

УДК 622.34:004.94:553.04

Яковлев Андрей Михайлович

старший научный сотрудник,
лаборатория управления
качеством минерального сырья,
Институт горного дела УрО РАН,
620219 г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: ukr@igduran.ru

Кантемиров Валерий Данилович

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией управления
качеством минерального сырья
Институт горного дела УрО РАН

Титов Роман Сергеевич

старший научный сотрудник,
лаборатория управления
качеством минерального сырья,
Институт горного дела УрО РАН

**МЕТОДЫ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ
ЗАДАЧ КОМПЛЕКСНОГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕДР****Аннотация:*

Ухудшение горнотехнических и горно-геологических условий добычи полезных ископаемых, ужесточение требований к содержанию полезных и вредных компонентов, к чистоте получаемой из минерального сырья продукции снижает эффективность добычи. Для повышения экономической эффективности горного производства необходимо иметь четкое представление о пространственном распределении природных типов и сортов полезного ископаемого. Приведена методика геоинформационного моделирования, позволяющая выделить технологические типы и природные сорта полезных ископаемых с целью повышения эффективности извлечения ценных компонентов и более комплексного использования недр. Методика основана на анализе данных детальной разведки, каркасном и блочном моделировании. После получения моделей происходит программная обработка построенных моделей, позволяющая выделить преобладающий тип руды на участке. Предложенная методика предназначена для автоматизированного планирования горных работ в режиме управления качеством сырья и позволяет определить преобладающий технологический сорт или природный тип в определенных участках изучаемого месторождения.

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

DOI: 10.25635/2313-1586.2022.04.044

Yakovlev Andrei M.

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

Kantemirov Valery D.

Candidate of Technical Sciences,
Head of Laboratory of mineral
quality management,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS

Titov Roman S.

Senior Researcher,
Laboratory of mineral
quality management,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS

**METHODS OF GEOINFORMATION
MODELING IN SOLVING PROBLEMS
OF INTEGRATED USE
OF MINERAL RESOURCES***Abstract:*

Deterioration of mining and geological conditions of mining, stricter requirements for the content of useful and harmful components, for purity of products obtained from mineral raw materials, reduces the efficiency of mining. To increase the economic efficiency of mining production, it is necessary to have a clear understanding of the spatial distribution of natural types and varieties of minerals. The article presents a technique of geoinformation modeling, which makes it possible to identify technological types and natural varieties of minerals in order to increase the efficiency of extracting valuable components and to more integrated use of the subsoil. The methodology bases on the analysis of detailed exploration data and on frame and block modeling. After receiving the models, the software processing of the constructed models takes place, which allows identifying the predominant type of ore on the site. The proposed methodology intends for automated planning of mining operations in the mode of raw material quality management and allows determining the predominant technological variety or natural type in certain areas of the studied deposit.

Key words: geometrization, geological databases, geoinformation modeling, complex ores, mineral quality, block modeling, mining planning, separate mining and ore mass averaging.

* Исследования выполнены в рамках Госзадания №075-00412-22 ПП, тема 1 (2022-2024), (FUWE-2022-0005), рег. №1021062010531-8-1.5.1.

Описание

Как объект для апробации методики геоинформационного моделирования комплексного использования недр выбрано Серовское месторождение комплексных руд. Установлено, что слагающие месторождение руды можно разделить на два природных типа: бобово-конгломератовые железные и латеритные силикатно-никелевые. Для организации раздельной добычи и переработки выделенных типов руд необходимо произвести их технологическое картирование. Предварительный анализ природных типов руд показал, что в составе бобово-конгломератовых руд можно выделить три технологических сорта по следующим признакам: количеству цемента (вмещающих пород) и степени выветрелости. Отмечена высокая изменчивость мощности рудных тел, покрывающей толщи вскрышных пород, а также качественных характеристик, что обуславливает сложные горно-геологические условия разработки. По итогам технологических испытаний установлен характер распределения в рудах ценных компонентов. Установлено, что распределение содержания никеля в бобовых рудах имеет резко асимметричный характер с преобладанием классов до 0,3 %, составляющих 80 % всей выборки (среднее содержание $Ni=0,25$ %). Ni распределен относительно равномерно при незначительной (15,7 %) доле содержаний в классах до 0,3 %. В отличие от бобово-конгломератовых, в латеритных рудах преобладают классы содержаний $Ni \geq 0,5$ % (среднее содержание $Ni=0,67$ %). Установлено, что все изученные руды Серовского месторождения, как охристые, так и бобово-конгломератовые, относятся к категории труднообогатимых. Их морфоструктурный состав характеризуется присутствием в значительном количестве тонкодисперсных минеральных систем, сложным полиминеральным составом и специфическими особенностями конкретных рудных минералов, что не позволяет получать качественные железные концентраты. Следовательно, переработка охристых и бобово-конгломератовых руд должна производиться по разным технологическим схемам.

С учетом вышеизложенного при компьютерном моделировании начальным этапом трансформации данных разведки является создание «геологической базы данных», содержащей информацию о разведочных скважинах и интервалах опробования.

Данные детальной и эксплуатационной разведок векторизуются и переводятся в цифровой табличный вид. В таких таблицах содержится информация: номер скважины, ее координаты (x, y, z). Обязательно в геологическую базу данных заносятся результаты интервального опробования по количеству и содержанию полезных компонентов и вредных примесей. Дополнительно может быть включена атрибутивная информация: физико-механические и физические свойства, рассчитанные экономические показатели добычи и др. [6 – 8].

С целью получения наиболее достоверного прогноза предварительно производятся следующие операции:

- корректировка ураганных значений и исправление ошибок;
- учет кластеризации данных и их декластеризация в зависимости от масштаба анализируемого объекта.

С помощью средств ГГИС происходит трансформация данных в формат геологической базы, пример которой представлен на рис. 2.

Далее с помощью методов интерполяции [9 – 10] производятся построения вероятностных распределений качественных показателей в пространстве на основе одного из алгоритмов:

- кригинга;
- метода обратных расстояний;
- радиально-базисных функций и др.

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. 2. Образец таблицы исходных данных

Для интерполяции данных Серовского месторождения принят стандартный метод обратных расстояний. При интерполяции радиус поиска требуемых параметров задан исходя из среднего расстояния между профилями – 1200 м. Данные интервального опробования представлены по 168 скважинам. Среднее расстояние между скважинами в ряду 300 м.

Выполнен статистический анализ данных разведки, который показал, что данные весьма неоднородны. Данные опробования приведены к одному шагу методом «вниз по скважине» с разбиением на композиты (интервалы) 1 м. Далее производится оценка анизотропии и построение блочной модели с блоками $5 \times 5 \times 5$ м. Размеры перспективного контура карьера по поверхности и глубине были установлены при детальной разведке месторождения. Таким образом, пространственными ограничителями явились цифровая топографическая модель поверхности, построенная по координатам устьев скважин, и каркасная модель перспективного карьера по данным предварительных оценок (рис. 3).

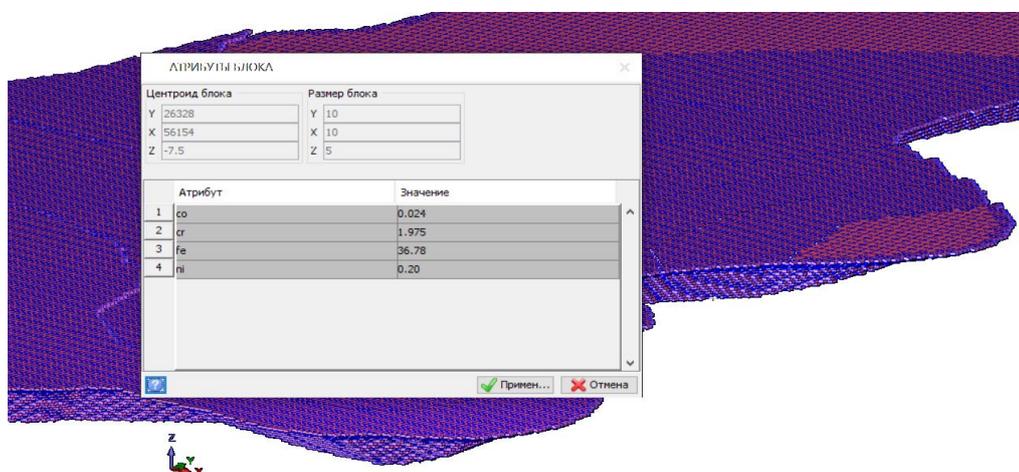


Рис. 3. Блочная модель Серовского месторождения с ограничителями и проинтерполированными атрибутами блоков

Для автоматизированной оценки [6 – 7] данные блочного моделирования с учетом ограничителей были экспортированы в формат *.csv. Далее с помощью разработанного программного обеспечения сформированы матричные модели (пример на рис. 4 – 5), учитывающие разбиение карьерного поля на участки. С учетом больших линейных размеров карьерного поля и расстояний между рядами скважин размеры исследуемых участков приняты 400×400×10 м (рис. 6) с привязкой к местной системе координат. Внутри участков рассчитаны качественные показатели, выделены природные типы и сорта руд.

Охристые бобово-конгломератные руды												
X,Y	53600	54000	54400	54800	55200	55600	56000	56400	56800	57200	57600	begin
30000												30000
29600							31	8.5				29600
29200						2904	6224.5	2744	188			29200
28800					541.5	10071.5	9579	6367.5	5823.5	1057		28800
28400			50.5	3634	3227.5	11156	11900	5714.5	5741	1638		28400
28000			118.5	6604.5	4587	11193	10974.5	2122	9			28000
27600				2103	7830.5	11128	3358.5	195				27600
27200				1155.5	13436.5	13049	296					27200
26800				3627.5	15277.5	15241.5	339					26800
26400			14.5	8169.5	17312	20308.5	7585.5	226				26400
26000			0.5	2716.5	14652	20495	20612.5	7698.5	235.5			26000
25600			1212	6776.5	18345	17476	18306.5	3341	53.5			25600
25200			183	2550	6608.5	11821	3236.5	5789	5086	450		25200
24800			1108.5	2426	6989	11389.5	4861	5136.5	746.5	620.5		24800
24400			1024	1706.5	3033.5	4104.5	5082.5	929.5	1.5	3		24400
24000			341.5	797	2543.5	7698.5	5577.5	429				24000
23600					434	1743	198					23600
23200												23200
Serov	53600	54000	54400	54800	55200	55600	56000	56400	56800	57200	57600	end

Рис. 4. Распределение охристых бобово-конгломератных руд по исследуемым участкам карьера

Силикатно-никелевые латеритные руды												
X,Y	53600	54000	54400	54800	55200	55600	56000	56400	56800	57200	57600	begin
30000												30000
29600												29600
29200									259	2.5		29200
28800								10.5	1860.5	1441.5		28800
28400								196	2373.5	2760.5	3	28400
28000								479.5	119.5			28000
27600								46				27600
27200												27200
26800												26800
26400												26400
26000							113.5	924.5				26000
25600												25600
25200				39	490.5	387	100.5	877	91.5			25200
24800				339	1353	5590.5	11707	9059	628.5			24800
24400				298	3207.5	12733.5	7349.5	9549.5	3419			24400
24000				9	1252.5	1152.5	49					24000
24000					369	1464	422					24000
23600						126	136.5					23600
23200												23200
Serov	53600	54000	54400	54800	55200	55600	56000	56400	56800	57200	57600	end

Рис. 5. Распределение силикатно-никелевых латеритных руд по исследуемым участкам карьера

Результаты

В результате исследований разработана методика геоинформационного моделирования пространственного размещения различных природных типов и сортов руд, построены каркасные и блочная модели месторождения.

Получены аналитические данные по соотношению различных типов руды в карьере с характерными значениями содержания полезных компонентов минерального сырья (табл. 1 – 3), произведена оценка локализации различных типосортов руд по участкам исследуемого карьерного поля (см. рис. 4 – 6).

Таблица 1

Соотношения природных и технологических типов руд в пределах карьера Серовского месторождения и распределение в них содержания никеля

Тип и сорт руды	Соотношение %	Никель			
		Сред., %	Макс., %	Мин., %	Квар., %
Охристая бобово-конгломератная	48,2	0,19	0,22	0,15	11,9
Плотная бобово-конгломератная	34,1	0,11	0,14	0,02	19,9
Рыхлая бобово-конгломератная	9,7	0,25	0,29	0,23	8,4
Силикатно-никелевая латеритная	8,0	0,35	0,62	0,3	12,2

Таблица 2

Качественные характеристики руд в пределах карьера (железо и кобальт)

Тип и сорт руды	Железо				Кобальт			
	Сред., %	Макс., %	Мин., %	Квар., %	Сред., %	Макс., %	Мин., %	Квар., %
Охристая	39,1	49,7	18,0	9,3	0,024	0,077	0,006	25,1
Плотная	34,5	48,3	21,8	13,4	0,014	0,034	0,002	32,6
Рыхлая	39,7	48,9	26,9	8,0	0,033	0,174	0,012	29,1
Силикатно-никелевая	40,4	46,7	26,0	6,6	0,047	0,177	0,017	33,5

Таблица 3

Качественные характеристики руд в пределах карьера (хром)

Тип и сорт руды	Хром			
	Сред., %	Макс., %	Мин., %	Квар., %
Охристая	1,895	3,820	0,326	21,9
Плотная	1,839	3,113	0,303	28,3
Рыхлая	2,026	3,882	0,675	13,8
Силикатно-никелевая	1,893	3,077	0,545	27,2

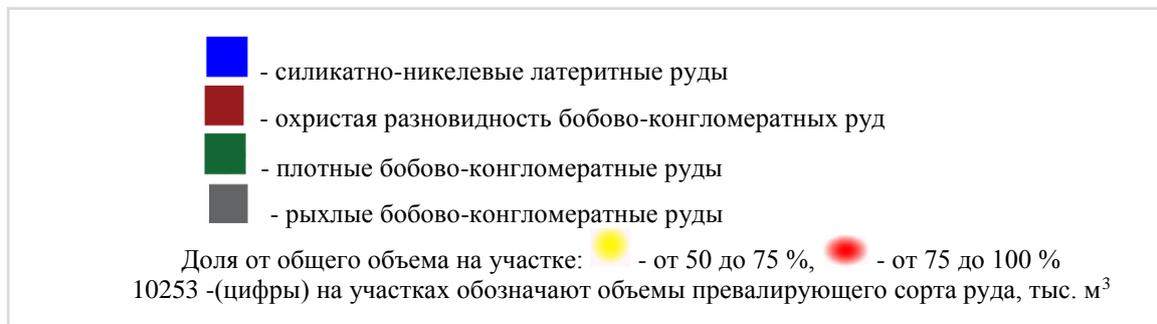
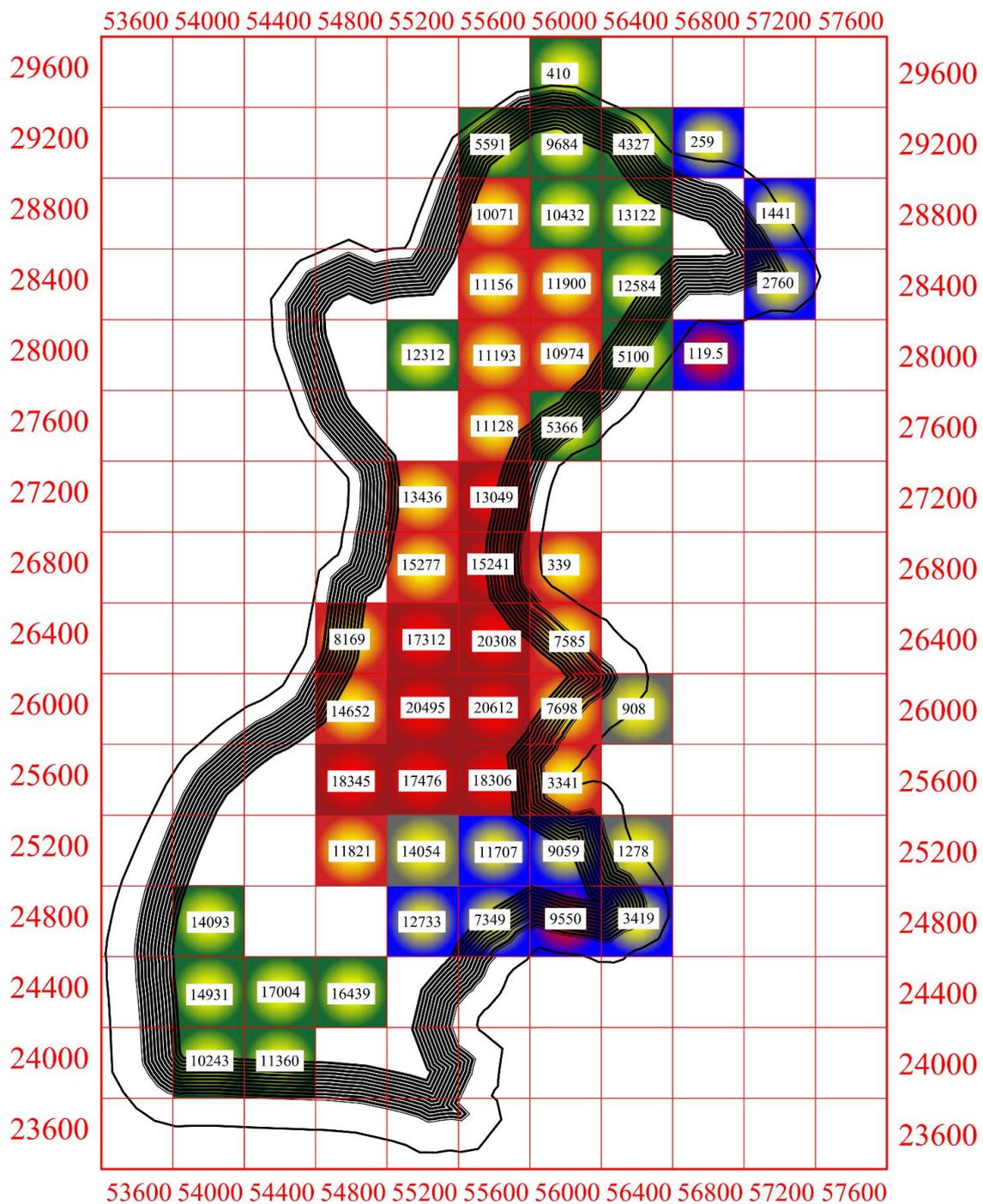


Рис. 6. Распределение природных типов и технологических сортов руд по участкам Серовского месторождения

Установлено, что 48 % запасов в пределах карьерного поля представляют охристые бобово-конгломератные руды, которые преобладают в центральной части карьера, в интервале отметок 25600 – 28400 по оси X и 54800 – 56000 по оси Y. Эти руды характеризуются самыми низкими коэффициентами вариации качества по содержанию железа и кобальта.

Выводы

Предложенная методика геоинформационного моделирования позволяет выделить технологические типы и природные сорта полезных ископаемых с целью повышения эффективности извлечения ценных компонентов и более комплексного использования недр. Методика основана на анализе данных детальной разведки, каркасном и блочном моделировании и предназначена для автоматизированного планирования горных работ в режиме управления качеством сырья. Она позволяет определить преобладающий технологический сорт или природный тип в определенных участках изучаемого месторождения.

Основные положения методики апробированы на примере анализа геологической базы данных Серовского месторождения комплексных руд. Установлено, что латеритные руды расположены в восточной части северного участка, на контактах с лицензионным участком ОАО «Уфалейникель», в пределах границ месторождения преобладает охристая и глинисто-охристая разновидность бобово-конгломератной руды. Западная часть от центральной оси утвержденных запасов представлена плотными бобово-конгломератными рудами. Плотные бобово-конгломератные руды преимущественно локализованы на двух участках, в юго-западном (Y от 24000 до 24800, X от 55200 до 56400) и северо-восточном (Y от 24000 до 24800, X от 55200 до 56400).

Результаты моделирования позволят повысить эффективность планирования горных работ в режиме управления качеством минерального сырья с учетом его комплексного использования.

Список литературы

1. Kumral M., 2013. Multi-period mine planning with multi-process routes. *Int J Min Sci Technol*, 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. *Eng Optim*, 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. *Resour. Pol.*, 65, P. 101 – 570.
4. Корнилков С.В., Лаптев Ю.В., Аленичев В.М., 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 Гусевгорского 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.

References

1. Kumral M., 2013. Multi-period mine planning with multi-process routes. *Int J Min Sci Technol*, 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. *Eng Optim*, 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*. *Resour. Pol.*, 65, P. 101 – 570.

4. Kornilkov S.V., Laptev Yu.V., Alenichev V.M., Yakovlev A.M., 2017. Prognoz kachestvennykh pokazatelei dobyvaemogo syr'ya na osnove geoinformatsionnykh tekhnologii [Forecast of qualitative indicators of extracted raw materials basing 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 quality variability of titan-magnetite ores of Gusevogorsky deposit]. *Litosfera*, № 5, P. 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 quality management]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 5 – 1, P. 248 – 257.

7. Yakovlev A.M., 2021. Planirovanie gornyykh 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 qualitative indicators of minerals with use of geoinformation 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 [Geoinformation technologies in 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.