

Научная статья
УДК 622.27
doi:10.37614/2949-1215.2022.13.2.009

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРАБОТКИ ЗАПАСОВ РУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Олег Владимирович Белогородцев¹, **Григорий Олегович Наговицын²**

^{1, 2}Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

¹o.belogorodcev@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4358-7046>

²g.nagovitsyn@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4671-540X>

Аннотация

На примере результатов поисково-оценочных работ и компьютерного моделирования объектов открыто-подземной геотехнологии определены первоочередные задачи и их практическое решение на стадии предпроектного исследования рудного месторождения для целесообразности его вскрытия и отработки запасов. В среде горно-геологической информационной системы (ГГИС) MINEFRAME создана цифровая геологическая модель рудного месторождения, в том числе каркасная и блочная. Произведен автоматизированный анализ горно-геологических условий залегания рудного месторождения с подсчетом балансовых и забалансовых запасов. Определены параметры и границы предохранительного целика под охраняемыми водными объектами на земной поверхности, создана его цифровая модель и подсчитаны рудные запасы в его пределах. Рассчитана годовая производственная мощность и срок отработки первой очереди строительства при отработке рудных запасов подземными горными работами. На основе анализа мощности налегающих пород над рудным месторождением и рельефа топоповерхности выявлены рациональные места заложения основных вскрывающих подземных горных выработок на земной поверхности. В ГГИС MINEFRAME создана цифровая схема вскрытия и подготовки запасов к очистной выемке. Объем строительства горно-капитальных выработок определен с помощью автоматизированного модуля планирования горных работ. Для обеспечения безопасной и комфортной среды при ведении подземных горных работ в условиях Крайнего Севера и отработке запасов системой разработки с обрушением руды и вмещающих пород определена необходимость создания предохранительной и термоизоляционной подушки.

Ключевые слова:

месторождение, вскрытие и отработка запасов, система разработки, породная подушка, горно-геологическая информационная система, компьютерное моделирование, автоматизация, MINEFRAME

Благодарности:

статья выполнена по теме государственного задания FMEZ-2022-0005 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Для цитирования:

Белогородцев О. В., Наговицын Г. О. Моделирование отработки запасов рудного месторождения в условиях Крайнего Севера // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 2. С. 103–110. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.2.009

Original article

MODELING OF AN ORE DEPOSIT DEVELOPMENT UNDER THE FAR NORTH CONDITIONS

Oleg V. Belogorodtsev¹, **Grigory O. Nagovitsyn²**

^{1, 2}Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

¹o.belogorodcev@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4358-7046>

²g.nagovitsyn@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4671-540X>

Abstract

The article presents a solution to the practical problem of ore deposit opening-up and mining. A digital geological model of the ore deposit was created in the mining and geological information system (MGIS) MINEFRAME. The authors carried out an automated analysis of mining and geological conditions of the deposit and calculated balance and off-balance reserves. Parameters and boundaries of a protective pillar under protected surface water objects were determined; its digital model was created and ore reserves within its limits were calculated. The annual production capacity and the mining period of the first stage of underground mining of deposit area were calculated. Based on the analysis of the thickness of the overlying rocks above the ore deposit and surface, rational locations for the main underground mine openings on the surface were identified. The authors created a digital scheme of opening-up and reserves preparation for stope excavation in MGIS MINEFRAME. The construction volume of mine workings was defined using an automated mining planning module. To ensure safe and comfortable environment when conducting underground mining under the Far North conditions with caving of ore and host rocks the authors determined the need to create a safety and thermal insulating pillar.

Keywords:

ore deposit, opening-up, mining method, pillar, mining and geological information system, computer modelling, automation, MINEFRAME

Acknowledgments:

the article was written on the topic of state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FMEZ-2022-0005.

For citation:

Belogorodtsev O. V., Nagovitsyn G. O. Modeling of an ore deposit development under the Far North conditions // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2022. Vol. 13, No. 2. P. 103–110. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.2.009

Введение

Мировая потребность в минеральных ресурсах постоянно увеличивается, что заставляет горнорудные предприятия рассматривать варианты вовлечения в разработку руд с более низким содержанием полезных компонентов на новых или действующих рудниках. Таким образом, приоритетное значение имеет реализация технологических решений, позволяющих снизить себестоимость добычи руды.

В настоящее время происходит изменение соотношения объемов открытой и подземной добычи (с увеличением последней). Это связано с тем, что для поддержания сырьевой базы возникает необходимость вовлечения в отработку запасов рудных месторождений на глубине до 1000 м и более от дневной поверхности [1]. В связи с этим нередко информация о поисково-оценочных работах, проведенных до внедрения ГГИС на ранее разведанном месторождении, содержится на бумажных носителях и растровых изображениях, следовательно, возникает необходимость ее цифровизации для оперативного решения инженерных задач.

С этой целью на примере рудного месторождения в Горном институте Кольского научного центра Российской академии наук, следуя мировому тренду применения в горном деле современных программных средств [2–6], в ГГИС MINEFRAME с помощью программного инструментария создана цифровая компьютерная 3D-модель рудных тел и объектов подземно-открытой геотехнологии для выбора рациональной технологии отработки первой очереди отработки запасов подземными горными работами.

Цифровая 3D-модель рудного месторождения

Каркасное моделирование рудных тел месторождения выполнялось в следующей последовательности: формирование базы данных опробования скважин; оконтуривание рудных тел на вертикальных разрезах (профилях) и по плану блокировки запасов месторождения; построение каркасных моделей на основе векторных моделей оконтуренных рудных тел.

Исходные данные были преобразованы в таблицы Excel. Для импорта исходных данных по скважинам в ГГИС MINEFRAME были сформированы три основных типа файлов, характеризующих необходимую структуру вводимой информации: устья — созданные поля: номер скважины, X, Y, Z, глубина, профиль; инклинометрия — созданные поля: номер скважины, глубина, азимут, угол; опробование — созданные поля: номер скважины, номер пробы, от, до, длина, содержание полезных компонентов.

Все полученные в результате импорта данные легли в основу 3D-моделирования геологических параметров рудной залежи.

Основой для оконтуривания запасов на вертикальных разрезах стали контуры, показанные на геологических разрезах и профилях. Базовые контуры были представлены в файле растрового формата. Данные включали в себя геологическое строение, литологию месторождения и принадлежности к категории по степени разведанности.

При оконтуривании в трехмерной среде ГГИС MINEFRAME учитывалось пространственное положение скважин, линии контактов рудных тел проводились с привязкой точек контуров к границам краевых рядовых проб, составляющих кондиционные рудные интервалы. Это позволило учесть трехмерное положение данных опробования, а не их проекцию на плоскость разреза. В остальном форма и площадь полученных контуров получились практически идентичными тем, что использовались при ручном подсчете запасов. Оконтуривание произведено по 11 вертикальным профилям.

Из-за достаточно сложного расположения разведочных скважин в пространстве создать каркасную модель, позволяющую полностью учитывать трехмерное положение скважин и получать корректные оценки объемов, основываясь только на вертикальных разрезах, весьма сложно. Поэтому дополнительно было произведено оконтуривание на плане блокировки запасов, что позволило наиболее точно учесть границы рудных тел и приблизиться к их истинной геометрической форме (рис. 1).

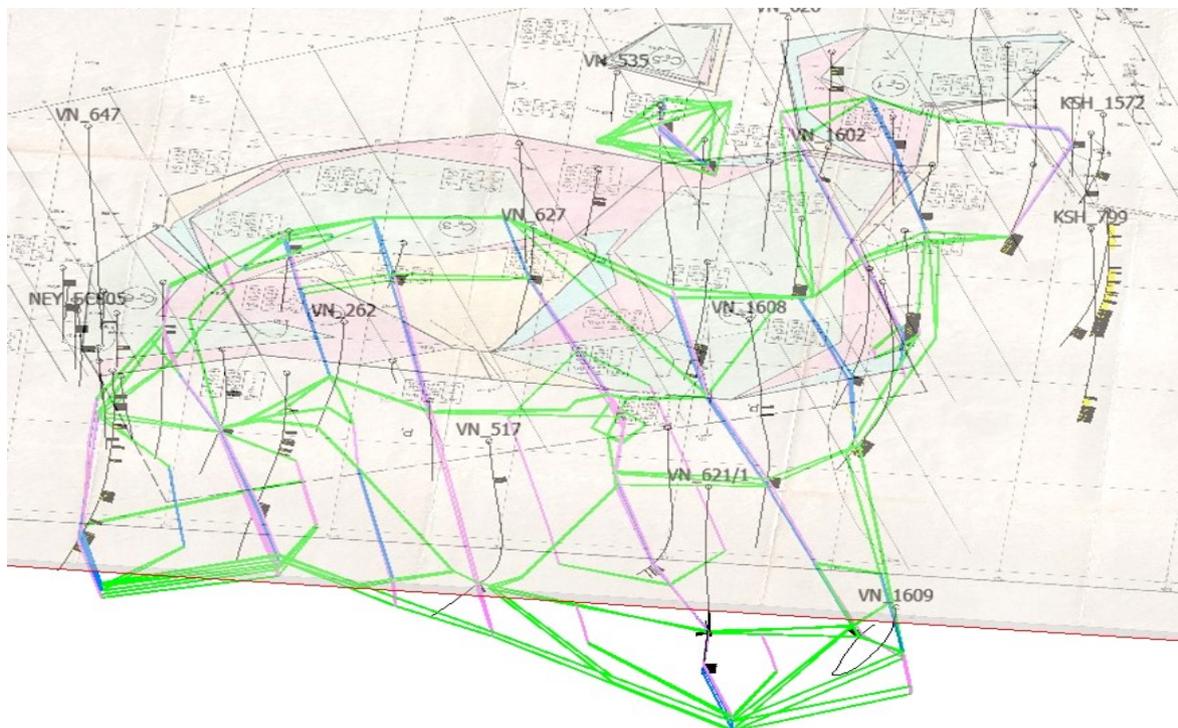


Рис. 1. Оконтуривание рудных тел по плану подсчета запасов

Для построения каркасных моделей рудных тел были использованы векторные модели оконтуривания запасов в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Для получения наиболее реалистичной поверхности применялся метод Кунса, который обеспечивает формирование поверхностей с учетом контактов, принадлежащих разной системе разрезов. Поверхность, полученная таким способом моделирования, является более гладкой, плавной, детальной, что делает ее схожей с реальными поверхностями (рис. 2).

Автоматизированный анализ горно-геологических условий залегания и подсчет запасов рудного месторождения

На основе геологической каркасно-блочной цифровой модели рудного месторождения и программного инструмента ГГИС MINEFRAME — автоматизированного анализа горно-геологических условий залегания рудных тел — определены условия залегания (нормальная и горизонтальная мощности, углы падения в лежачем и висячем боках), распределение полезных компонентов в рудных телах месторождения, а также выполнен подсчет запасов (рис. 3).

Геологические запасы рудного месторождения, оконтуренные по бортовому содержанию n_i %, — 67,0 млн м³, или 201,0 млн тонн; среднее содержание полезного компонента при бортовом содержании n_i % — 6,05 %; средняя горизонтальная мощность рудных тел, оконтуренных по бортовому содержанию n_i %, равна 32 м; средняя нормальная мощность рудных тел, оконтуренных по бортовому содержанию n_i %, равна 17 м; средний угол падения лежачего бока рудных тел, оконтуренных по бортовому содержанию n_i %, равен 43 °; средний угол падения висячего бока рудных тел, оконтуренных по бортовому содержанию n_i %, равен 38 °.

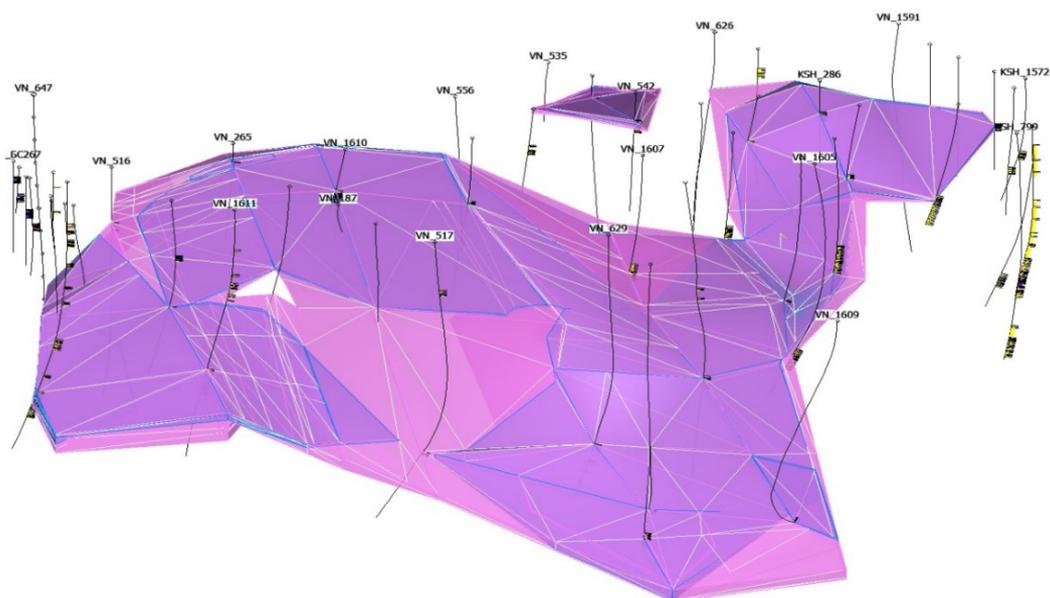


Рис. 2. Каркасная модель рудных тел рудного месторождения

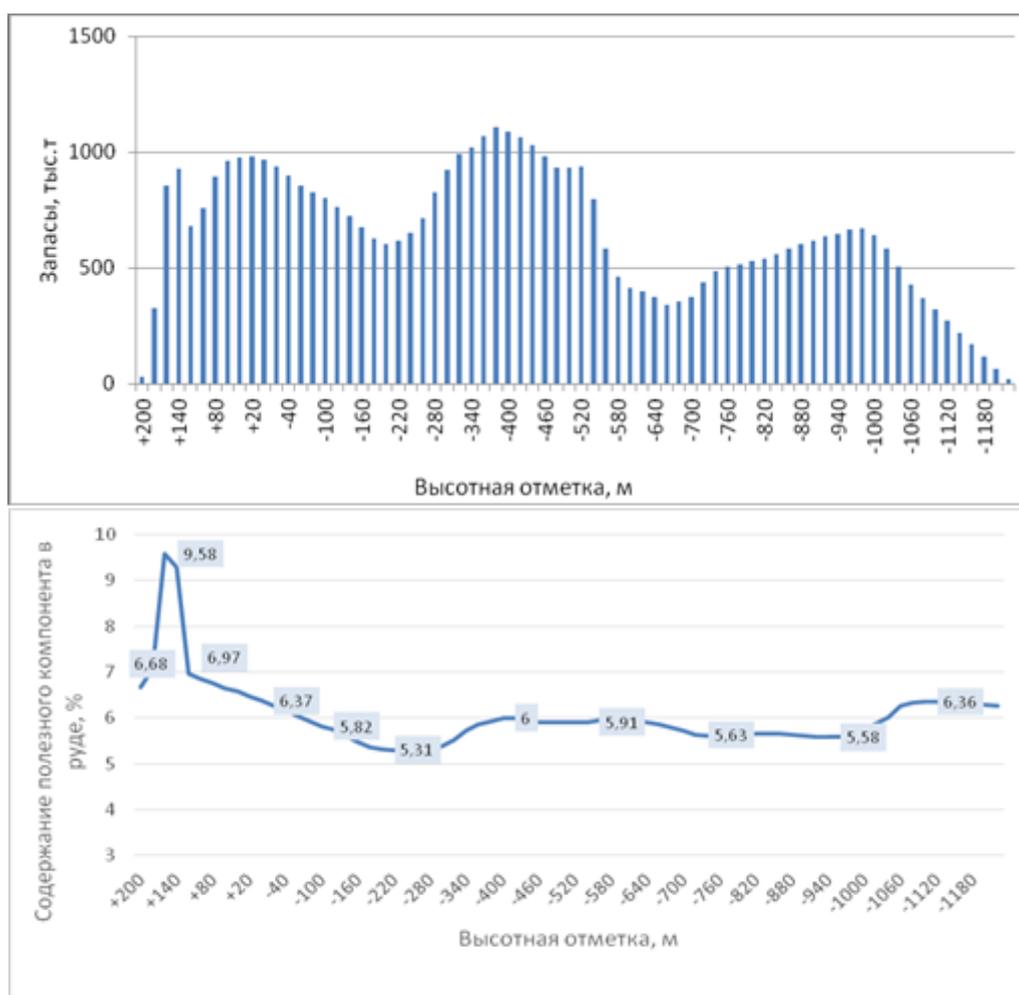


Рис. 3. Распределение запасов и полезных компонентов в пределах рудного месторождения

Расхождение в результатах подсчета геологических запасов, проведенного в период поисково-оценочных работ (зафиксированных на бумажных носителях) и в пределах цифровой геологической модели, созданной в среде ГГИС, составило около 4 %.

Моделирование предохранительного целика под водными объектами на земной поверхности

Участок отработки запасов рудного месторождения приурочен к бассейну реки на земной поверхности, в котором выделены два водоносных комплекса: четвертичных отложений и трещиноватых кристаллических пород. По результатам гидрогеологических работ выявлены сложные гидрогеологические условия участка, заключающиеся в большой мощности четвертичных отложений, содержащих безнапорный и напорный водоносные горизонты, наличии напорного горизонта жильных вод в коренных породах. Четвертичные отложения в бассейне реки имеют значительное распространение до 80 м.

Отработка запасов рудного месторождения подземными горными работами повлечет необходимость создания предохранительного целика под водными объектами на земной поверхности, необходимого для исключения их подработки и затопления мульды сдвижения горных пород.

Построение границ предохранительного целика в ГГИС MINEFRAME (рис. 4) произведено с учетом угла сдвижения горных пород в обводненных четвертичных отложениях (наносах) 35° [7; Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений. М.: Недра, 1988], мощности обводненных четвертичных отложений (наносов) 80 м, угла сдвижения коренных пород 70° [7], мощности скальных пород до 1140 м, ширины предохранительной бермы у водных объектов 20 м.

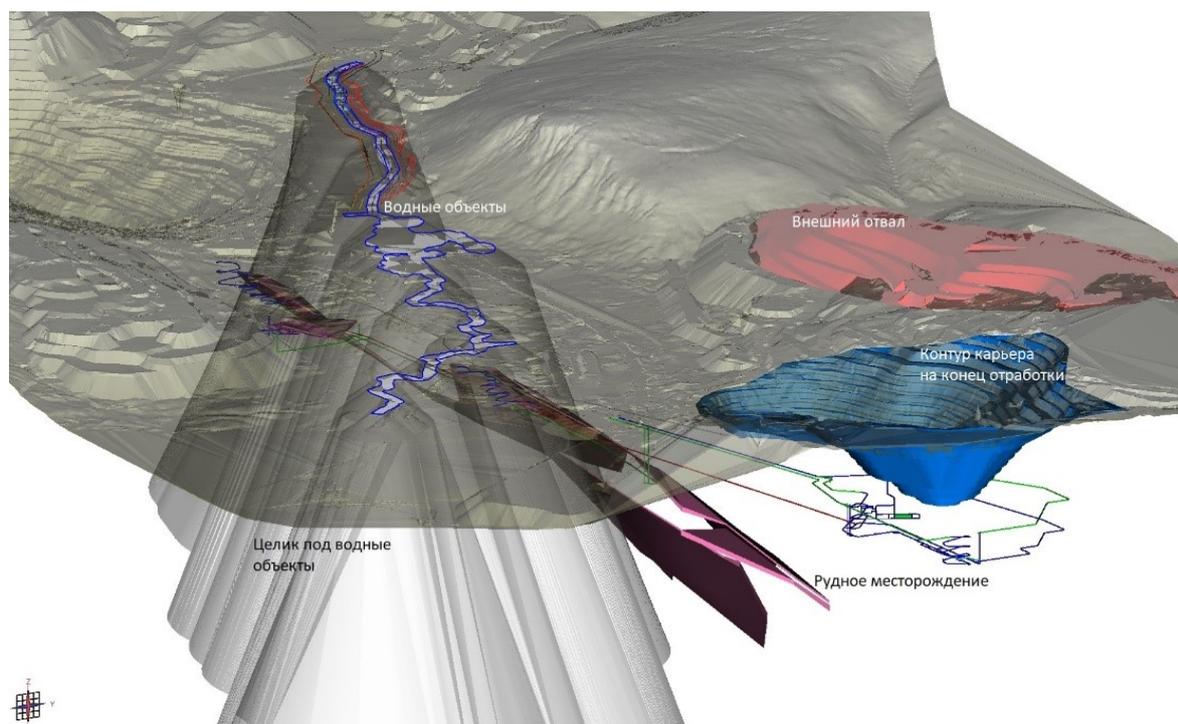


Рис. 4. Моделирование предохранительного целика под водными объектами, расположенными на земной поверхности, в районе рудного месторождения

Геологические запасы рудного месторождения в пределах предохранительного целика под руслом водных объектов (река и прилегающие мелкие озера), околтуренные по бортовому содержанию n_i %, составляют 35500 тыс. тонн (17,7 % от общих запасов) со средним содержанием полезного компонента 6,03 %.

Моделирование схемы вскрытия и подготовки при отработке запасов подземными горными работами

Вскрытие и подготовку к разработке запасов рудного месторождения системой разработки с обрушением руды и вмещающих пород представляется возможным осуществить в период отработки прибортовых и подкарьерных близлежащего карьера, находящегося в стадии завершения открытых горных работ, и с учетом месторасположения поверхностного комплекса сооружений на земной поверхности.

Для ускорения ввода в эксплуатацию запасов рудного месторождения и снижения объемов горно-капитального строительства при вскрытии и подготовке подземных запасов первой очереди строительства предусматривается задействовать существующие объекты на земной поверхности и горные выработки подземного рудника, разрабатывающего близлежащее рудное месторождение.

Исследуемое рудное месторождение на всем своем протяжении не имеет выхода на земную поверхность, а также в выработанное пространство близлежащего карьера. При моделировании схемы вскрытия первой очереди строительства предусматривается, что транспортировка горной массы на земную поверхность осуществляется по двум транспортным автосъездам, пройденным с земной поверхности (рис. 5). Порталы транспортных автосъездов размещаются в местах с наименьшей мощностью покрывающих горных пород над рудным месторождением, а также с учетом границы зоны ожидаемых сдвижений земной поверхности при ведении подземных горных работ. Объем строительства горно-капитальных и первоочередных подготовительных горных выработок определяется с помощью автоматизированного модуля планирования горных работ в ГГИС MINEFRAME.

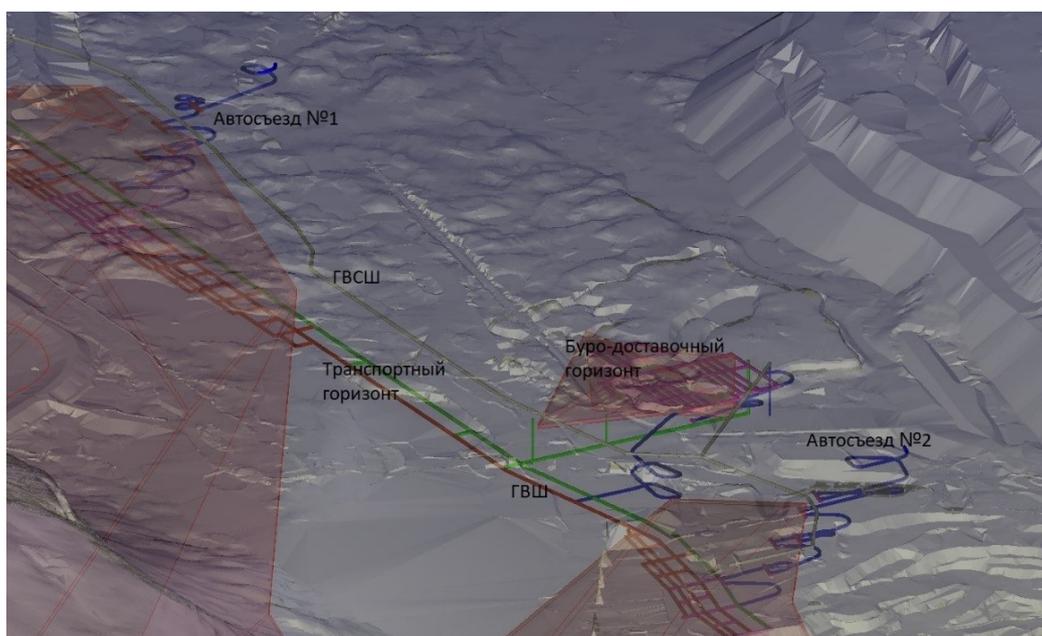


Рис. 5. Моделирование принципиальной схемы вскрытия и подготовки подземных запасов

Согласно проведенным расчетам, с учетом законсервированных запасов в предохранительном целике под руслом водных объектов на земной поверхности, годовая производственная мощность по добыче руды первой очереди отработки запасов подземными горными работами составит 450 тыс. т / год.

Покрывающая породная подушка при ведении подземных горных работ

Для обеспечения безопасной и комфортной среды при ведении подземных горных работ в условиях Крайнего Севера и отработке запасов системой разработки с обрушением руды и вмещающих пород на основании ранее проведенных исследований [8–10] определена необходимая мощность предохранительной и термоизоляционной подушки. Параллельно велась работа по моделированию увеличения объема внешнего отвала при ведении открытых горных работ на конец отработки близлежащего карьера и оценка его влияния на формирование породной подушки.

При проведении анализа мощности покрывающих пород выявлялись участки с дефицитом мощности покрывающих пород или его отсутствием в районе ведения очистных работ подземными горными работами.

Учитывались следующие факторы: 1) высотная отметка ближайшего подэтажа к земной поверхности, на котором планируется производить выпуск рудной массы; 2) фактическое состояние топоповерхности и планируемое положение зоны обрушения поверхности при ведении подземных горных работ; 3) средняя высота выпускаемого слоя рудной массы при отработке запасов рудной залежи ближайшего подэтажа к земной поверхности; 4) фактическая мощность покрывающих горных пород над рудной залежью.

В результате проведенных расчетов определено: 1) фактической мощности обрушаемых налегающих пород при отработке запасов рудного месторождения с применением системы разработки с принудительным обрушением руды и вмещающих пород достаточно для создания комфортных условий для более полного извлечения запасов и обеспечения безопасности ведения подземных горных работ; 2) дополнительного формирования на земной поверхности породной подушки в виде породного отвала не требуется.

Заключение

По результатам выполненной работы можно отметить следующее.

1. Использование цифрового моделирования обеспечило в сжатые сроки рассмотрение нескольких сценариев отработки сложных в геологическом отношении участков рудного месторождения.

2. Инструменты автоматизированной оценки объемов, привязанные к моделям горных выработок, существенно упростили процедуру предварительной оценки стоимости подземного строительства горных выработок на стадии вскрытия и подготовки при подземной отработке запасов.

3. Использование ГГИС MINEFRAME показало эффективность применения данного программного продукта для инвестиционной оценки целесообразности освоения рудных месторождений.

Список источников

1. Лукичев С. В., Козырев А. А., Семенова И. Э., Белгородцев О. В., Аветисян И. М., Хомкин Е. Е. Научное обоснование перспективной отработки апатит-нефелиновых руд на больших глубинах в сложных горно-геологических условиях // Вестник Кольского научного центра РАН. 2019. № 2. С. 5–13.
2. Günther F., Mischo H., Lösch R., Grehl S., Güth F. Increased safety in deep mining with IoT and autonomous robots // Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry. Proceedings of the 39th International Symposium APCOM 2019. Wroclaw, Poland. 2019. P. 603–611.
3. Dyson N. Syama's automation surge. URL: www.miningmagazine.com/technology-innovation/news/1387604/syama's-automation-surge/ (дата обращения: 06.09.2021).
4. Huang L., Balamurali M., Silversides K. L. Machine learning classification of geochemical and geophysical data // Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry. Proceedings of the 39th International Symposium APCOM 2019. Wroclaw, Poland. 2019. P. 101–105.
5. Avalos S., Ortiz J. M. Recursive convolutional neural networks in a multiple-point statistics framework // Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry. Proceedings of the 39th International Symposium APCOM 2019. Wroclaw, Poland. 2019. P. 168–176.
6. Feng S., Ding E. Designing top layer in Internet of Things for underground mines // Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry. Proceedings of the 39th International Symposium APCOM 2019. Wroclaw, Poland. 2019. P. 695–702.
7. Орлов Г. В. Сдвигение горных пород и земной поверхности под влиянием подземной разработки. М.: Горная книга, 2010. 198 с.
8. Насибулин Н. Н. Обоснование параметров предохранительной подушки при отработке подкарьерных запасов системами с обрушением: дис. ... канд. техн. наук. М., 2005. С. 37–46.
9. Соколов И. В., Смирнов А. А., Антипин Ю. Г., Никитин И. В., Тишков М. В. Обоснование толщины предохранительной подушки при отработке подкарьерных запасов трубки «Удачная» системами с обрушением // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 2. С. 52–62.

10. Lukichev S., Belogorodtsev O., Amosov P. Improvement of a mining technology for nearopen-pitreserves excavation in the northern conditions // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2017. Vol. 17, № 13. P. 415–422. DOI: 10.5593/sgem2017/13/S03.053

References

1. Lukichev S. V., Kozyrev A. A., Semenova I. E., Belogorodtsev O. V., Avetisyan I. M., Khomkin E. E. Nauchnoe obosnovanie perspektivnoj otrabotki apatit-nefelinovyh rud na bol'shikh glubinah v slozhnyh gorno-geologicheskikh usloviyah [Scientific substantiation of promising mining of apatite-nepheline ores at great depths in complex mining and geological conditions]. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo centra RAN* [Bulletin of Kola Scientific Center of RAS], 2019, no. 2, pp. 5–13. (In Russ.).
2. Günther F., Mischo H., Lösch R., Grehl S., Güth F. Increased safety in deep mining with IoT and autonomous robots. *Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry. Proceedings of the 39th International Symposium APCOM 2019*. Wroclaw, Poland, 2019, pp. 603–611.
3. Dyson N. Syama's automation surge. *Mining Magazine*. Available at: www.miningmagazine.com/technology-innovation/news/1387604/syama's-automation-surge/ (accessed 06.09.2021).
4. Huang L., Balamurali M., Silversides K. L. Machine learning classification of geochemical and geophysical data. *Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry. Proceedings of the 39th International Symposium APCOM 2019*. Wroclaw, Poland, 2019, pp. 101–105.
5. Avalos S., Ortiz J.M. Recursive convolutional neural networks in a multiple-point statistics framework. *Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry. Proceedings of the 39th International Symposium APCOM 2019*. Wroclaw, Poland, 2019, pp. 168–176.
6. Feng S., Ding E. Designing top layer in Internet of Things for underground mines. *Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry. Proceedings of the 39th International Symposium APCOM 2019*. Wroclaw, Poland, 2019, pp. 695–702.
7. Orlov G. V. *Sdvizhenie gornyh porod i zemnoj poverhnosti pod vliyaniem podzemnoj razrabotki* [Shift of rocks and the earth's surface under the influence of underground mining]. Moscow, Gornaya kniga, 2010, 198 p. (In Russ.).
8. Nasibulin N. N. *Obosnovanie parametrov predohranitel'noj podushki pri otrabotke podkar'ernyh zapasov sistemami s obrusheniem: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Justification of parameters of a safety cushion when mining under-coarse reserves by caving systems. PhD (Engineering) dis.]. Moscow, 2005, pp. 37–46.
9. Sokolov I. V., Smirnov A. A., Antipin Y. G., Nikitin I. V., Tishkov M. V. Obosnovanie tolshchiny predohranitel'noj podushki pri otrabotke podkar'ernyh zapasov trubki "Udachnaya" sistemami s obrusheniem [Substantiation of protective cushion thickness in mining under open pit bottom with the caving methods at Udachnaya pipe]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh* [Journal of Mining Science], 2018, vol. 54, no. 2, pp. 226–236.
10. Lukichev S., Belogorodtsev O., Amosov P. Improvement of a mining technology for nearopen-pitreserves excavation in the northern conditions. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, 2017, vol. 17, no. 13, pp. 415–422. DOI: 10.5593/sgem2017/13/S03.053

Информация об авторах

О. В. Белгородцев — научный сотрудник;
Г. О. Наговицын — научный сотрудник.

Information about the authors

O. V. Belogorodtsev — Researcher;
G. O. Nagovitsyn — Researcher.

Статья поступила в редакцию 14.10.2022; одобрена после рецензирования 29.10.2022; принята к публикации 08.11.2022.
The article was submitted 14.10.2022; approved after reviewing 29.10.2022; accepted for publication 08.11.2022.