

УДК 622.2:622.06

О. В. Белгородцев, Е. Е. Хомкин

Промышленное освоение прикарьерных запасов на основе многофакторного анализа и компьютерного моделирования объектов геотехнологии

Изучение условий возможной отработки запасов любого месторождения происходит еще на начальной стадии его освоения, так как каждое из них является уникальным и неповторимым. Условия в процессе выемки могут изменяться, вследствие этого необходимо адаптировать технологию горных работ к условиям месторождения. Адаптация возможна на основе выявления и оценки всех факторов, влияющих на процесс ведения горных работ. На примере месторождений апатит-нефелиновых руд Хибинского массива выявлены основные факторы, влияющие на выбор технологии и безопасность горных работ при извлечении прикарьерных запасов в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях. Представлены примеры моделирования объектов открытой и подземной геотехнологий в горно-геологической информационной системе MINEFRAME, при этом был задействован модуль автоматизированного анализа горно-геологических условий, который позволяет формировать вертикальные разрезы в пределах рудного тела с заданным шагом. По каждому разрезу определяются элементы залегания: угол падения, нормальная мощность, рудные площади, в том числе в охранных целиках. Продолжительность выполнения данных измерений и анализ горно-геологических условий при таком подходе значительно сокращаются. Разработаны варианты отработки прикарьерных запасов Саамского карьера, горные работы в котором завершены и доступ в него отсутствует из-за ликвидации транспортных коммуникаций. По вариантам определены промышленные запасы и показатели их извлечения. Комплексная технологическая и геомеханическая оценка условий освоения запасов месторождений с применением средств компьютерного моделирования позволяет улучшить восприятие визуальной информации и разработать оптимальный вариант освоения запасов месторождений.

Ключевые слова: месторождение, запасы руды, система разработки, компьютерное моделирование

Информация о статье: поступила в редакцию 24.01.2019; получена после доработки 04.03.2019

Введение

Изучение условий возможной отработки запасов любого месторождения происходит еще на начальной стадии его освоения, так как каждое из них является уникальным и неповторимым. Условия отработки запасов в процессе выемки могут изменяться, и не всегда в лучшую сторону, это вызывает необходимость адаптировать технологию горных работ к условиям месторождения, в том числе при извлечении прикарьерных запасов. Адаптация возможна на основе выявления и оценки всех факторов, влияющих на отработку запасов месторождения в процессе ведения горных работ.

Методы и средства, применяемые при выборе технологии освоения запасов месторождения, должны быть комплексными и обеспечивать максимальную безопасность ведения горных работ.

Показать это можно на примере района стыковки подземных горных работ при отработке запасов Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений апатит-нефелиновых руд Хибинского массива. При выборе оптимального варианта отработки прибортовых запасов Саамского карьера были выявлены и учтены основные факторы, влияющие на технологию горных работ, наряду с этим в горно-геологической информационной системе (ГИС) MINEFRAME сформированы 3D-модели объектов геотехнологии (конструктивные элементы карьера и системы разработки, охранный целик, тектонический разлом, развал обрушенных покрывающих пород и т. д.) [1].

Материалы и методы

Многофакторный анализ возможности отработки прикарьерных запасов Саамского карьера включал в себя изучение условий и оценку факторов, влияющих на технологию подземных горных работ.

Экономической предпосылкой к промышленному освоению прикарьерных запасов являлось то, что прибортовые запасы Саамского карьера составляют 33,5 млн т балансовых и 8,9 млн т забалансовых запасов с довольно высоким содержанием полезных компонентов. В то же время отработка этих запасов невозможна без учета факторов, влияющих на технологию горных работ в рассматриваемом районе:

– географические: климатические и орографические (абсолютные и относительные высотные отметки, водотоки, характер поверхности, возможность камнепадов);

– пространственно-морфологические: формы, размер и мощность рудных залежей Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений, условия залегания и строение рудных залежей, степень тектонической нарушенности тел полезных ископаемых;

– гидрогеологические и инженерно-геологические: объем прогнозируемого водопритока в карьер и подземные горные выработки; физико-механические свойства вмещающих пород и руд, определяющие степень их устойчивости.

Отработка прикарьерных запасов Саамского карьера осложняется наличием рудных охраняемых целиков, расположенных под промплощадкой Кировского рудника, подъездными железнодорожными путями, Юкспорским тоннелем, а также наличием Саамского разлома, который простирается вкрест структуры Кукисвумчоррского месторождения. Саамский разлом представляет собой неоднородную зону дробления, катаклаза и милонитизации мощностью в пределах карьера от нескольких до 136 м, внутри которой находятся многочисленные блоки, линзы и грубообломочные куски окисленных (шпреуштейнезированных) вмещающих горных пород. По падению разлом прослежен в карьере и в подземных выработках Кировского рудника более чем на 200 м [2].

Применение метода компьютерного моделирования в ГГИС MINEFRAME значительно ускорило решение технологических задач и позволило комплексно учесть основные факторы и горнотехнические ограничения, влияющие на выбор рациональной технологии отработки прикарьерных запасов Саамского карьера.

С помощью инструментов ГГИС MINEFRAME сотрудниками Горного института (ГоИ) ФИЦ КНЦ РАН был произведен [3–10]:

– анализ горно-геологических условий, включающий в себя анализ изменения угла падения и мощности рудных залежей с понижением горных работ;

– подсчет геологических запасов с определением качества балансовой и забалансовой руды, в том числе в пределах охранных целиков и в зоне тектонического Саамского разлома;

– подсчет отбываемых запасов с определением качества балансовой и забалансовой руды при разных вариантах отработки прикарьерных запасов;

– подсчет площади и объема обрушенных покрывающих пород в выработанное пространство Саамского карьера при ведении подземных горных работ;

– подсчет объемов горно-подготовительных, нарезных и очистных горных выработок;

– подсчет показателей извлечения балансовых и забалансовых запасов при разных вариантах отработки прикарьерных запасов.

Сводные объемы распределения запасов по вариантам отработки представлены в таблице.

Результаты и обсуждение

На основе анализа, технических ограничений и фактического состояния горных работ на Кировском руднике в ГГИС MINEFRAME были созданы цифровые модели конструктивных элементов возможных вариантов систем разработки с обрушением руды и вмещающих пород, которые позволили выбрать наиболее рациональный и безопасный вариант отработки прикарьерных запасов Саамского карьера.

Общая цифровая модель для анализа горно-геологических условий залегания и подсчета геологических запасов Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений сформирована на основе геологической документации, цифровых моделей месторождений и Саамского карьера, созданных в программном комплексе MineScare и экспортированных в ГГИС MINEFRAME. При создании моделей вариантов отработки запасов учитывалось наличие рудных охранных целиков под промплощадкой Кировского рудника и подъездными железнодорожными путями (рис. 1).

Сформированная цифровая модель геологических запасов позволила провести анализ горно-геологических условий в автоматизированном режиме. Для этого в ГГИС MINEFRAME был задействован инструментальный модуль автоматизированного анализа горно-геологических условий залегания.

Данный инструмент позволяет формировать вертикальные разрезы в пределах рудного тела с заданным шагом, в соответствии с которым автоматически определяются углы падения висячего и лежащего боков рудных тел месторождений, а также нормальная мощность и рудные площади, в том числе в охранных целиках. Продолжительность выполнения измерений и последующего анализа изменчивости горно-геологических условий при таком подходе сокращается с нескольких недель до 1–2 часов [6].

На основе цифровых моделей геологических запасов, охранных целиков, Саамского карьера, анализа условий отработки запасов и ограничивающих факторов создавались цифровые модели подземных горных выработок и отбываемых балансовых и забалансовых запасов.

На основе данных геологической и технической документации были разработаны трехмерные цифровые модели:

- Саамского тектонического разлома (рис. 2);

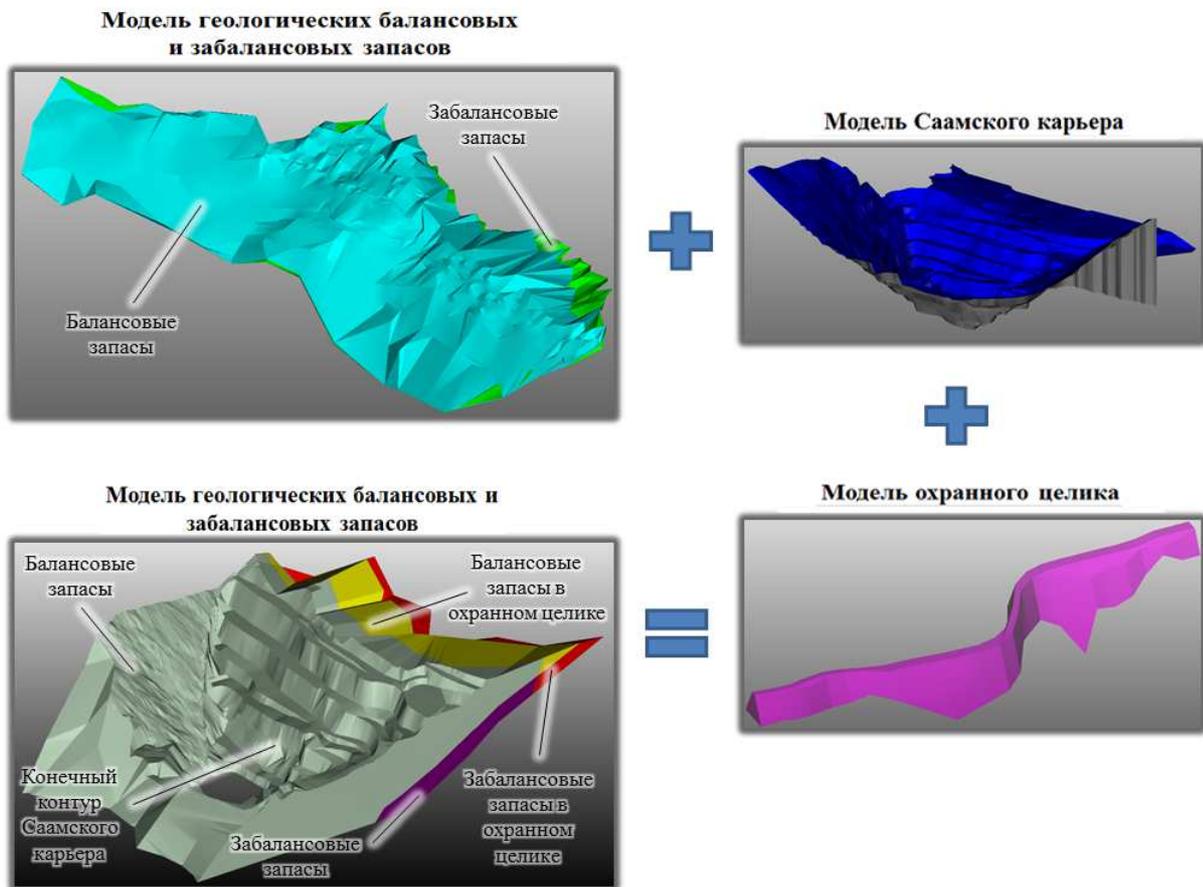


Рис. 1. Создание цифровых моделей геологических запасов Саамского карьера и охранных целиков с разделением их на балансовые и забалансовые запасы
Fig. 1. Digital models of geological reserves of the Saamsky open pit and protective pillars and their division into balance and unpayable reserves

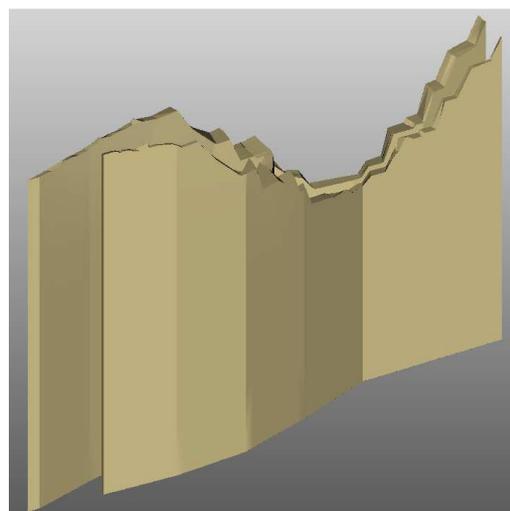


Рис. 2. Трехмерная модель тектонического Саамского разлома
Fig. 2. 3D model of the Saamsky tectonic fault

Таблица. Сводные объемы распределения запасов по вариантам отработки
Table. Summary distribution of reserves by mining options

№ п/п	Наименование	Вариант отработки запасов															
		1				2				3				4			
		Объем, тыс. м ³	Плотность, т/м ³	Масса, тыс. т	%	Объем, тыс. м ³	Плотность, т/м ³	Масса, тыс. т	%	Объем, тыс. м ³	Плотность, т/м ³	Масса, тыс. т	%	Объем, тыс. м ³	Плотность, т/м ³	Масса, тыс. т	%
1	Геологические запасы руды в пределах блока целика выше отг. +185 м	14894,50		42250,65	100	14894,50		42250,65	100	14894,50		42250,65	100,0	14894,50		42250,65	100
	балансовые	11734,30	2,86	33560,10		11734,30	2,86	33560,10		11734,30	2,86	33560,10		11734,30	2,86	33560,10	
	забалансовые	3160,20	2,75	8690,55		3160,20	2,75	8690,55		3160,20	2,75	8690,55		3160,20	2,75	8690,55	
	в том числе:																
1_1	Геологические запасы руды в охранных целиках	2310,50		6480,21	15,51												
	балансовые	1148,50	2,86	3284,71		1148,50	2,86	3284,71		1148,50	2,86	3284,71		1148,50	2,86	3284,71	
	забалансовые	1162,00	2,75	3195,50		1162,00	2,75	3195,50		1162,00	2,75	3195,50		1162,00	2,75	3195,50	
1_2	Отбиваемые запасы руды	4633,25		13230,48	31,11												
	балансовые	4445,75	2,86	12714,85		4445,75	2,86	12714,85		4445,75	2,86	12714,85		4445,75	2,86	12714,85	
	забалансовые	187,50	2,75	515,63		187,50	2,75	515,63		187,50	2,75	515,63		187,50	2,75	515,63	
1_3	Временно законсервированные геологические запасы	7950,75		22539,96	53,38												
	балансовые	6140,05	2,86	17560,54		6140,05	2,86	17560,54		6140,05	2,86	17560,54		6140,05	2,86	17560,54	
	забалансовые	1810,70	2,75	4979,43		1810,70	2,75	4979,43		1810,70	2,75	4979,43		1810,70	2,75	4979,43	
2	Потери балансовой руды	8238,88	2,86	23563,20	70,21	8623,57	2,86	24663,42	73,49	8341,88	2,86	23857,76	71,09	8871,45	2,86	25372,35	75,6
2_1	Общерудничные потери балансовой руды (1_1 + 1_3)	7288,55	2,86	20845,25		7288,55	2,86	20845,25		7288,55	2,86	20845,25		7288,55	2,86	20845,25	
2_2	Эксплуатационные потери руды	950,33	2,86	2717,96		1335,02	2,86	3818,17		1053,33	2,86	3012,52		1582,90	2,86	4527,11	
3	Потери забалансовой руды	3012,32	2,75	8283,88	95,32	3012,32	2,75	8283,88	95,32	3009,41	2,75	8275,88	95,23	3009,41	2,75	8275,88	95,23
3_1	Общерудничные потери забалансовой руды	2972,70	2,75	8174,93		2972,70	2,75	8174,93		2972,70	2,75	8174,93		2972,70	2,75	8174,93	
3_2	Эксплуатационные потери	39,62	2,75	108,95		39,62	2,75	108,95			2,75	100,96		36,71	2,75	100,96	
4	Промышленные запасы	3495,42		9996,89	29,79	3110,73		8896,68	26,51	3392,42		9702,33	28,91	2862,85		8187,75	24,40
5	Разубоживание	990,97		2699,88	17,33	886,48		2415,67	15,18	1015,76		2767,39	17,78	972,04		2648,47	16,88
6	Добываемая рудная масса			12696,78				11312,4				12469,7				10836,2	

- покрывающих/обрушенных пород в границах выработанного пространства Саамского карьера при ведении подземных горных работ (рис. 3);
- отбиваемых балансовых и забалансовых запасов, конструктивных потерь и разубоживания руды (рис. 4).

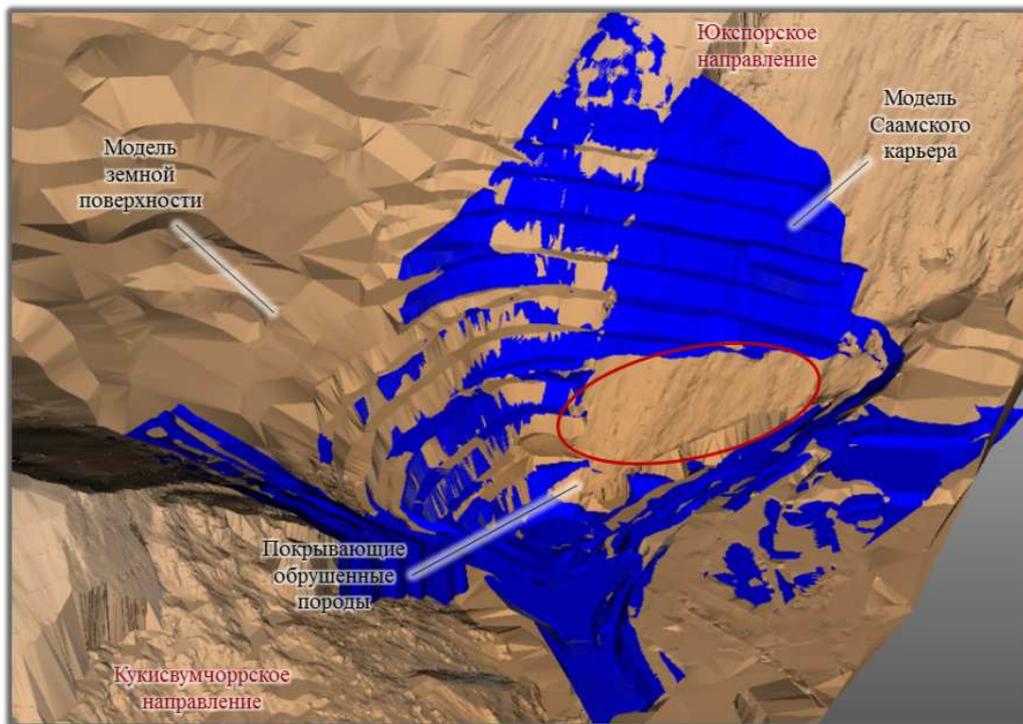


Рис. 3. Совмещенные цифровые модели Саамского карьера, земной поверхности и обрушенных покрывающих горных пород при ведении подземных горных работ
Fig. 3. Combined digital models of the Saamsky open pit, earth's surface and collapsed cap rocks in underground mining operations

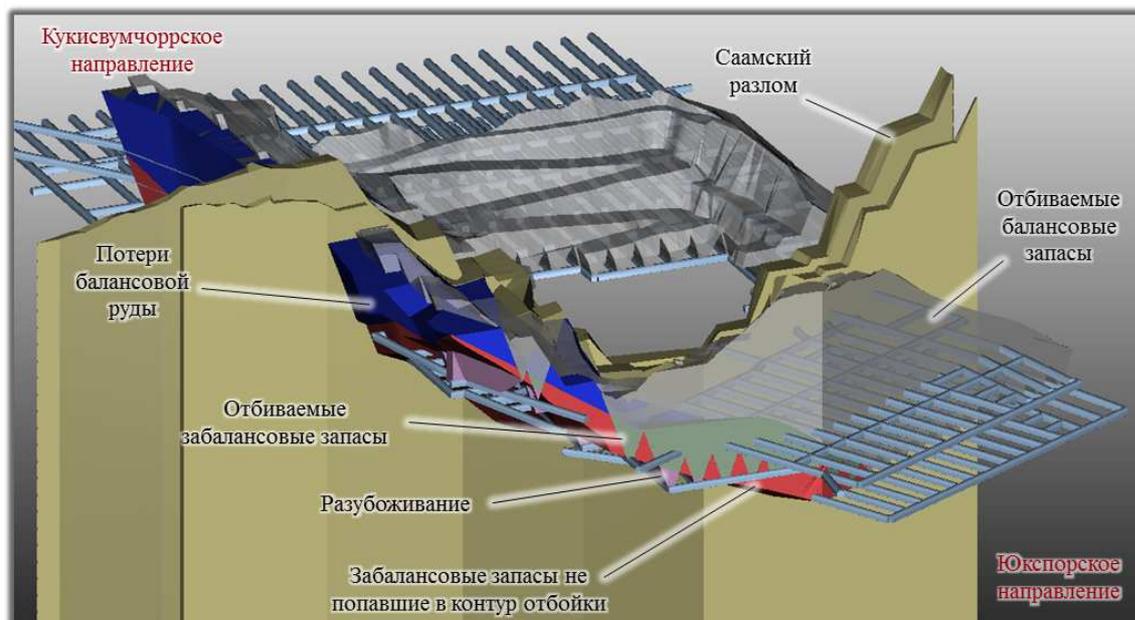


Рис. 4. Цифровые модели отбиваемых балансовых и забалансовых запасов, конструктивных потерь и разубоживания
Fig. 4. Digital models of broken balance and unpayable reserves, constructive losses and dilution

Для подсчета качества полезного компонента применялась блочная модель (рис. 5), импортированная в ГИС MINEFRAME, где была произведена корректировка в соответствии с контурами цифровой модели отбиваемых запасов и получены данные по распределению содержания полезного компонента.

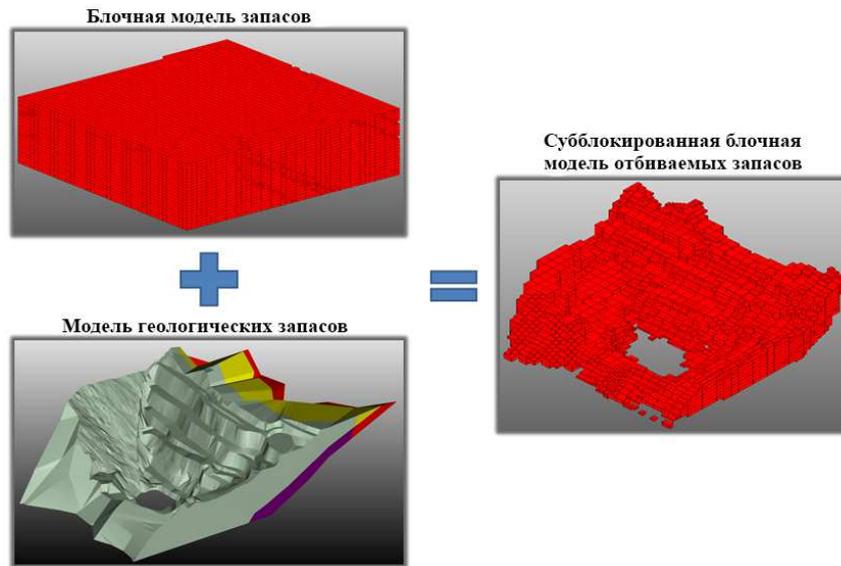


Рис. 5. Субблокированная блочная модель
Fig. 5. Sub-blocking model

На основе цифровых моделей были разработаны модели возможных вариантов отработки прикарьерных запасов Саамского карьера (рис. 6). В дальнейшем они использовались при моделировании напряженно-деформированного состояния массива в программном комплексе Sigma GT, что позволило учесть геомеханические особенности данного участка при выборе рациональной технологии отработки прикарьерных запасов [10].

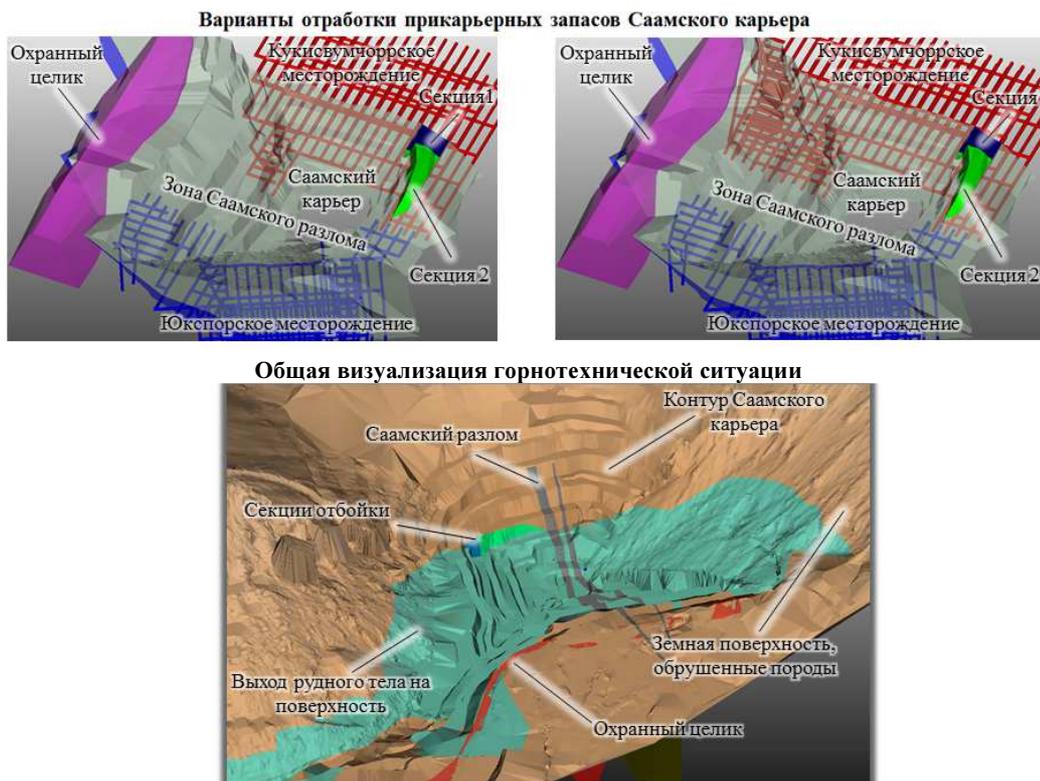


Рис. 6. Цифровые модели вариантов отработки прикарьерных запасов Саамского карьера
и общая визуализация горнотехнической ситуации
Fig. 6. Digital models of mining options for the near-open pit reserves of the Saamsky open pit
and general visualization of the mining-engineering situation

Заключение

Совместная технологическая и геомеханическая оценка объектов геотехнологии при разработке вариантов отработки прикарьерных запасов Саамского карьера [7–10], произведенная на основе анализа и компьютерного моделирования, показала, что отработку основной части запасов предпочтительнее производить с помощью системы разработки подэтажного обрушения с торцевым выпуском руды и созданием стыковочной секции на Кукисвумчоррском крыле Кировского рудника. При этом часть запасов висячем боку залежи, где существует дефицит обрушенных покрывающих горных пород, отбивается с помощью массовых взрывов.

Применение средств компьютерного моделирования объектов геотехнологии при выборе варианта рациональной технологии отработки прикарьерных запасов Саамского карьера дало возможность построить адекватные цифровые модели объектов геотехнологии, что позволило:

- комплексно учесть условия и факторы, влияющие на выбор технологии отработки прикарьерных запасов;
- получить более точные данные по объемам, качеству и распределению полезных компонентов по сравнению с подсчетом методом параллельных сечений в 2D;
- оперативно вносить изменения в проектную техническую документацию;
- улучшить визуальное восприятие горнотехнической обстановки проектируемого участка месторождения, что в процессе моделирования способствует выявлению неточностей и несоответствий в исходной технической документации.

Библиографический список

1. Наговицын О. В., Лукичев С. В. Горно-геологические информационные системы – история развития и современное состояние. Апатиты : КНЦ РАН, 2016. С. 4.
2. Козырев А. А., Каспарьян Э. В., Жиров Д. В., Смагина Ю. Г. Саамский разлом (Хибины) – аномальный характер современных деформаций // Вестник МГТУ. 2009. Т. 12, № 4. С. 702–709.
3. Лукичев С. В., Белгородцев О. В., Громов Е. В. Решение задач определения запасов руды, показателей конструктивных потерь и разубоживания при подземной разработке месторождений в объемной постановке на основе компьютерного моделирования горно-геологических объектов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 4. С. 199–210.
4. Lukichev S., Nagovitsyn O., Belogorodtsev O. A system approach to solving the mining technology tasks based on modeling its objects and processes // Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry. Proceeding of 38th International symposium APCOM. Golden, Colorado, USA, 2017, August 9–11. Golden, Colorado, USA, 2017. P. 1229–1234.
5. Lukichev S., Belogorodtsev O., Amosov P. Improvement of a mining technology for near open-pit reserves excavation in the northern conditions // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. Conference proceedings. Albena; Bulgaria, 29 June – 5 July 2017. Albena, Bulgaria, 2017. V. 17, Iss. 13. P. 415–422.
6. Громов Е. В., Хомкин Е. Е., Неведров А. С. Автоматизированный анализ горно-геологических условий залегания рудных тел в ГГИС "Mineframe" // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 7. С. 216–221.
7. Козырев А. А., Лукичев С. В., Наговицын О. В., Семенова И. Э. Геомеханическое и горнотехнологическое моделирование как средство повышения безопасности отработки месторождений твердых полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 4. С. 73–83.
8. Козырев А. А., Семенова И. Э., Аветисян И. М. Геомеханическое обоснование безопасной отработки стыковочных зон на Юкспорском месторождении // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 4. С. 84–92.
9. Kozyrev A. A., Semenova I. E., Avetisyan I. M., Zemtsovskii A. V. Methodological approaches and realization of joining zones mining in the rockburst hazardous conditions // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. Conference proceedings. Albena, Bulgaria, 30 June – 6 July 2016. Albena, Bulgaria, 2016. Book 1, V. 2. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. P. 565–572.
10. Семенова И. Э., Аветисян И. М., Земцовский А. В. Геомеханическое обоснование отработки запасов глубокого горизонта в сложных горно-геологических и геодинамических условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 12. С. 65–73.

References

1. Nagovitsyn O. V., Lukichev S. V. Gorno-geologicheskkiye informatsionnyye sistemy – istoriya razvitiya i sovremennoye sostoyaniye [Mining and geological information systems – history and current state]. Apatity : KNTS RAN, 2016. P. 4.

2. Kozyrev A. A., Kaspar'yan E. V., Zhiron D. V., Smagina Yu. G. Saamskiy razlom (Khibiny) – anomal'nyy kharakter sovremennykh deformatsiy [Sami fault (Khibiny) – the anomalous nature of modern deformations] // Vestnik MGTU. 2009. V. 12, N 4. P. 702–709.

3. Lukichev S. V., Belogorodtsev O. V., Gromov Ye. V. Resheniye zadach opredeleniya zapasov rudy, pokazateley konstruktivnykh poter' i razubozhivaniya pri podzemnoy razrabotke mestorozhdeniy v ob'yemnoy postanovke na osnove komp'yuternogo modelirovaniya gorno-geologicheskikh ob'yektov [The solution of problems of ore reserves determination, indicators of structural losses and dilution in underground development of deposits in the volume statement on the basis of computer simulation of mining and geological objects] // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal). 2016. N 4. P. 199–210.

4. Lukichev S., Nagovitsyn O., Belogorodtsev O. A system approach to solving the mining technology tasks based on modeling its objects and processes // Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry. Proceeding of 38th International symposium APCOM. Golden, Colorado, USA, 2017, August 9–11. Golden, Colorado, USA, 2017. P. 1229–1234.

5. Lukichev S., Belogorodtsev O., Amosov P. Improvement of a mining technology for near open-pit reserves excavation in the northern conditions // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. Conference proceedings. Albena; Bulgaria, 29 June – 5 July 2017. Albena, Bulgaria, 2017. V. 17, Iss. 13. P. 415–422.

6. Gromov Ye. V., Khomkin Ye. Ye., Nevedrov A. S. Avtomatizirovannyi analiz gorno-geologicheskikh usloviy zaleganiya rudnykh tel v GIS "Mineframe" [Automated analysis of mining and geological conditions of occurrence of ore bodies in the GIS "Mineframe"] // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal). 2017. N 7. P. 216–221.

7. Kozyrev A. A., Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V., Semenova I. E. Geomekhanicheskoye i gornotekhnologicheskoye modelirovaniye kak sredstvo povysheniya bezopasnosti otrabotki mestorozhdeniy tverdykh poleznykh iskopayemykh [Geomechanical and mining engineering modeling as a means of improving the safety of mining of solid minerals] // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal). 2015. N 4. P. 73–83.

8. Kozyrev A. A., Semenova I. E., Avetisyan I. M. Geomekhanicheskoye obosnovaniye bezopasnoy otrabotki stykovochnykh zon na Yuksporskoy mestorozhdenii [Geomechanical foundation of safe joining areas mining on Yukspor deposit] // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal). 2015. N 4. P. 84–92.

9. Kozyrev A. A., Semenova I. E., Avetisyan I. M., Zemtsovskii A. V. Methodological approaches and realization of joining zones mining in the rockburst hazardous conditions // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. Conference proceedings. Albena, Bulgaria, 30 June – 6 July 2016. Albena, Bulgaria, 2016. Book 1, V. 2. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. P. 565–572.

10. Semenova I. E., Avetisyan I. M., Zemtsovskiy A. V. Geomekhanicheskoye obosnovaniye otrabotki zapasov glubokogo gorizonta v slozhnykh gorno-geologicheskikh i geodinamicheskikh usloviyakh [Geomechanical substantiation of development of reserves in the deep horizon complex geological and geodynamic conditions] // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal). 2018. N 12. P. 65–73.

Сведения об авторах

Белгородцев Олег Владимирович – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Горный институт КНЦ РАН, науч. сотрудник; e-mail: O_Belogorodtsev@mail.ru

Belogorodtsev O. V. – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Mining Institute KSC RAS, Researcher; e-mail: O_Belogorodtsev@mail.ru

Хомкин Егор Евгеньевич – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Горный институт КНЦ РАН, аспирант, мл. науч. сотрудник; e-mail: Sonne.z@mail.ru

Khomkin E. E. – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Mining Institute KSC RAS, PhD Student, Junior Researcher; e-mail: Sonne.z@mail.ru

O. V. Belogorodtsev, E. E. Khomkin

Industrial development of near-open pit reserves based on multivariate analysis and computer modelling of geotechnology objects

The conditions for potential production of deposit reserves are studied at the initial stage of its development as every deposit is a unique one. Mining conditions can change during production, therefore, it is necessary to adapt the mining technology to the conditions of the field. Adaptation is possible based on the identification and assessment of all factors affecting the process of mining. The authors have revealed principal parameters influencing on a choice of mining technology and mining safety when developing near-open pit reserves of the Khibiny apatite-nepheline deposits under complicated mining-geological and technical conditions. The paper demonstrates examples of modelling open and underground geotechnology objects in MINEFRAME mining-geological information system by using a module of automated analysis of mining-geological conditions. The module allows automated formation of vertical cuts within an ore body with the set spacing. For each section, the occurrence elements are determined: angle of incidence, normal thickness, ore areas, including security pillars. This approach reduces significantly the duration of measurements and analysis of mining-geological conditions. The authors have developed the options to mine the near-open pit reserves of the Saamsky open pit, where mining had been completed and there is no access there because of transport communications absence. The industrial stocks and indicators of their extraction options have been identified by options. Integrated engineering and geomechanical estimation of production conditions for deposit reserves by computer modelling allows improving a perception of visual information and developing an optimal mining method to develop deposits.

Key words: mineral deposit, ore reserves, mining technology, computer modelling

Article info: received 24.01.2019; received in revised 04.03.2019