14. Yakovlev V. M. Present-day crustal movements in the south wallrock area of the Khibiny massif by geometric leveling data. *Geophysics and geodynamics of the northeastern Baltic Shield: Collected papers*. Apatity: Izdatelstvo Kolskogo filiala AN SSSR, 1982. pp. 88–95.
15. Panasenko G. D. Seismic features of the northeastern Baltic Shield. Leningrad: Nauka, 1969. 185 p.
16. Panasenko G. D. Seismicity of the eastern Baltic Shield. *Seismicity and present-day crustal movements in the east of the Baltic Shield*. Apatity: Izdatelstvo Kolskogo filiala AN SSSR, 1980. pp. 12–13.
17. Syrnikov N. M., Tryapitsyn V. M. On the mechanism of the technogenic earthquake in Khibiny. *Transactions (Doklady) of the USSR Academy of Sciences. Earth Science Sections*. 1990. Vol. 314, No. 4. pp. 830–833.
18. Kozirev A. A., Semenova I. E., Rybin V. V., Panin V. I., Fedotova Yu. V., Konstantinov K. N. Guidelines for safe mining under conditions of rockburst hazard (Khibiny apatite–nepheline deposits). Apatity, 2016. 112 p.
19. Saharov A. N., Mozhaev S. A., Akkuratov M. V. About state of the massif after long-term mining operations. *Gornyi Zhurnal*. 2009. No. 9. pp. 39–42.
20. Korchak P. A., Zhukova S. A., Menshikov P. Yu. Seismic monitoring build-up and development in the production activity zone of Apatit JSC. *Gornyi Zhurnal*. 2014. No. 10. pp. 42–46.
21. Kozirev A. A., Fedotova Yu. V., Zhuravleva O. G., Zvonar A. Yu., Zaporozhets V. Yu. Extraction of zones with increased seismic hazard via the complex of prognostic criteria. *Gornyi Zhurnal*. 2010. No. 9. pp. 44–47.
22. Nordström E., Dineva S., Nordlund E. Back Analysis of Short-Term Seismic Hazard Indicators of Larger Seismic Events in Deep Underground Mines (LKAB, Kiirunavaara Mine, Sweden). *Pure and Applied Geophysics*. 2020. Vol. 177, Iss. 2. pp. 763–785.
23. Malovichko D. A. Assessment and testing of seismic hazard for planned mining sequences. *Deep Mining 2017: Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining*. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2017. pp. 61–77.
24. Zavyalov A. D. Mid-term earthquake prediction: Fundamentals, procedure, implementation. Moscow: Nauka, 2006. 254 p.

УДК 622.831.232

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОТРАБОТКИ СБЛИЖЕННЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В УДАРООПАСНЫХ УСЛОВИЯХ

И. И. СЕМЕНОВА,

ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук,
innas@goi.kolasc.net.ru

Горный институт Кольского научного центра РАН,
Апатиты, Россия

Введение

Сегодня в мире и Российской Федерации существуют несколько регионов, где ведется одновременная отработка крупных месторождений, что влечет за собой необходимость решения целого спектра задач. Одной из таких задач является минимизация негативного воздействия на биосферу: водный и воздушный бассейн, земную поверхность, недра, растительный и животный мир. Техногенное воздействие крупномасштабных горных разработок вносит также серьезные изменения в напряженно-деформированное состояние (НДС) протяженных участков земной коры и может являться причиной геодинамических явлений с катастрофическими последствиями. Особенно актуальной является задача геомеханического обоснования и прогнозов трансформации НДС по мере развития крупномасштабных горных работ в пределах рудных полей с выраженным действием тектонических напряжений, предопределяющих отнесение месторождений к склонным и опасным по горным ударам.

Как отмечает большинство специалистов, занимающихся геомеханическим обоснованием отработки запасов как подземным, так и открытым способами, изученность геологического строения месторождений, и в особенности вмещающего массива, на стадии принятия проектных решений является недостаточной [1–7]. Кроме того, данные о типе и параметрах НДС массива не всегда

Описан сложившийся в Горном институте КНЦ РАН научный подход решения геомеханических задач при разработке сближенных рудных месторождений в условиях действия высоких тектонических напряжений. Проблема изучена на примере Хибинского массива, где добыча апатит-нефелиновых руд ведется в удароопасных условиях одновременно на семи месторождениях. Предложено геомеханическое обоснование совместного ведения открытых и подземных горных работ на основе трехмерного моделирования напряженно-деформированного состояния массива скальных пород, предполагающего генерацию комплекса разномасштабных конечно-элементных моделей от рудного поля до отдельных элементов горной технологии.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, подземные и открытые горные работы, численное моделирование, сближенные месторождения, геодинамические риски, управление, геомеханические процессы, мониторинг.

DOI: 10.17580/gzh.2020.09.03

достовверны [8, 9]. Это ключевая проблема, с которой в той или иной мере связаны перечисленные ниже.

Во-первых, отработка блоков-целиков, что в условиях удароопасности сопряжена с дополнительными геомеханическими и геодинамическими рисками. Уменьшение числа стыковочных зон между встречными фронтами горных работ должно происходить еще на стадии регламентирования и проектирования выемки запасов. Во-вторых, особенности НДС подработанной толщи пород и прогноз развития процессов трещинообразования, сдвижения и обрушения до земной поверхности с учетом развития горных работ на смежных месторождениях. В-третьих, выбор технологий отработки запасов и разработка региональных и локальных мероприятий, учитывающих конкретные геологические, технологические и геомеханические аспекты месторождения, горизонта, блока.

Сопровождение горных работ с внедрением непосредственно на горных предприятиях систем прогноза и предупреждения горных ударов также должно осуществляться с учетом возможного воздействия развивающихся горных работ на смежных месторождениях.

Применяемые подходы и задачи исследований

В настоящее время при проектировании горных работ, как правило, ограничиваются рассмотрением одного месторождения, даже в случае, когда несколько смежных месторождений отрабатываются одним предприятием. При этом игнорируется тот факт, что в пределах одного рудного поля границы между месторождениями в большинстве случаев являются условными. На дальнейших стадиях планирования и отработки запасов сближенных месторождений горное предприятие сталкивается с необходимостью решения комплекса задач по отработке стыковочных зон в опасных условиях.

Еще меньше вероятность учета совместной отработки запасов при ведении горных работ на смежных месторождениях различными предприятиями. В данном случае одним из возможных вариантов минимизации потерь полезного ископаемого является пересмотр границ охранных целиков, стандартизация расчетов параметров которых в различных геомеханических условиях зачастую не оправдана. В частности, при дополнительном тектоническом сжатии пород размеры охранных целиков могут быть уменьшены.

На основе вышеизложенного можно говорить о том, что развитие теории геомеханического обоснования и обеспечения разработки сближенных удароопасных месторождений при ведении открытых и подземных горных работ является важной разноплановой научно-технической задачей, основой решения которой может служить трехмерное моделирование напряженно-деформированного состояния массива пород [10, 11] при выполнении следующих подзадач:

- исследование закономерностей изменения параметров НДС с глубиной при его гравитационно-тектоническом типе;
- оценка трансформации геомеханических условий при крупномасштабной совместной выемке запасов сближенных месторождений и определение зон взаимного влияния фронтов открытых и подземных горных работ;
- разработка методики и алгоритмов формирования комплекса геомеханических численных моделей для оценки влияния геологических и горнотехнических факторов на НДС массива горных пород на разных масштабных уровнях;
- исследование процессов деформирования и обрушения подработанной толщи пород в условиях преобладающего горизонтального сжатия;
- развитие принципов геомеханического сопровождения горных работ при разработке сближенных рудных месторождений в удароопасных условиях;
- разработка, обоснование и внедрение системы прогноза геомеханических условий и уровня удароопасности участков массива с целью выбора оптимального порядка ведения горных работ и обеспечения устойчивости элементов горной технологии на основе автоматизированных расчетов НДС.

Рис. 1. Схемы граничных условий и различия в структуре поля напряжений при гравитационном и гравитационно-тектоническом типах НДС (горизонтальное сечение, абсолютная высотная отметка +200 м)

U_x, V_y, W_z — перемещения по осям X, Y и Z соответственно;
 T — тектонические силы; λ — коэффициент соотношения тектонических сил

Объект исследований и разработка комплекса геомеханических моделей

Хибинский массив является крупнейшей сырьевой базой для производства минеральных удобрений, которая представлена десятью месторождениями и не имеет аналогов в мире. Шесть из них эксплуатируются КФ АО «Апатит», два принадлежат АО «Северо-западная фосфорная компания» (СЗФК), еще два находятся в резерве. За период освоения месторождений добыто около 2 млрд т руды (более 1/3 всех запасов), перемещено более 4,5 млрд т горной массы. Все отрабатываемые месторождения расположены в южной части Хибинского массива в районе так называемой апатитовой дуги в непосредственной близости друг от друга.

Положительным фактором для разработки комплекса адекватных геомеханических моделей является достаточная изученность геологического строения и параметров НДС массива. Многолетними инструментальными измерениями установлено, что тип напряженно-деформированного состояния является гравитационно-тектоническим с существенным превышением горизонтальной составляющей σ_x по отношению к вертикальной γH , где γ — объемный вес, H — высота налегающей толщи пород. На глубинах ведения горных работ в пределах апатитовой дуги Хибин $\sigma_x > 2\gamma H$. Получены также данные о характере изменения тектонических напряжений от земной поверхности до нулевой высотной отметки и соотношения горизонтальных компонент напряжений $\sigma_x : \sigma_y = 0,4 \div 0,6$. Еще один параметр, необходимый для геомеханического обоснования при планировании горных работ, — направление действия максимальной компоненты сжимающих напряжений $\sigma_{\max}$, которое для тектонического блока, включающего Хибинский массив, является субширотным [12].

Рис. 2. Направление действия тектонического сжатия на участках Хибинской апатитовой дуги

Для решения подобного рода задач разработан методический подход, в соответствии с которым моделирование осуществляли путем последовательных приближений на нескольких масштабных уровнях [13]. Для численного моделирования НДС использовали метод конечных элементов в объемной постановке, реализованный в оригинальном программном комплексе Sigma GT (рис. 1). В модели учтены: вложенная кольцевая структура массива, радиальные разломы, гористый рельеф земной поверхности, параметры рудных тел и горнотехнические факторы на каждом месторождении.

Увеличение абсолютных величин σ_t с глубиной при гравитационно-тектоническом типе напряженно-деформированного состояния аппроксимируется параболической зависимостью. На больших глубинах в силу постепенного выравнивания действующих на массив горизонтальных и вертикальных напряжений происходит трансформация типа НДС. Чем меньше уровень действующих тектонических напряжений, тем на меньшей глубине происходит выравнивание горизонтальной и вертикальной составляющих поля напряжений, приближая его к квазигидростатическому.

На основе результатов регионального моделирования подтверждены гипотеза трансформации типа НДС с глубиной и переориентировка главных напряжений в блоках массива между радиальными разломами (рис. 2). Ниже абсолютных высотных отметок $-1000 \dots -1200$ м вертикальные напряжения превалируют над горизонтальными. Иными словами, все разведанные запасы Хибинской апатитовой дуги будут обрабатываться в условиях выраженного тектонического сжатия пород. При этом наибольшие концентрации сжимающих напряжений приурочены к краевым зонам разломных

структур и границам разномодульных сред. В самих разломах максимальные напряжения ориентированы перпендикулярно их простиранию и остаются субгоризонтальными даже на больших глубинах.

Разработанная модель Хибинского массива является основой для формирования крупномасштабных моделей участков Апатитовой дуги и задания граничных условий путем интерполяции узловых перемещений. К настоящему времени сгенерировано более 30 3D-конечно-элементных моделей различного объема и детальности — от нескольких километров с минимальными

Рис. 3. Зависимость $\sigma_{\max}$ от расстояния между очистными фронтами (синяя кривая). Красной линией показаны 10%-ный уровень увеличения напряжений по сравнению с исходным и соответствующий ему размер блока-целика

размерами элементов 5–10 м до отдельных блоков и элементов системы разработки с минимальными размерами ячейки в единицы сантиметров.

Методика геомеханического обоснования выемки запасов стыковочных зон

Выемку запасов стыковочных зон необходимо регламентировать с позиций технологии и обеспечения безопасности горных работ. При этом обоснование оптимального варианта развития горных работ в стыковочной зоне предполагает последовательное выполнение следующих этапов.

Определение зоны взаимного влияния горных работ.

Предлагаемое определение блока-целика – это участок рудной залежи между встречными фронтами очистных работ (как открытых, так и подземных) с размерами, при которых начинается их взаимовлияние. Существуют несколько упрощенных подходов к нахождению данных размеров. Можно основываться на принципе Сен-Венана [14], который, по сути, сводится в данном случае к влиянию, распространяемому на размер трех радиусов очистной выемки; или воспользоваться формулой $L_{\min} \leq (L_1 + L_2)/2$, где L_1 и L_2 – размеры очистных пространств [15]. Однако при практическом использовании данных подходов при сложной геометрии и объемности очистных пространств возникает вопрос: каким образом определить необходимые радиусы и размеры.

Предлагается определять размер блока-целика на основе расчетных данных при последовательном развитии (сближении) горных работ. Критическим считать $\geq 10\%$ -ное изменение напряжений в целике между горными работами по сравнению с начальным уровнем. Такое изменение является существенным для фактической точности определения параметров напряженного состояния массива существующими методами. Задача определения размеров блока-целика решается графическим методом (рис. 3). Исходные данные для построения графика берут из расчетов НДС с учетом текущей и планируемой в процессе отработки запасов геометрии очистных пространств.

Определение оптимального порядка работ в блоке-целике. Основной целью при решении данной задачи является выбор такого порядка развития горных работ и параметров системы разработки, при которых концентрация напряжений в массиве блока-целика будет наименьшей, что снизит геодинамические риски. В то же время важно помнить, что избыточная разгрузка массива также может негативно сказаться на условиях отработки, увеличив вероятность разрушений за счет действия растягивающих напряжений и деформаций и прорастания трещин отрыва, особенно в геологически и технологически нарушенных зонах. Варианты развития горных работ с различными параметрами элементов системы разработки также могут быть просчитаны с помощью разработанных численных моделей.

ГоИ КНЦ РАН предложена технология ведения работ с созданием защитных зон (например, опережающая разгрузочная

Рис. 4. Определение оптимального порядка работ в блоке-целике на основе модельных геомеханических расчетов

зона висячем боку рудной залежи), которые позволяют снизить уровень максимальных сжимающих напряжений в значительной части обрабатываемого массива более чем в 2 раза [16]. На основании результатов распределения показателя соотношения действующих напряжений на контуре выработок ортового и штрекового направлений к пределу прочности пород при одноосном сжатии $\sigma_d : \sigma_{сж}$ может быть выбрана ортовая или штрековая подготовка запасов; в зависимости от объемов разгрузки массива определяют значения защитных углов и опережений (рис. 4).

Определение месторасположения и размеров стыковочной секции. Стыковочная секция — это участок между встречными фронтами горных работ, отбойку которого осуществляют за один прием. Размер стыковочной секции соответствует предельному минимальному расстоянию, до которого могут сбиться встречные фронты работ при сохранении устойчивости секции. Оработка стыковочных секций сопряжена с наиболее высокой степенью удароопасности. Ширина стыковочной секции определяется на основе уравнения предельного состояния: $k_3(\sigma_{\max} + \sigma_{ср}) = k_{осл}\sigma_c + k\sigma_{\min}$, где σ_c — прочность породы при одноосном сжатии; $\sigma_{\max}$, $\sigma_{ср}$, $\sigma_{\min}$ — соответственно максимальная, промежуточная и минимальная компоненты главных напряжений, действующих в стыковочной секции; k — коэффициент пропорциональности; $k_{осл}$ — коэффициент структурного ослабления; k_3 — коэффициент запаса устойчивости с учетом времени оработки стыковочной секции. Решение уравнения может быть найдено аналитически или графически. Во втором случае для левой и правой частей уравнения строят графики зависимости от размера секции (соответственно кривые 1 и 2 на рис. 5). Точка их пересечения соответствует минимально возможной ширине стыковочной секции.

Разработка профилактических мероприятий регионального и локального уровня проводится для определенных в процессе геомеханического обоснования параметров горных работ и включает предложения по мониторингу сейсмичности и выявлению зон повышенной опасности разрушения массива горных пород. Методика комплексной оценки сейсмической активности массива основана на совместном использовании нескольких прогностических критериев, различных по физическому смыслу и дополняющих друг друга [17]. Комплексирование сейсмических данных и результатов численного моделирования НДС массива позволяет устанавливать причину возникновения динамических явлений и более точно оценивать прогнозные параметры опасных зон (рис. 6).

Оценка параметров деформирования и обрушения подработанной толщи пород

Наибольшая концентрация напряжений при оработке апатитовых месторождений Хибин наблюдается в зоне опорного давления. В определенной мере снижение уровня напряжений и перемещение зоны опорного давления на большее удаление от области активного ведения горных работ могут происходить при обрушении подработанной толщи пород. Основным способом управления обрушением покрывающих пород до поверхности является обеспечение очистными работами предельных

Рис. 5. Графическое определение ширины стыковочной секции для уравнения предельного состояния пород:
1, 2 — левая и правая части уравнения соответственно

Рис. 6. Комплексирование потенциально опасных зон по уровню сейсмической активности с зонами концентрации сжимающих напряжений. Результаты расчетов ПК MIEPS (О. Г. Журавлева) и Sigma GT

параметров подработки в крест простирания и по простиранию рудного тела [18].

Установлены основные особенности процесса деформирования подработанных пород при действии в массиве тектонических сил, заключающиеся в формировании зоны сжатия между областями потенциального частичного обрушения и приповерхностного трещинообразования. В этой зоне развитие трещин отрыва затруднено, что сдерживает формирование единого разрыва до земной поверхности. Параметры данных зон зависят в значительной мере от направления тектонического сжатия. Предложена методика прогноза параметров обрушений налегающих пород в скальных массивах, основанная на численном моделировании объемного напряженно-деформированного состояния, с использованием критерия разрушения по абсолютным значениям растягивающих напряжений, с учетом ориентации площадок $\sigma_{\min}$

Рис. 7. Зоны растягивающих напряжений $\sigma_{\min}$ в окрестности создаваемых обнажений. Зеленым цветом показаны рудные тела; бежевым – очистные пространства

и элементов тектонической нарушенности подработанной толщи пород [19] (рис. 7), а также касательных напряжений $\tau_{\max}$ и площадок сдвига.

В результате применения данной методики выделяют области, в которых наиболее вероятны формирование трещин отрыва и реализация сдвига, например участки борта карьера, подсекаемые разломными структурами, на которые одновременно оказывают влияние развивающиеся подземные горные работы.

Реализация предлагаемого подхода при отработке сближенных месторождений позволит снизить геодинамические риски и связанные с ними разрушения горных выработок, а также простои оборудования при ведении горных работ, что приведет к сокращению затрат на профилактические мероприятия по приведению выработок в безопасное состояние и их крепление.

Работа выполнена в рамках тем НИР, в том числе по теме 0226-2019-0058, а также при поддержке предприятий КФ АО «Апатит» и АО «СЗФК» при проведении исследований по договорам. Полученные результаты использованы в обновленных инструктивных документах и регламентах отработки месторождений, горизонтов и стыковочных зон Хибинской апатитовой дуги.

Выводы

Таким образом, основные положения развития теории обоснования отработки сближенных месторождений в условиях действия высоких тектонических напряжений заключается в следующем.

1. Установлены особенности напряженно-деформированного состояния Хибинского массива при последовательной выемке запасов апатит-нефелиновых месторождений с учетом широтного направления тектонического сжатия, кольцевой структуры, основных радиальных разломов, гористого рельефа земной поверхности, геометрии рудных тел.

2. Обоснована методика отработки сближенных рудных месторождений в удароопасных условиях, включающая зависимости для определения размеров блока-целика и стыковочной секции, с учетом объемного НДС массива пород.

3. Разработана система комплексной оценки и прогноза геомеханических условий с целью выбора оптимального порядка ведения горных работ и обеспечения устойчивости элементов горной технологии и участков массива горных пород на основе автоматизированных расчетов НДС в программном комплексе Sigma GT.

Библиографический список

1. Трубецкой К. Н., Мясков А. В., Галченко Ю. П., Еременко В. А. Обоснование и создание конвергентных горных технологий подземной разработки мощных месторождений твердых полезных ископаемых // Горный журнал. 2019. № 5. С. 6–13. DOI: 10.17580/gzh.2019.05.01
2. Козырев А. А., Панин В. И., Семенова И. Э., Рыбин В. В. Геомеханическое обеспечение горных работ на горнодобывающих предприятиях Мурманской области // Горный журнал. 2019. № 6. С. 45–50. DOI: 10.17580/gzh.2019.06.05
3. Laubscher D. H. A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 1990. Vol. 9. No. 10. P. 257–273.
4. Макаров А. Б., Рассказов И. Ю., Саксин Б. Г., Ливинский И. С., Потанчук М. И. Геомеханическое обоснование параметров камерной системы разработки при переходе на подземный способ добычи руд // ФТПРПИ. 2016. № 3. С. 27–38.
5. Human L., Jupp B. Geotechnical data collection and presentation – it starts and ends with a vision // AusIMM Bulletin. 2016. August.
6. Bye A. The strategic and tactical value of a 3D geotechnical model for mining optimization, Anglo Platinum, Sandsloot open pit // The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy. 2006. Vol. 106. Iss. 2. P. 97–104.
7. Li C. C. Dynamic rock support in burst-prone rock masses // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses : Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium. – London : Taylor & Francis Group, 2018. Vol. 1. P. 47–62.
8. Ливинский И. С., Митрофанов А. Ф., Макаров А. Б. Комплексное геомеханическое моделирование: структура, геология, разумная достаточность // Горный журнал. 2017. № 8. С. 51–55. DOI: 10.17580/gzh.2017.08.09
9. Marjanović M., Pejić M., Krušić J., Abolmasov B. Jointed rock mass characterization using field and point-cloud data // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses :

- Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium. – London : Taylor & Francis Group, 2018. Vol. 1. P. 319–324.
10. Lisjak A., Mahabadi O. K., He L., Tatone B. S. A., Kaifosh P., Haque S. A., Grasselli G. Acceleration of a 2D/3D finite-discrete element code for geomechanical simulations using General Purpose GPU computing // *Computers and Geotechnics*. 2018. Vol. 100. P. 84–96.
 11. De Simone M., Pereira F. L. G., Roehl D. M. Analytical methodology for wellbore integrity assessment considering casing-cement-formation interaction // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017. Vol. 94. P. 112–122.
 12. Kozыrev A. A., Savchenko S. N. The Eurasia lithospheric plate horizontal tectonic stresses modelling // *Geocology and Computers*. – Abingdon : Taylor & Francis, 2000. P. 431–435.
 13. Козырев А. А., Енютин А. Н., Мальцев В. А., Семенова И. Э. Методика регионального прогноза удароопасности и состояния массива пород и выбора технических решений по обеспечению безопасности и эффективности горных работ // *Инновационный потенциал Кольской науки : сб. ст. – Апатиты : КНЦ РАН, 2005. С. 52–56.*
 14. Timoshenko S., Goodier J. N. Theory of elasticity. – New York : McGraw-Hill Book Company, Inc., 1951. – 519 p.

15. Рыбин В. В. Геомеханическое обоснование отработки стыковочных зон между подземными рудниками и карьерами в удароопасных условиях (на примере апатитовых рудников Хибин) : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Апатиты, 2000. – 26 с.
16. Козырев А. А., Панин В. И., Семенова И. Э., Журавлева О. Г. О геодинамической безопасности горных работ в удароопасных условиях на примере Хибинских апатитовых месторождений // *ФТПРПИ*. 2018. № 5. С. 33–44.
17. Козырев А. А., Журавлева О. Г. Комплексный подход к оценке сейсмической опасности при ведении горных работ // *Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений : тезисы докл. Всероссийской науч. конф. с междунар. участием*. – М. : ИТПЗ РАН, 2019. С. 55.
18. Указания по управлению обрушением покрывающих пород, охране сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на рудниках открытого акционерного общества «Апатит». – Апатиты, 2002. – 51 с.
19. Аветисян И. М., Семенова И. Э., Дмитриев С. В., Шестов А. А. Анализ главных касательных напряжений и площадок сдвига в объемной модели упруго-деформируемого массива горных пород // *ГИАБ*. 2017. Спец. выпуск 23. Информационные технологии в реализации экологической стратегии развития горнодобывающей отрасли. С. 258–264. [ГЖ](#)

«GORNYI ZHURNAL», 2020, № 9, pp. 26–32
DOI: 10.17580/gzh.2020.09.03

Geomechanical aspects of development of closely spaced ore deposits under conditions of rockburst hazard

Information about author

I. E. Semenova¹, Leading Researcher, Candidate of Engineering Sciences, innas@goi.kolasc.net.ru

¹Mining Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Abstract

This article presents a scientific approach to the solution of geomechanical problems arising in mining of closely spaced ore deposits under high tectonic stresses. The approach has been developed at the Mining Institute of the Kola Science Center, RAS. The article gives a case-study of the Khibiny massif subjected to simultaneous mining of seven apatite–nepheline deposits under conditions of rockburst hazard.

The author proposes geomechanical justification for the joint opencast and underground mining operations based on the 3D modeling of the stress–strain behavior of rock mass, including generation of a package of different-scale finite element models, starting from the scale of an ore field and down to certain geotechnical elements. The justification procedure includes:

- geomechanical transformation assessment in rock mass under large-scale parallel excavation of reserves from closely spaced deposits and determination of mutual influence zone of the opencast and underground mining fronts;
- development of a procedure and algorithms for the formation of a package of geomechanical numerical models to assess geological and geotechnical effects on the stress–strain behavior of rock mass on different scales;
- studies of deformation and failure of undermined rocks under prevailing horizontal compression;
- development of the geomechanical supervision principles for mining operations in closely spaced ore deposits under conditions of rockburst hazard.

The study was carried within an R&D project, including Topic No. 0226-2019-0058, and was supported by Apatit's Kirovsk Division and by the North-Western Phosphorus Company. The results were included in the updated guidance documents and regulations for mining operations in ore bodies, on horizons and at interfaces in the Khibiny apatite arc.

Keywords: stress–strain behavior, underground and opencast mining, numerical modeling, closely spaced deposits, geodynamic risks, control, geomechanical processes, monitoring.

References

1. Trubetskoy K. N., Myaskov A. V., Galchenko Yu. P., Eremenko V. A. Creation and justification of convergent technologies for underground mining of thick solid mineral deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2019. No. 5. pp. 6–13. DOI: 10.17580/gzh.2019.05.01
2. Kozыrev A. A., Panin V. I., Semenova I. E., Rybin V. V. Geomechanical support of mining operations in mines of the Murmansk Region. *Gornyi Zhurnal*. 2019. No. 6. pp. 45–50. DOI: 10.17580/gzh.2019.06.05
3. Laubscher D. H. A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 1990. Vol. 9, No. 10. pp. 257–273.

4. Makarov A. B., Livinsky I. S., Rasskazov I. Yu., Saksin B. G., Potapchuk M. I. Geomechanical evaluation of roof-and-pillar parameters in transition to underground mining. *Journal of Mining Science*. 2016. Vol. 52, Iss. 3. pp. 438–447.
5. Human L., Jupp B. Geotechnical data collection and presentation – it starts and ends with a vision. *AusIMM Bulletin*. 2016. August.
6. Bye A. The strategic and tactical value of a 3D geotechnical model for mining optimization, Anglo Platinum, Sandsloot open pit. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2006. Vol. 106, Iss. 2. pp. 97–104.
7. Li C. C. Dynamic rock support in burst-prone rock masses. *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses : Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium*. London : Taylor & Francis Group, 2018. Vol. 1. pp. 47–62.
8. Livinskiy I. S., Mitrofanov A. F., Makarov A. B. Complex geomechanical modeling: structure, geology, reasonable sufficiency. *Gornyi Zhurnal*. 2017. No. 8. pp. 51–55. DOI: 10.17580/gzh.2017.08.09
9. Marjanović M., Pejić M., Krušić J., Abolmasov B. Jointed rock mass characterization using field and point-cloud data. *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses : Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium*. London : Taylor & Francis Group, 2018. Vol. 1. pp. 319–324.
10. Lisjak A., Mahabadi O. K., He L., Tatone B. S. A., Kaifosh P. et al. Acceleration of a 2D/3D finite-discrete element code for geomechanical simulations using General Purpose GPU computing. *Computers and Geotechnics*. 2018. Vol. 100. pp. 84–96.
11. De Simone M., Pereira F. L. G., Roehl D. M. Analytical methodology for wellbore integrity assessment considering casing-cement-formation interaction. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017. Vol. 94. pp. 112–122.
12. Kozыrev A. A., Savchenko S. N. The Eurasia lithospheric plate horizontal tectonic stresses modelling. *Geocology and Computers*. Abingdon : Taylor & Francis, 2000. pp. 431–435.
13. Kozыrev A. A., Enyutin A. N., Maltsev V. A., Semenova I. E. Procedure for regional prediction of rockburst hazard and rock mass behavior and engineering decision-making on safe and efficient mining. *Innovation potential of Kola science : Collected papers*. Apatity : KNTs RAN, 2005. pp. 52–56.
14. Timoshenko S., Goodier J. N. Theory of elasticity. New York : McGraw-Hill Book Company, Inc., 1951. 519 p.
15. Rybin V. V. Geomechanical justification of mining in interface zones of open pit and underground mines under rock burst hazard (A case-study of Khibiny mines) : thesis of inauguration of Dissertation ... of Candidate of Engineering Sciences. Apatity, 2000. 26 p.
16. Kozыrev A. A., Panin V. I., Semenova I. E., Zhuravleva O. G. Geodynamic safety of mining operations under rockburst-hazardous conditions in the Khibiny apatite deposits. *Journal of Mining Science*. 2018. Vol. 54, Iss. 5. pp. 734–743.
17. Kozыrev A. A., Zhuravleva O. G. Integrated approach to seismic hazard prediction during mining. *Modern Methods of Seismic Hazard Assessment and Earthquake Prediction : Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation*. Moscow : IEPT RAS, 2019. p. 55.
18. Guides on overlying rock failure control and protection of structures and natural objects from harmful effect of underground mining at Apatit JSC. Apatity, 2002. 51 p.
19. Avetisyan I. M., Semenova I. E., Dmitriev S. V., Shestov A. A. Analysis of the principal tangential stresses and shear areas in the volumetric model of an elastically deformed rock mass. *GAB*. 2017. Special issue 23. Information technologies in implementation of ecological strategy in the mining industry development. pp. 258–264.