

УДК [622.34:519.256]:519.72

Яковлев Андрей Михайлович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория управления качеством
минерального сырья,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: quality@igduran.ru

Кантемиров Валерий Данилович

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией управления качеством
минерального сырья,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: ukrkant@mail.ru

Титов Роман Сергеевич

старший научный сотрудник,
лаборатория управления качеством минераль-
ного сырья,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: ukrigd15@mail.ru

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ФРОНТОВ
ГОРНЫХ РАБОТ ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ
НА ОСНОВЕ ГГИС МОДЕЛИРОВАНИЯ
РАБОЧЕЙ ЗОНЫ***

Аннотация:

Ухудшение горнотехнических и горно-геологических условий добычи полезных ископаемых по мере понижения горных работ при отработке сложноструктурных месторождений требует создания инновационных методик, позволяющих на основе аудита состояния горных работ в карьере обеспечить планирование горных работ наиболее экономически эффективным способом. В статье приведены основы разработанной методики, позволяющей в автоматическом режиме оценить соотношение фронтов горных работ и качественные показатели запасов полезного ископаемого (ПИ) на рабочих горизонтах карьера. Целью работы является снижение трудоемкости и повышение качества процессов планирования горных работ. Более качественное планирование горных работ с учетом качества сырья позволяет увеличить степень извлечения ценных компонентов и более комплексно использовать минеральные ресурсы. Предложенная методика предназначена для автоматизированного планирования горных работ в режиме управления качеством сырья и позволяет определить резервы горного производства; установить преобладающий технологический сорт рудного сырья в анализируемых участках месторождения; выбрать рациональный способ добычи сырья с учетом его качества.

Ключевые слова: геометризация, геологические базы данных, геоинформационное моделирование, качество полезного ископаемого, блочное моделирование, планирование горных работ, резервы добычи.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.041

Yakovlev Andrei M.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Laboratory of quality management,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: quality@igduran.ru

Kantemirov Valery D.

Candidate of Technical Sciences,
Head of the Laboratory of quality management,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: ukrkant@mail.ru

Titov Roman S.

Senior Researcher,
Laboratory of quality management,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: ukrigd15@mail.ru

**METHODOLOGY FOR ASSESSING
THE FRONTS OF MINING OPERATIONS
OF DEEP QUARRIES BASED ON GGIS
MODELING OF THE WORKING AREA**

Abstract:

The deterioration of mining-engineering and mining-geological conditions of mineral extraction, when mining operations decrease during the development of complex-structured deposits, requires the creation of innovative techniques that allow, based on the audit of the state of mining operations in the quarry, to ensure the planning of mining operations in the most cost-effective way. The article presents the basics of the developed methodology, which allows to automatically assessing the ratio of mining fronts and qualitative indicators of mineral reserves (MR) on the working horizons of the quarry. The purpose of the work is to reduce the labor-complexity and improve the quality of planning processes for mining. Better planning of mining operations, taking into account the quality of raw materials, allows to increase the degree of extraction of valuable components and the more comprehensive use of mineral resources. The proposed methodology is intended for automated planning of mining operations in the raw material quality management mode and allows to determine the reserves of mining production, to establish the predominant technological grade of ore raw materials in the analyzed areas of the deposit, and to choose a rational method of extraction of raw materials, taking into account its quality.

Key words: geometrization, geological databases, geoinformation modeling, mineral quality, block modeling, mining planning.

* Исследования выполнены в рамках Госзадания №1, тема «Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем» (FUWE-2022-0005), пер. № 1021062010531-8-1.5.1.

Введение

В настоящее время сформировалась тенденция к ухудшению горнотехнических условий ведения горных работ на большинстве глубоких карьеров. Основными причинами является понижение горных работ и связанное с ним увеличение расстояний транспортирования горной массы. При этом из-за организационных и других факторов часто фиксируется отставание вскрышных работ на верхних горизонтах карьеров с большим количеством участков борта в консервации, что существенно ограничивает развитие добычных фронтов на нижележащих горизонтах и усложняет планирование горных работ [1 – 4]. Для решения этих проблем рекомендуются автоматизированные методы оценки текущего состояния горных работ и качества запасов в карьерах, позволяющие своевременно определить резервы горного производства, выделить направление и варианты интенсификации горных работ с учетом качества ПИ, учесть горнотехнические условия для оптимизации добычных работ по участкам карьера.

Материалы исследований

Реализация методик производится с применением разработанного геоинформационного обеспечения. Для оценки качества полезного ископаемого и состояния горных работ используются блочные и каркасные модели различных вариантов положения горных работ в карьере [5 – 10].

На рис. 1 представлена блок-схема методики геоинформационного моделирования качества руд и моделей месторождения. Исходными данными для моделирования являются данные геологической разведки: таблицы интервального опробования скважин, планы подсчета запасов и другая документация.

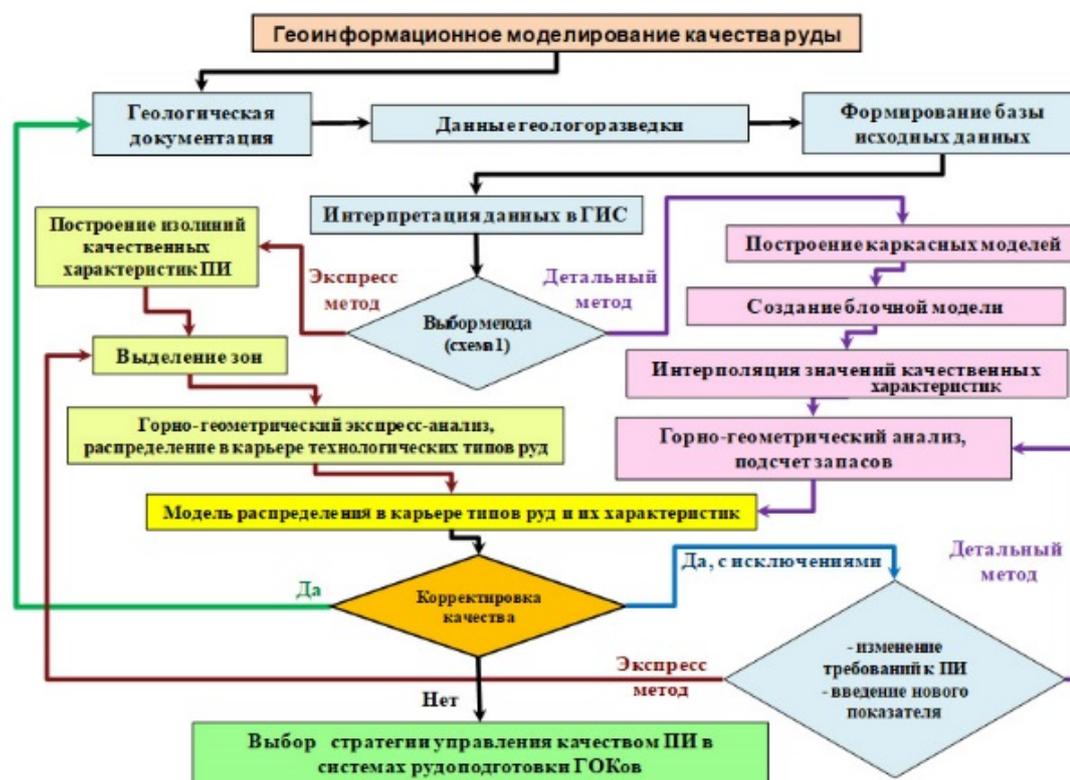


Рис. 1. Блок-схема методики геоинформационного моделирования качества руд

Краткое описание методики

1. Геометризация качественных характеристик ПИ производится с использованием программных продуктов горно-геологических информационных систем (ГГИС) (GEOVIA Surpac, Mineframe, Datamine и др.) на основе сформированной базы исходных данных. База исходных данных для создания блочной модели в ГГИС формируется из данных детальной и эксплуатационной разведки месторождения (участков), геофизического исследования массива, результатов дополнительных минералогических и других исследований кернов горных пород (см. рис.1).

2. Формирование базы исходных данных производится в форматах файлов программ Excel или Access. Производится оценка объема полученных данных и выбор метода их интерпретации в ГГИС для блочного моделирования.

3. Для интерпретации данных в ГГИС предлагается 2 основных метода: *экспресс- и детальный методы*. Оба метода требуют предварительного создания геологической базы данных и позволяют достоверно производить оценку и районирование в карьере руд по качественным признакам. Методы различаются трудоемкостью выполнения, детальностью и возможностью корректировок построенных моделей в зависимости от установленных или изменившихся требований к качеству полезного ископаемого. На рис. 1 представлена блок-схема методики выбора метода моделирования и интерпретации геоданных.

Выбор метода зависит от объема геоданных в сформированной базе, решаемых задач и сроков их выполнения.

Рекомендуются следующие варианты:

– при сравнительно *небольшом* объеме геоданных (блок, уступ, участок карьера) использовать экспресс-метод на основе метода обратных расстояний (детерминистический способ);

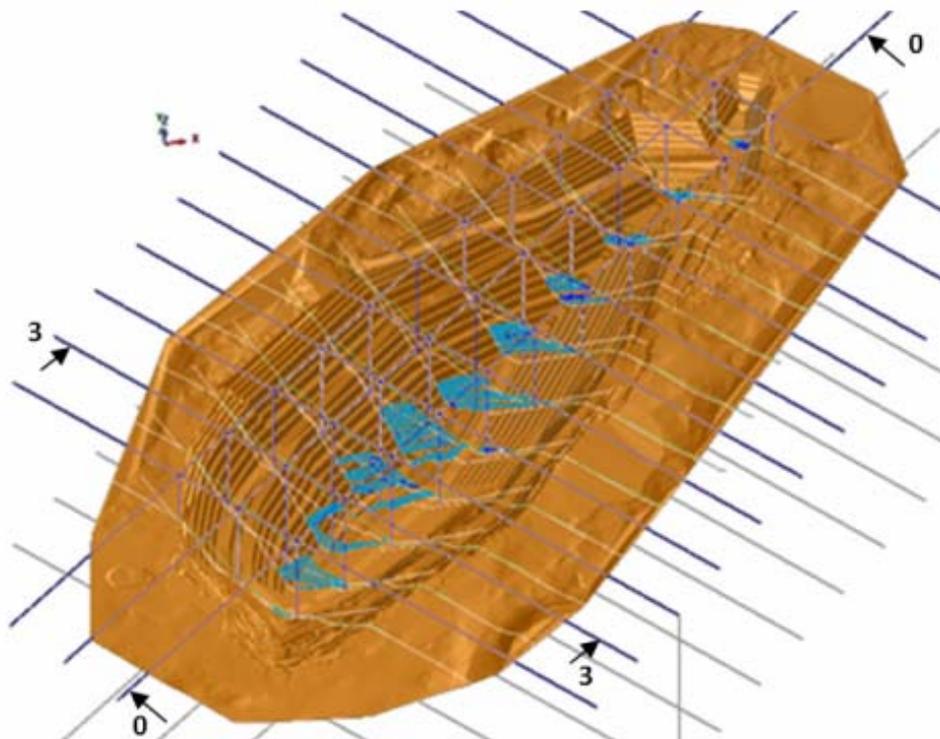
– при *большом* объеме исходных данных предлагается использовать детальный метод блочного моделирования на основе методов геостатистики (кригинга с линейной вариограммой).

В зависимости от масштаба изучаемого объекта предлагается использовать различные методы геоинформационного моделирования: экспресс-метод или детальный. Экспресс-метод используется для моделирования отдельных небольших блоков месторождения (экскаваторных, буровых и др.) или добычных горизонтов. Детальный метод позволяет оценить все месторождение на основе построения блочной модели и также используется для оценки резервов горного производства.

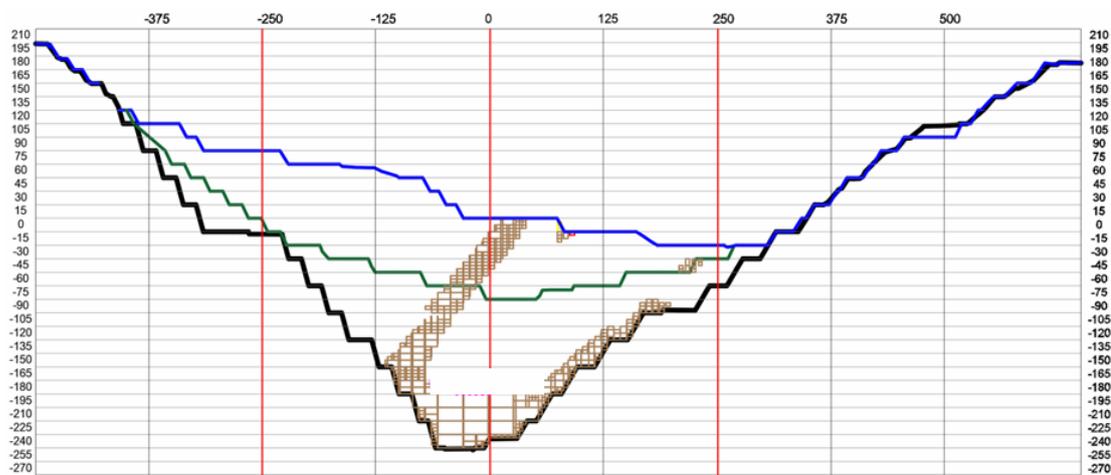
При использовании детального метода данные блочной модели выгружаются в виде центроидов микроблоков блочной модели. Для апробирования методики были использованы детальный метод и геоданные карьеров АО «Карельский окатыш». На базе блочной модели подготовлены 11 поперечных и 3 продольных разреза Западного карьера с шагом 250 м (рис. 2). Представлена нарезка профилей разрезов, необходимая для выполнения первичного горно-геометрического анализа, который показал, что основные запасы руды сосредоточены в глубинной части месторождения на глубоких горизонтах карьера. Полученная информация позволяет сделать вывод о сложном геолого-геоморфологическом строении участка месторождения. Для эффективного планирования добычи рекомендуется с помощью разработанной методики произвести аудит текущего состояния горных работ в карьере и наметить мероприятия по ликвидации оставания вскрышных работ на верхних горизонтах.

Суть аудита горных работ заключается в оценке соотношения типов фронтов (активный, погашенный, участки консервации) по горизонтам карьера и запасов в пределах конечного контура карьера. Такой подход позволяет установить возможное отставание вскрышных горных работ на рабочих горизонтах и определить резервы запасов руды с учетом качества и направления интенсификации добычи.

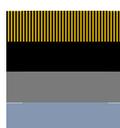
а)



б)



Условные обозначения:



руда;

граница проектного контура карьера;

вариант границы горных работ на 5-й год разработки карьера;

граница контура текущего положения горных работ в карьере (на 2021 г.);

а) план карьера в изометрии;

б) поперечный разрез карьера по профилю 3-3

Рис. 2. Профилирование месторождения для выполнения горно-геометрического анализа

Для снижения отставания вскрышных работ в глубоких карьерах рекомендуются следующие мероприятия [11]:

– поддержание фронта работ, обеспечивающего заданную производительность, качество сырья и коэффициент вскрыши;

- отработка запасов рабочими площадками переменной ширины с целью интенсификации горных работ в определенных участках рабочей зоны;
- этапная отработка участков месторождения с целью стабилизации качества сырья при минимальном коэффициенте вскрыши; выделенные участки обрабатывать секторами с сырьем одинакового качества;
- изменение места выемки и объемов горной массы по площади карьера с учетом обеспечения концентрации горного оборудования на выделенных участках.

Результаты исследований

Оценка состояния фронтов по горизонтам карьера производится на основе каркасных моделей – текущего положения горных работ в карьере и предельного проектного положения на конец отработки. С использованием ГИС производится построение погоризонтных планов. После этого они приводятся к типовому виду (рис. 3), где «слоями» (уровнями) и различными цветами в редакторе *.dxf файлов выделяются участки фронта горных работ, относящиеся к определенной категории:

- активный фронт: добычной или вскрышной (дает возможность осуществить подвигание участка фронта на горизонте);
- участки консервации – на них для подвигания уступа необходимо обеспечить разнос верхних горизонтов;
- погашенный фронт, т.е. участок, где уже достигнуто предельное проектное положение.

Профилирование месторождения позволяет выполнить первичную оценку следующих горно-геологических и горнотехнических условий разработки:

- объем запасов руды и морфологию ее залегания по рабочим горизонтам карьера;
- объем и текущий коэффициент вскрыши;
- качество руды и др.

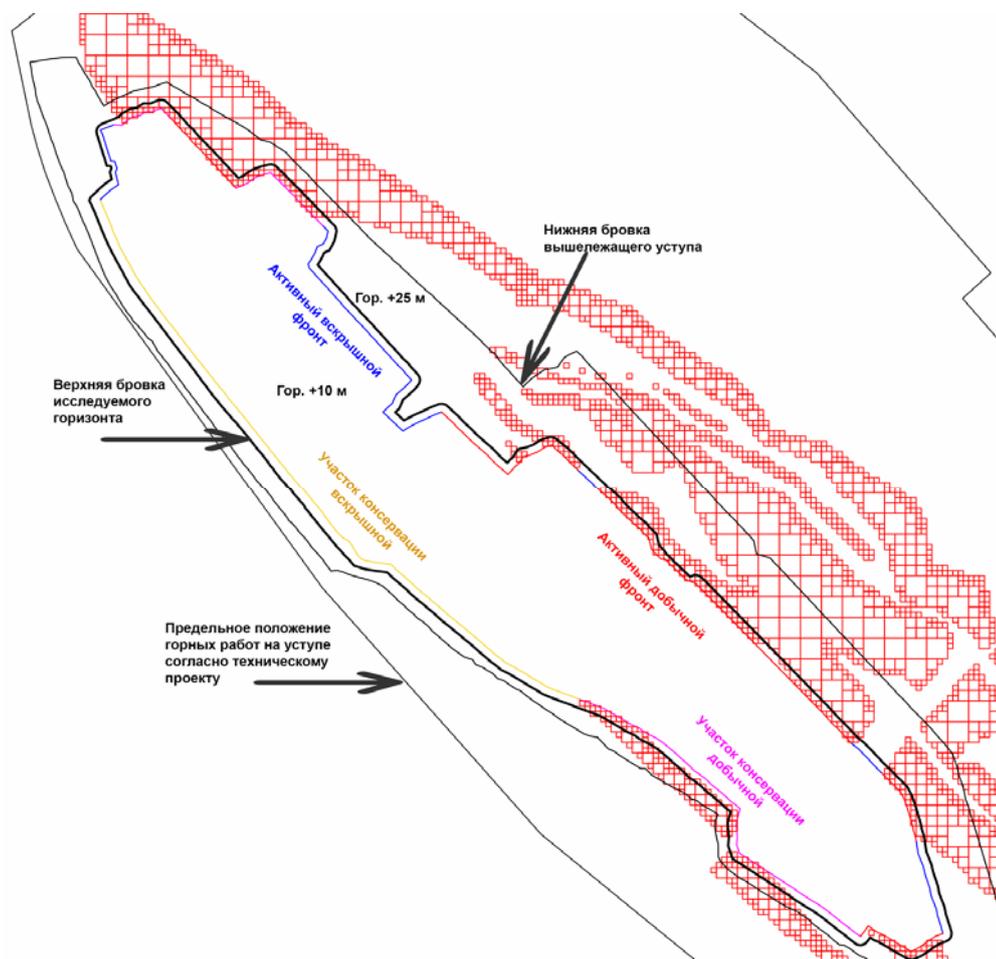
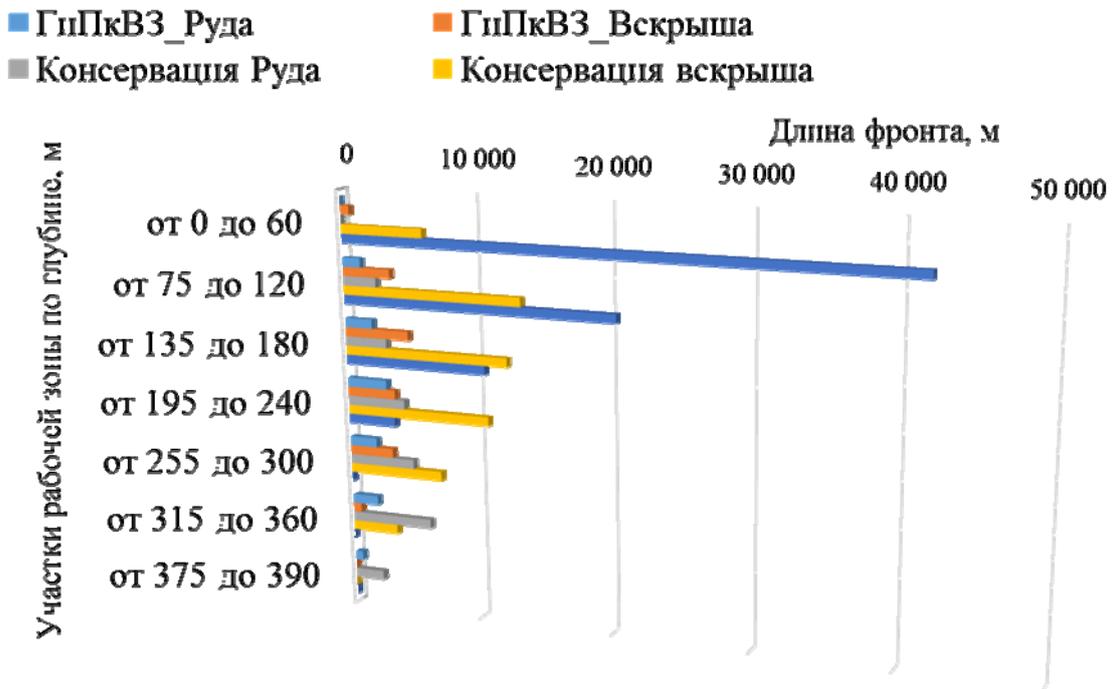


Рис. 3. Пример погоризонтного плана с выделенными типовыми зонами фронта горных работ

На следующем этапе моделирования производится автоматизированная программная обработка погоризонтных планов, учитывающая особенности конфигурации каждого горизонта (пример результатов обработки представлен на рис. 4) и дается детальная характеристика горнотехнических условий разработки.



ГипКВЗ – готовые и подготовленные к выемке запасы; высота анализируемого участка рабочей зоны – 60 м

Рис. 4. Анализ распределения типов фронтов по участкам рабочей зоны карьера

В разработанном программном обеспечении определяется качество руды по участкам фронтов на горизонтах (рис. 5), даются рекомендации для достижения выемочным оборудованием максимальной производительности для получения наибольшего экономического эффекта.

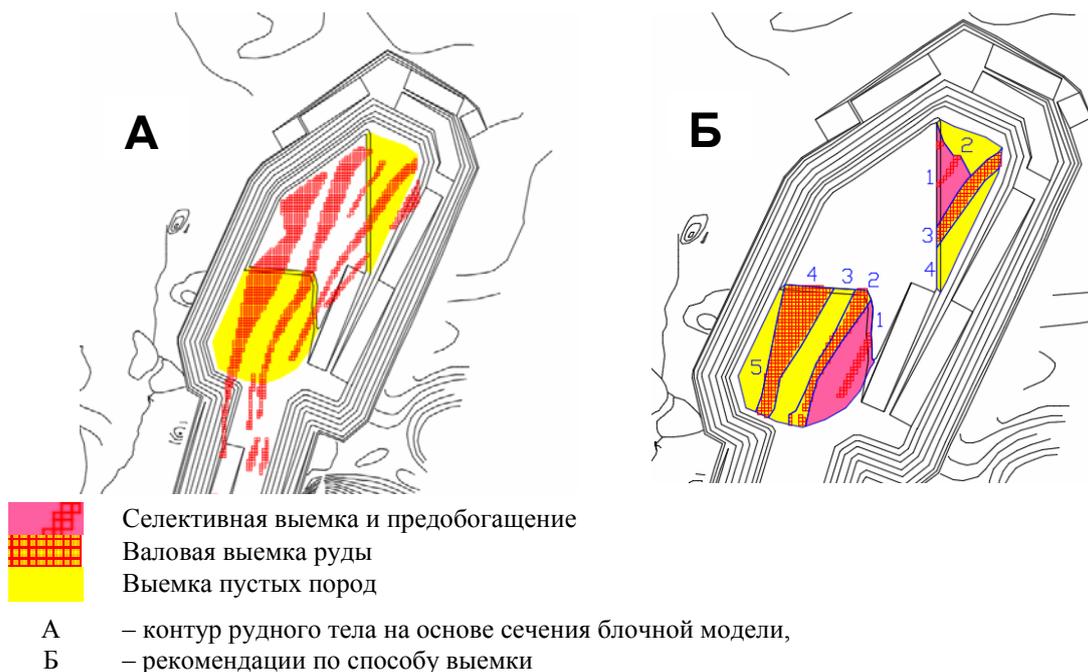


Рис. 5. Оценка качества запасов и выбор способа выемки в участках активного добычного фронта

С помощью представленной методики установлено, что на Центральном карьере АО «Карельский Окамыш» общая длина неактивного фронта горных работ составила 22,57 км, в т.ч. по руде – 5,87 км, по вскрыше – 16,7 км.

Для оценки качества руды по участкам фронта горных работ (см. рис. 5) первоначально в каждом блоке блочной модели производится сопоставление его с типом фронта на участках рабочей зоны мощностью 45 м (активный, в консервации и др.) и времени извлечения горной массы при различных направлениях разработки.

Далее программа рассчитывает качественные и статистические показатели добываемой горной массы. В основе алгоритма программы заложена функция взаимоотношения точек центровидов и многоугольников, представляющих границы этапов отработки участков горизонта по типам фронтов. Использована широко распространенная для анализа модель-функция DE-9IM [12].

Использование разработанных методик и программного обеспечения позволяет выбрать метод управления качеством руды при добыче на рабочих и планируемых к отработке горизонтах карьера (табл. 1, 2), рассчитать среднее содержание, рудоносность, объемные показатели руды и вскрыши, а также значение коэффициента вариации для каждого полезного и вредного компонента в руде.

Таблица 1

Объемные и качественные характеристики руды при различных вариантах развития горных работ на северном участке карьера (см. рис. 5)

Порядок отработки	Объем горной массы	Объем руды	Рудоносность	Содержание Fe _{магн}	
	м ³	м ³	%	Сред., %	К _{вар} , %
1	52 578	5 500	10	18,1	16,34
2	52 631	375	1	16,4	0,39
3	45 313	32 000	71	25,2	11,72
4	62 487	375	1	22,6	0,75

Таблица 2

Объемные и качественные характеристики руды при различных вариантах развития горных работ на южном участке карьера (см. рис. 5)

Направления отработки	Объем горной массы	Объем руды	Рудоносность	Кол-во блоков	Fe _{магн}	
	м ³	м ³	%	шт.	Сред, %	К _{вар} , %
1	123 373	13 125	11	105	21,9	15,8
2	57 558	41 875	73	335	17,3	4,2
3	107 360	750	1	6	18,2	8,5
4	118 888	102 875	87	823	27,9	11,9
5	67 062	2 125	3	17	26,4	6,9

По результатам анализа состояния горных работ в карьере предложено несколько вариантов их развития в зависимости от текущего положения на 10 лет вперед, при этом решена задача по разному восточного борта и предложена корректировка схемы вскрытия с построением планов горных работ (рис. 6), которые сформированы на основе программных продуктов собственной разработки, а также с использованием программных комплексов Autocad и Surpac.

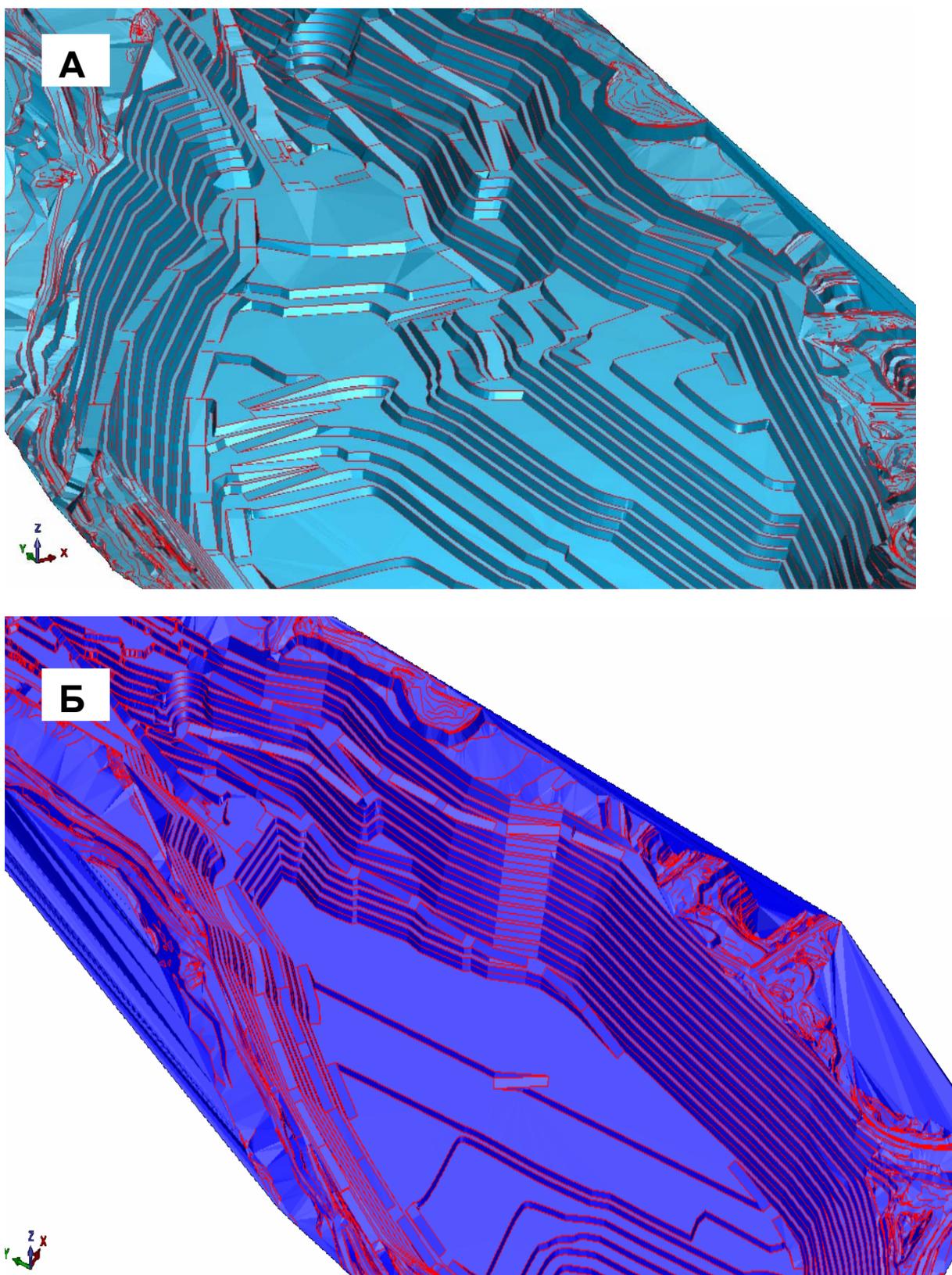


Рис. 6. Фрагмент планов горных работ на 5-й («А») и 10-й («Б») годы разработки Центрального карьера



Рис. 7. Распределение объемов вскрыши и руды по глубине карьера

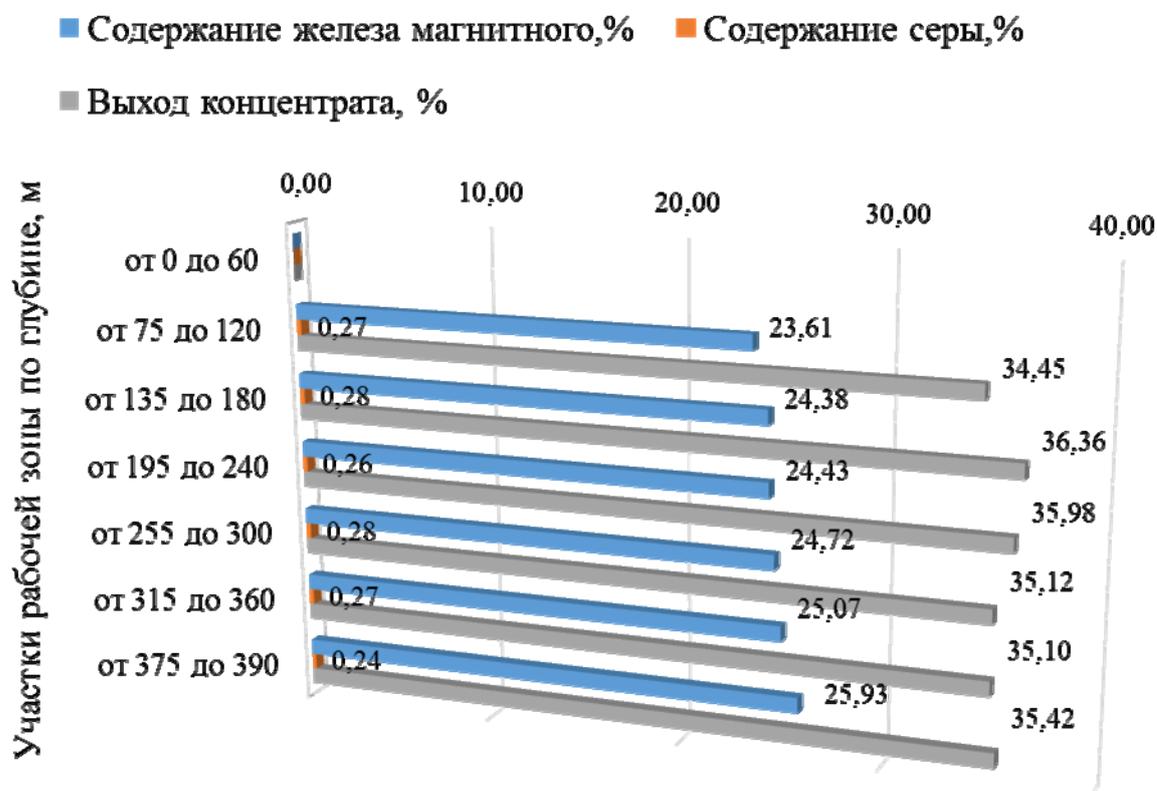


Рис. 8. Распределение качества руды по глубине карьера

Представленные на рис. 4, 7, 8 результаты анализа участков рабочей зоны Центрального карьера позволили выявить следующие тенденции:

– сдерживающим фактором для освоения запасов нижних горизонтов является небольшая протяженность активных фронтов на нижних горизонтах карьера и значительное количество участков консервации фронтов горных работ на верхних горизонтах карьера, что сдерживает интенсификацию добычных работ и снижает объем резервов;

– основные запасы руды сосредоточены в нижней части карьера, на глубине от поверхности от 195 до 390 м;

– с понижением горных работ наблюдается повышение качества руды, а именно рост содержания Fe магнитного с 23,61 до 25,93 % и снижение содержания серы в концентрате с 0,27 до 0,24 %.

Выводы

Представленные методика и разработанное на ее базе программное обеспечение (ПО) позволяют в автоматизированном режиме оценить соотношение фронтов горных работ и качественные показатели запасов ПИ на рабочих горизонтах карьера. Использование методики способствует снижению трудоемкости и повышению качества процессов планирования горных работ в карьерах, разрабатывающих сложноструктурные месторождения. Более качественное планирование горных работ с учетом качества сырья позволяет увеличить степень извлечения ценных компонентов и более комплексно использовать минеральные ресурсы.

Анализ фронтов горных работ по типу и качеству запасов при различных положениях рабочей зоны позволяет провести аудит резервов интенсификации горного производства и своевременно выполнить корректировку режима работы карьера по руде и вскрыше в зависимости от потребностей рынка.

Методика позволяет учесть прослой пустых пород в структуре рудного тела, которые сложно установить на плоской модели (чертеже) погоризонтного плана и оперативно скорректировать контуры запасов при отработке.

Использование представленной методики и разработанного ПО не требует наличия на ГОКе современных средств ГГИС и специализированных программных продуктов. Для их применения достаточно офисных пакетов (Excel и аналогов) и редактора dxf файлов с целью интерпретаций данных исследований. Реализация вышеизложенного комплекса методик позволяет повысить эффективность планирования горных работ без приобретения дорогостоящих программ и дополнительного обучения пользователей, что может быть востребовано для малых предприятий и карьеров.

Предложенная методика актуальна в условиях импортозамещения и позволяет определить резервы горного производства; установить преобладающий технологический сорт рудного сырья в пределах анализируемых участков месторождения; выбрать рациональный способ добычи сырья с учетом его качества.

Список литературы

1. Kumral M., 2013. Multi-period mine planning with multi-process routes. *International Journal of Mining Science and Technology*, 23 (3), P. 317 – 321.

2. Yan S., Lin H., Jiang X., 2012. A planning model with a solution algorithm for ready mixed concrete production and truck dispatching under stochastic travel times. *Engineering Optimization*, 44 (4), P. 427 – 447.

3. Rimélé A., Dimitrakopoulos R., Gamache M., 2020. A dynamic stochastic programming approach for open-pit mine planning with geological and commodity price uncertainty. *Resources Policy*, 65, P. 101 – 570.

4. 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.
5. Яковлев В.Л., Лаптев Ю.В., Яковлев А.М., 2014. Геоинформационная оценка изменчивости качества титаномагнетитовых руд Гусевогорского месторождения. *Литосфера*, № 5, С.122 – 128.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С., 2019. Геоинформационные технологии при моделировании качественных характеристик руд. *Геоинформатика*, №. 3, С. 12 – 18.
10. Asad M.W.A., 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.
11. Корнилков С.В., 1997. *Управление рабочей зоной действующих и проектируемых глубоких карьеров: автореферат диссертации ... доктора технических наук: 05.15.03.* Екатеринбург, 35 с.
12. Clementini, Eliseo, Di Felice, Paolino; van Oosterom, Peter, 1993. "Небольшой набор формальных топологических отношений, подходящих для взаимодействия с конечным пользователем". В Abel, David; Ooi, Beng Chin (eds.). *Advances in Spatial Databases: Third International Symposium, SSD '93 Singapore, June 23-25, 1993 Proceedings.* Конспекты лекций по информатике, Том 692/1993, Springer, pp. 277 – 295. doi:10.1007/3-540-56869-7_16. ISBN 978-3-540-56869-8.

References

1. Kumral M., 2013. Multi-period mine planning with multi-process routes. *International Journal of Mining Science and Technology*, 23 (3), P. 317 – 321.
2. Yan S., Lin H., Jiang X., 2012. A planning model with a solution algorithm for ready mixed concrete production and truck dispatching under stochastic travel times. *Engineering Optimization*, 44 (4), P. 427 – 447.
3. Rimélé A., Dimitrakopoulos R., Gamache M., 2020. A dynamic stochastic programming approach for open-pit mine planning with geological and commodity price uncertainty. *Resources Policy*, 65, P. 101 – 570.
4. Kornilkov S.V., Alenichev V.M., Laptev Yu.V., Yakovlev A.M., 2017. Prognoz kachestvennykh pokazatelei dobyvaemogo syr'ya na osnove geoinformatsionnykh tekhnologii [Forecasting of quality indicators of extracted raw materials based on geoinformation technologies]. *Gornyi zhurnal*, № 12, P. 10 – 15.
5. Yakovlev V.L., Laptev Yu.V., Yakovlev A.M., 2014. Geoinformatsionnaya otsenka izmenchivosti kachestva titanomagnetitovykh rud Gusevogorskogo mestorozhdeniya [Geoinformation assessment of the quality varying of titanomagnetite ores of the Gusevogorsky deposit]. *Litosfera*, № 5, S.122 – 128.
6. 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 schemes of mineral raw material quality management]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 5 – 1, P. 248– 257.

7. Yakovlev A.M., 2021. *Planirovanie gornykh rabot 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-analiticheskii byulleten'*, № 5 – 1, P. 258 – 268.

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

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

10. Asad M.W.A., 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.

11. Kornilkov S.V., 1997. *Upravlenie rabochei zonoj deistvuyushchikh i proektiruemyykh glubokikh kar'erov: avtoreferat dissertatsii ... doktora tekhnicheskikh nauk: 05.15.03* [Management of the working area of existing and projected deep quarries: abstract of the dissertation... Doctor of Technical Sciences: 05.15.03]. Ekaterinburg, 35 p.

12. Clementini, Eliseo, Di Felice, Paolino; van Oosterom, Peter, 1993. "Nebol'shoi nabor formal'nykh topologicheskikh otnoshenii, podkhodyashchikh dlya vzaimodeistviya s konechnym pol'zovatelem". V Abel, David; Ooi, Beng Chin (eds.). *Advances in Spatial Databases: Third International Symposium, SSD '93 Singapore, June 23-25, 1993 Proceedings*. *Konspekty lektsii po informatike*, Tom 692/1993, Springer, pp. 277 – 295. doi:10.1007/3-540-56869-7_16. ISBN 978-3-540-56869-8.