	10618	11118	106	16,0	18,7	16,3	1925	7,2	30,9
18	3124	3624	11118	11618	6	15,6	20,2	16,7	121	7,02	23,82
19	3124	3624	11618	12118	3	13,4	20,3	13,0	65	8	18,5
20	3624	4124	10118	10618	4	11,8	24,7	12,0	86	7,19	18,71
21	3624	4124	10618	11118	3	11,0	19,9	11,0	61	7,1	17,1

Рисунок 2. Фрагмент таблицы данных после автоматизированной программной обработки, промежуточный итог
 Fig. 2. A fragment of data table after automated processing. A sub-total

500x500

лиза данных, простоты и доступности информации).

Расчет выполняется в автоматическом режиме после ввода человеком-оператором исследуемых параметров:

- в исходные данные заносятся необходимые атрибутивные данные, в том числе пометки геолого-маркшейдерской службы об особенностях разрабатываемых пород, при необходимости можно использовать маску из математических выражений;

- задаются показатели определяющие объем участка: ширина блока, шаг подвигания горных работ, высота уступа;

- производится выделение характерных признаков каждого блока (качественные показатели ПИ и статистическая оценка колебаний качества ПИ): при этом используются либо алгоритмы интерполяции (триангуляция, метод обратных расстояний, варианты кригинга), либо средние значения по скважинам в блоке. Другой подход к выделению характерных признаков блока (находится в разработке) заключается в сравнении спектра сигналов (формы и параметров распределения) атрибутивных данных и составлении матрицы исследуемых блоков на основе корреляционных отношений;

- автоматически (программными средствами) выдаются рекомендации по оптимизации календарного плана горных работ и выбора рационального способа отработки, например, для экскаваторного блока рекомендуются варианты: валовая выемка, отдельная добыча, селективная выемка, применение подступов;

- программой составляется оптимальный план набора участков горных работ для получения заданного среднего значения содержания полезного компонента (или других атрибутивных данных) при минимальной дисперсии (см. рис. 2).

В рассматриваемом примере данные детальной разведки: скважины и интервалы опробования были разделены по пространственным блокам с подсчетом статистических характеристик. В качестве категориальных критериев были выбраны среднее содержание полезного компонента и его коэффициент вариации — как показатель, характеризующий однородность данных.

Были проанализированы различные направления отработки месторождения (продольное, поперечное) с участками, характеризующимися разным шагом подвигания фронта горных работ и длиной экскаваторных блоков.

Результаты

Результаты моделирования представлены на рис. 3—5 и в табл. 1.

Отмечено, что существует сильная корреляционная связь между количеством скважин и интервалов опробования с расчетными значениями коэффициентов вариации, при увеличении числа проб коэффициент вариации снижается к среднему по месторождению [6—9].

Наиболее охваченный разведкой участок месторождения приходится на отметки от 8868 до 10367 м по оси Y и от 2374 до 2874 м по оси X. Участки с небольшим количеством скважин и высоким коэффициентом вариации — приоритетная цель для эксплуатационной разведки, чем больше коэффициент вариации относительно среднего по месторождению и меньше количество разведочных скважин, тем выше приоритет. Согласно используемой для примера геологической базы данных прослеживается четкая корреляция увеличения количества данных и снижения коэффициента вариации до некоего среднего для месторождения предела. К началу горных работ на данных участках следует произве-

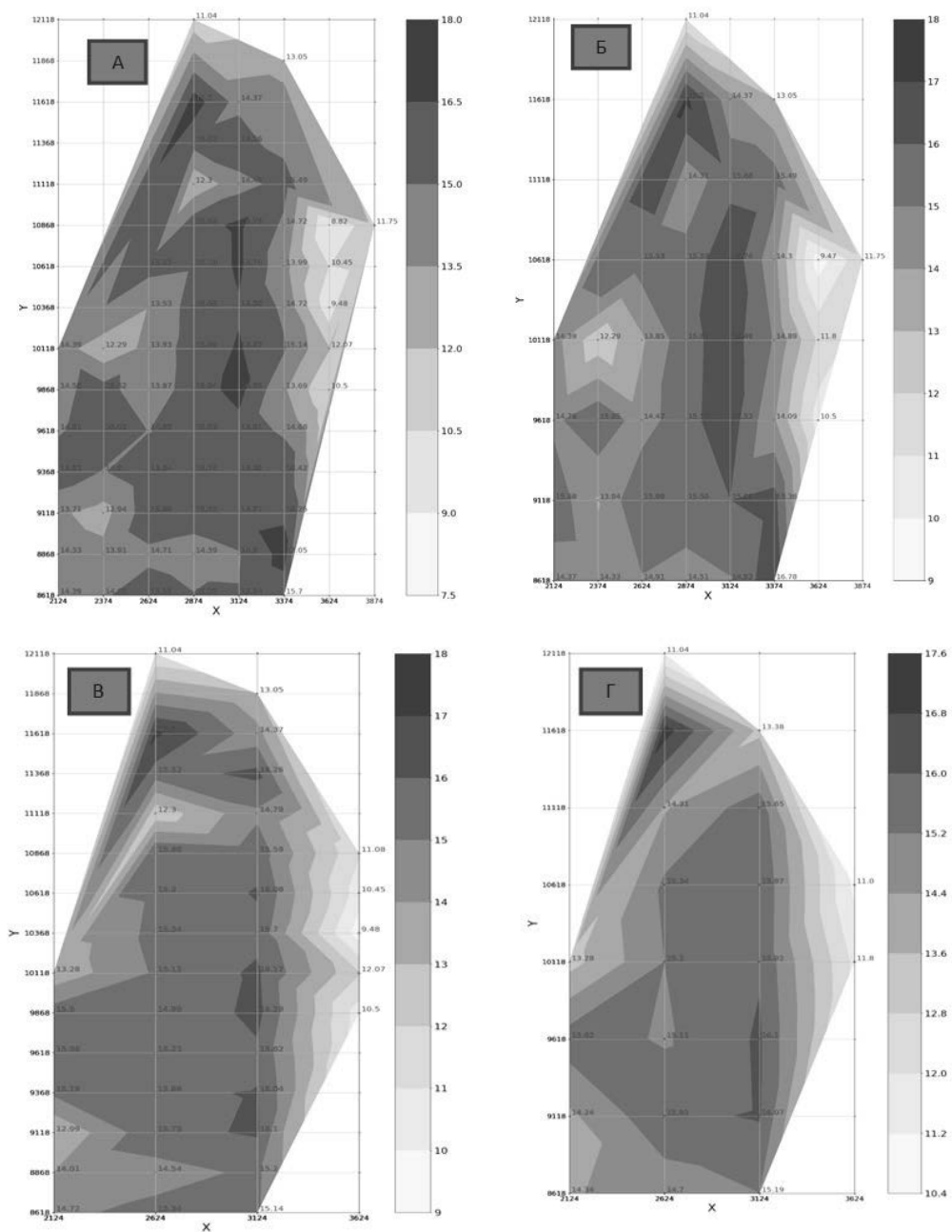


Рис. 3. Изменчивость содержания полезного компонента при различных вариантах развития горных работ. Варианты длины экскаваторного блока (дл. экс. бл.) и шага подвигания горных работ (ш. под. г. р.): А – 250×250 м, Б – 250×500 м, В – 500×250 м, Г – 500×500 м

Fig. 3. Variable contents of useful component per different mining scenarios. Variants of excavation panel length×mining front advance: (a) 250×250 m; (b) 250×500 m; (c) 500×250 m; (d) 500×500 m

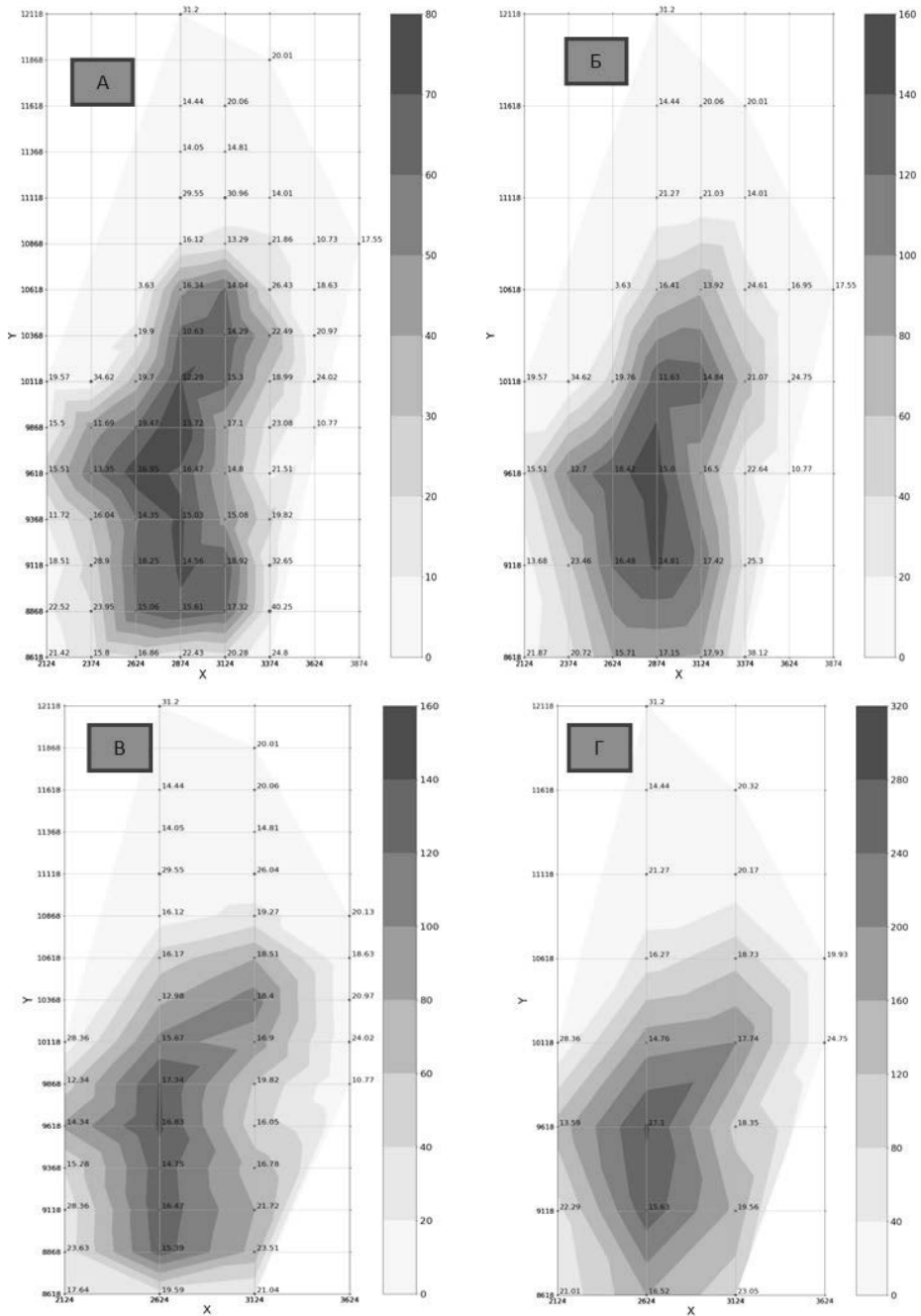


Рис. 4. Разведанность месторождения, отраженная в количестве скважин на условный участок, числами отражены коэффициенты вариации содержания ПК. Варианты дл. экс. бл. и ш. подв. г. р.: А – 250×250 м, Б – 250×500 м, В – 500×250 м, Г – 500×500 м
 Fig. 4. Extent of exploration in terms of number of wells per conditional operating site; figures mean coefficients of variation in content of useful component. Variants of excavation panel length×mining front advance: (a) 250×250 m; (b) 250×500 m; (c) 500×250 m; (d) 500×500 m

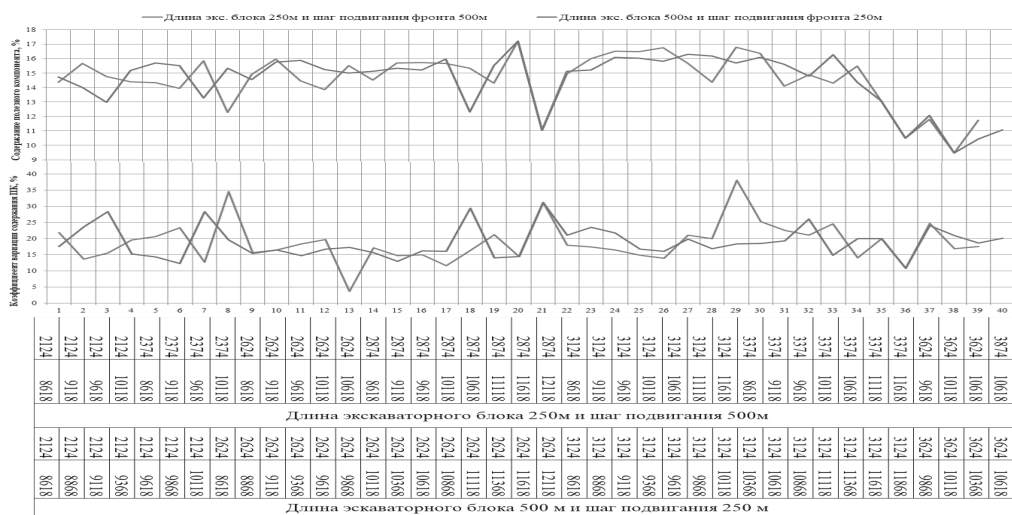


Рис. 5. Сравнение динамики средних содержаний полезного компонента и коэффициента вариации содержания полезного компонента для поиска оптимального варианта развития горных работ

Fig. 5. Dynamics of mean contents of useful component and the coefficients of variation for mining scenario optimization

Таблица 1

Оцениваемые статистические параметры при разных вариантах развития горных работ
Estimated statistical parameters in different mining scenarios

Параметры	Варианты длины экскаваторного блока и шага подвигания горных работ			
	250×500 м	500×250 м	500×500 м	250×250 м
Среднее содержание, %	14,59	14,52	14,63	14,7
Средний коэффициент вариации, %	18,86	18,95	19,76	18,68
Коэффициент вариации по участкам, %	12,25	13,04	11,52	12,19

сти детальный анализ геологической информации с целью определить наиболее рациональный вариант методов управления качеством и общий директивный подход: сепарация или усреднение. При высоких значениях коэффициента вариации, отсутствии четких контактов между технологическими сортами руд необходимо предусмотреть усреднение. В случае сложного определения контактов руда — порода необходимо предусмотреть варианты с предобогащением руды в карьере для снижения затрат на транспорти-

ровку или проведение геофизических исследований [10–12].

Анализ коэффициентов вариации качества при различных направлениях отработки показал в среднем примерно одинаковые значения, но на графиках (см. рис. 5) видно, что самое рациональное решение — использовать комбинацию с разными размерами блока и переменным шагом подвигания горных работ.

Выводы

Применение предложенного алгоритма для оптимизации качествен-

ных показателей заданного объема при переходе от модели пространства к модели календарного плана позволяет определить его место и порядок обработки во времени.

Методика более актуальна для сложноструктурных месторождений с высокой изменчивостью качества полезных ископаемых и большим количеством типов и сортов.

Дальнейшее развитие метода предполагает автоматизированный поиск на месторождении участков требуемого объема и качества, а также их увязку в календарный план-график по заданным целевым критериям: минимальный коэффициент вскрыши, содержание выше или ниже указанного, корреляционная взаимосвязь и выделение групп.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Яковлев В. Л., Корнилков С. В., Соколов И. В. Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья / под ред. чл.-кор. РАН В. Л. Яковлева // Екатеринбург: УрО РАН, 2018. 360 с. DOI:10.25635/ИМ.2018.18.37360
2. Яковлев В. Л. Исследование переходных процессов — новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов. Екатеринбург: УрО РАН, 2019. 284 с. DOI: 10.25635/ИМ.2020.54.57311
3. Кантемиров В. Д. Оценка качественных показателей полезных ископаемых с использованием геоинформационных технологий блочного моделирования / В. Д. Кантемиров, А. М. Яковлев, Р. С. Титов // Геоинформатика. — 2020. — № 3. — С. 29—37. DOI: 10.47148/1609—364X-2020—3-29—37
4. Проценко А. В., Байров Ж. Б., Федотов Г. С., Зартемова Л. Г. Использование экономических показателей в методике среднесрочного планирования горных работ в горно-геологической информационной системе Micromine // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2018. — № 8. — С. 208—216
5. Лукичев С. В., Наговицин О. В., Семенова И. Э., Белгородцев О. В. Mineframe — подходы к решению задач проектирования и планирования горных работ // Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий. Сборник научных трудов. Санкт-Петербург. — 2017. — № 198. — С. 50—59
6. Dowd P., Xu C., Coward S. Strategic Mine Planning and Design: Some Challenges and Strategies for Addressing Them // Min. Technol. 2016, 125, pp. 22—34
7. Dimitrakopoulos R. Advances in Applied Strategic Mine Planning. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2018; 800 p.
8. Seéguet S. A., Emery X. Géostatistique de Gisements de Cuivre Chiliens: 35 Années de Recherche Appliquée. Presses des Mines: Paris, France, 2019; 264 p.
9. Mery. N., Emery. X., Cáceres. A., Ribeiro. D., Cunha. E. Geostatistical modeling of the geological uncertainty in an iron ore deposit // Ore. Geol. Rev. 2017, 88, pp. 336—351.
10. Gholamnejad, J., Azimi, A., Teymouri, M. Application of stochastic programming for iron ore quality control. // Journal of Mining and Environment, 9(2), 2018, pp. 331—338. doi: 10.22044/jme.2018.5952.1409
11. R. Chicoisne, D. Espinoza, M. Goycoolea, E. Moreno, E. Rubio A new algorithm for the open-pit mine production scheduling problem // Oper. Res., 60 (3), 2012, pp. 517—528
12. N. L. Mai, E. Topal, O. Erten A new open-pit mine planning optimization method using block aggregation and integer programming // J. South. Afr. Inst. Min. Metall., 118 (2018) **ГИАБ**

REFERENCE

1. Yakovlev V. L., Kornilkov S. V., Sokolov I. V. *Innovacionnyj bazis strategii kompleksnogo osvoeniya resursov mineral'nogo syr'ya* [Innovative basis of the strategy of integrated development of mineral resources]. pod red. chl.-kor. RAN V. L. Yakovleva. Ekaterinburg: UrO RAN, 2018. 360 p. DOI:10.25635/IM.2018.18.37360 [In Russ]
2. Yakovlev V. L. *Issledovanie perekhodnyh processov novoe napravlenie v razvitiitii metodologii kompleksnogo osvoeniya georesursov* [Research of transition processes — a new direction in the development of the methodology of integrated development of geo-resources]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2019. 284 p. DOI: 10.25635/IM.2020.54.57311 [In Russ]
3. Kantemirov V. D., Yakovlev A. M., Titov R. S. Evaluation of quality indicators of mineral resources using geoinformation technologies of block modeling. *Geoinformatika*. 2020. no. 3. pp. 29–37. DOI: 10.47148/1609–364X-2020–3-29–37 [In Russ]
4. Procenko A. V., Bajrov ZH. B., Fedotov G. S., Zartenova L. G. The use of economic indicators in the methodology of medium-term planning of mining operations in the mining and geological information system Micromine. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018. no. 8. pp. 208–216 [In Russ]
5. Lukichev S. V., Nagovicin O. V., Semenova I. E., Belogorodcev O. V. *Mineframe podhody k resheniyu zadach proektirovaniya i planirovaniya gornyh rabot. Innovacionnye napravleniya v proektirovanii gornodobyvayushchih predpriyatij* [Mineframe-approaches to solving problems of mining design and planning]. Sborniknauchnyhtrudov. Sankt-Peterburg. 2017. no. 198. pp. 50–59 [In Russ]
6. Dowd P., Xu C., Coward S. Strategic Mine Planning and Design: Some Challenges and Strategies for Addressing Them. *Min. Technol.* 2016, 125, pp. 22–34
7. Dimitrakopoulos R. *Advances in Applied Strategic Mine Planning*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2018; 800 p.
8. Seéguret S. A., Emery X. *Géostatistique de Gisements de CuivreChiliens: 35 Années de Recherche Appliquée*. Presses des Mines: Paris, France, 2019; 264 p.
9. Mery N., Emery X., Cáceres A., Ribeiro D., Cunha E. Geostatistical modeling of the geological uncertainty in an iron ore deposit. *Ore. Geol. Rev.* 2017, 88, pp. 336–351.
10. Gholamnejad, J., Azimi, A., Teymouri, M. Application of stochastic programming for iron ore quality control. *Journal of Mining and Environment*, 9(2), 2018, pp. 331–338. doi: 10.22044/jme.2018.5952.1409.
11. R. Chicoisne, D. Espinoza, M. Goycoolea, E. Moreno, E. Rubio A new algorithm for the open-pit mine production scheduling problem. *Oper. Res.*, 60 (3), 2012, pp. 517–528
12. N. L. Mai, E. Topal, O. Erten A new open-pit mine planning optimization method using block aggregation and integer programming. *J. South. Afr. Inst. Min. Metall.*, 118 (2018).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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 15.02.2021; принята к печати 10.04.2021.

Received by the editors 15.12.2020; received after the review 15.02.2021; accepted for printing 10.04.2021.