

УДК 622.83

**АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПРОЦЕССОВ ОБРУШЕНИЯ ПОДРАБОТАННЫХ ПОРОД
НА ХИБИНСКИХ АПАТИТОВЫХ РУДНИКАХ****И. Э. Семенова, И. М. Аветисян, О. Г. Журавлева, О. В. Белогородцев***Горный институт Кольского научного центра РАН,**E-mail: i.semenova@ksc.ru, ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия*

Показана актуальность исследования процессов деформирования, сдвижения и обрушения подработанной толщи пород на удароопасных месторождениях Хибинского массива с учетом геодинамических и геомеханических рисков. Проанализированы особенности развития обрушения подработанных пород в условиях действия тектонических напряжений, заключающиеся в препятствии субгоризонтального сжатия процессу трещинообразования в них. Установлено, что с уменьшением мощности рудных тел и с ростом их угла падения на больших глубинах происходит увеличение шага обрушения. Обоснован перечень задач, решение которых позволит продолжить отработку запасов месторождений апатит-нефелиновых руд при минимизации опасности негативных техногенных явлений и сохранении экономической эффективности разработки месторождений.

Тектонически напряженные массивы горных пород, удароопасные месторождения, процессы обрушения подработанных покрывающих пород, напряженно-деформированное состояние, сейсмическая активность, системы подземной разработки

DOI: 10.15372/FTPRPI20220614

Истощение наиболее богатых и легкодоступных для освоения запасов месторождений, необходимость увеличения глубины горных работ удорожают добычу полезных ископаемых и отрицательно влияют на безопасность производственных процессов не только открытых, но и подземных горных работ. Дополнительными ограничениями в условиях отработки запасов Хибинских апатитовых месторождений являются: местонахождение ряда апатит-нефелиновых месторождений в непосредственной близости друг от друга и, как следствие, значительный объем запасов, расположенных в охранных целиках; залегание отдельных месторождений в природоохранных зонах; действие высоких тектонических напряжений, обуславливающих удароопасность отрабатываемых месторождений, особенно на больших (около 1000 м от дневной поверхности) глубинах. Задача обоснования параметров подземной разработки запасов с учетом указанной специфики работ в настоящее время до конца не решена.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-17-00248), <http://rsf.ru/project/22-17-00248>.

Представляются актуальными проблемы комплексного исследования геомеханических процессов в толще подработанных покрывающих пород с обоснованием параметров подземной геотехнологии при учете основных геологических и горнотехнических факторов и ограничений, а также разработки методологического подхода к проектированию параметров малолюдной подземной технологии на основе объемного численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива при ведении горных работ на больших глубинах и в охранных зонах удароопасных месторождений [1 – 5]. Реализация такого подхода позволит вовлечь в отработку запасы Хибинских удароопасных месторождений, находящиеся в охранных зонах, при снижении рисков опасных техногенных явлений и повышении экономической эффективности их разработки.

СПЕЦИФИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Практически все подземные запасы Хибинских апатитовых месторождений отрабатываются системой с обрушением руды и вмещающих пород — подэтажным принудительным обрушением с торцевым выпуском руды. Отбойка руды при этой системе осуществляется с помощью глубоких скважин, вслед за обрушенной рудой происходит самообрушение покрывающих рудное тело пород, которые заполняют выработанное очистное пространство. Возможность успешного применения системы подэтажного обрушения с торцевым выпуском руды зависит от ряда горно-геологических факторов: физико-механических свойств вмещающих пород, мощности и угла падения залежи, структурных особенностей массива (трещиноватости, тектонических разрывов, ослабленных зон), глубины разработки и формы рельефа дневной поверхности, типа и параметров напряженного состояния, давления ранее обрушенных пород, естественной и техногенной сейсмичности массива.

Деформация подработанного массива горных пород — один из важных процессов, влияющих на эффективность и безопасность разработки месторождений. Специфика данного процесса для месторождений Хибин связана прежде всего с гравитационно-тектоническим типом напряженного состояния массива горных пород. Причем обе горизонтальные составляющие тензора напряжений превышают вертикальную составляющую на текущих глубинах ведения горных работ и на глубинах перспективной отработки запасов до абсолютной отметки 1000 м, а отношение тектонических напряжений к гравитационным может составлять более 3, $\sigma_T / \sigma_g \geq 3$.

Высокий уровень горизонтальных сжимающих напряжений совместно с уменьшением мощности рудных тел и изменением угла их падения на больших глубинах препятствует планомерному обрушению подработанных покрывающих рудные тела пород. С одной стороны, это приводит к значительным дополнительным затратам на принудительное обрушение вмещающих пород, с другой — обеспечивает большую устойчивость охранных целиков и возможность пересмотра их границ. Так, на рис. 1 приведен пример формирования свода обрушения без выхода на дневную поверхность при развитии горных работ на глубине 700 м в условиях тектонического сжатия.

Интересно, что на месторождениях Хибин есть протяженные участки, где обрушение до дневной поверхности подработанного массива реализовано и развивается в течение нескольких десятилетий (подземные рудники АО «Апатит»), но есть и месторождение Олений ручей (АО «СЗФК», разработка ведется около 10 лет), где обрушение пока не вышло на поверхность.



Рис. 1. Распределение напряжений $\sigma_{\min}$ (МПа) в окрестности очистного пространства в разрезе по простиранию рудной залежи при отработке запасов месторождения Олений ручей

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ РЕЙТИНГОВОЙ ОЦЕНКИ МАССИВА

Для устойчивости массивов горных пород в мировой практике используются классификации, в которых физико-механические свойства и геомеханические характеристики массивов систематизированы и сведены к общему числовому рейтинговому показателю. Наиболее часто используемыми системами рейтинговых оценок являются: Q -система, разработанная Бартоном, рейтинговая характеристика породного массива Бенявского (Rock Mass Rating, RMR), рейтинговая характеристика породного массива Лобшира (IRMR и MRMR), геологический индекс прочности (Geological Strength Index, GSI) Хука и Брауна и др. [6–8]. На основе полученного рейтинга оценивается прочность массива и делается вывод об его устойчивости. В большинстве систем отсутствует учет тектонических напряжений. В некоторых системах значения тектонических напряжений учитываются в виде одного из показателей, что представляется недостаточным для объективной оценки устойчивости массива.

Проведем приближенную оценку рейтинга MRMR для апатитовых месторождений Хибин:

$$\text{MRMR}_{\Pi} = (R_{\text{RBS}} + J_S + J_C) K,$$

здесь R_{RBS} — прочность породного блока; J_S — рейтинг по количеству трещин; J_C — рейтинг условий трещиноватости; K — коэффициент, учитывающий выветривание, ориентацию трещин, напряжения в массиве, взрывание, наличие подземных водопритоков.

В достаточно однородном массиве, без жил и разрывов, показатель R_{RBS} вычисляется как $R_{\text{RBS}} = \text{IRS} \times 0.8$, где IRS — предел прочности пород на одноосное сжатие. Возьмем значение усредненного предела прочности вмещающих пород и руд на одноосное сжатие ≈ 140 МПа. Тогда $R_{\text{RBS}} = 140 \times 0.8 = 112$. Для реального массива это значение будет значительно меньше. Рейтинговый показатель $R_{\text{RBS}} \approx 22$. Рейтинг J_S зависит от показателя густоты трещин (FF/m) или от расстояния между трещинами в массиве и составляет для апатитовых месторождений $J_S \approx 35$. Значения рейтингового показателя J_C по закрытым трещинам варьируют от 3 до 40 баллов. Примем для расчетов $J_C = 20$.

Водопритоки понижают прочность массива, приближенный понижающий коэффициент $K=0.8$. Остальные понижающие коэффициенты (выветривания и т. д.) не учитываются. В итоге $MRMR_{II} = (22 + 35 + 20) \times 0.8 \approx 62$. Это означает, что массив относится ко II классу с хорошей устойчивостью пород.

Основной показатель обрушаемости массива — гидравлический радиус HR , определяемый как отношение площади обнажения к его периметру. Для его расчета используем график, представленный на рис. 2: $HR = (a \times b) / (2a + 2b) \approx 30$, где a, b — размеры обнажения по простиранию и вкрест рудной залежи.

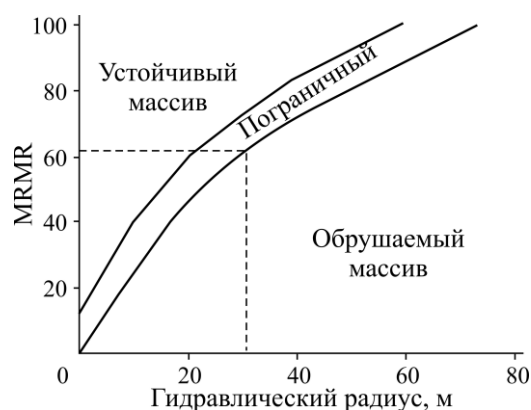


Рис. 2. Определение усредненного гидравлического радиуса для массива пород рудников Хибин

С учетом полученных зависимостей достаточно хорошо определяется возможность применения систем с обрушением и параметров обнажения для реализации обрушения пород на начальном этапе разработки. Однако в том случае, когда обрушение до поверхности уже произошло и идет его развитие, не совсем корректным является задание параметров подработки массива в качестве гидравлического радиуса. Так, для фактических обрушений последних лет на разных участках Хибинских месторождений HR варьирует в широких пределах — от 15 до 40. Для каждого конкретного участка гидравлический радиус, при котором происходит самообрушение пород до поверхности, различен.

Многие исследователи считают, что если обрушение уже достигло поверхности, то последующие обрушения доходят до поверхности независимо от высоты этажа (подэтажа) и глубины ведения горных работ при определенных геомеханических свойствах массива для одного и того же гидравлического радиуса подработки. Однако, как показали многолетние наблюдения за процессом обрушения на подземных рудниках АО «Апатит», имеет место тенденция к образованию все более мощных зависаний подработанных пород и, соответственно, увеличению шага обрушения с увеличением глубины горных работ.

НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

В настоящее время параметры обрушения подработанной толщи покрывающих рудные тела пород, параметры охранных целиков и порядок ведения горных работ в них определены в следующих основных нормативных документах:

- инструкция о порядке утверждения мер охраны зданий, сооружений и природных объектов от вредного влияния горных разработок (РД 07-113—96);

- временные правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок месторождений руд цветных металлов с неизученным процессом сдвижения горных пород (ВНИМИ, 1986 г.);

- локальные нормативные документы для отдельных месторождений и горных предприятий.

В соответствии с данными документами перед отработкой запасов месторождения устанавливаются области влияния подземных горных выработок по границам зон опасных сдвижений с учетом прочностных характеристик массива пород. Предполагается, что для массива характерен гравитационный тип поля напряжений, а действие тектонических напряжений не учитывается. Однако последние исследования показывают, что наличие тектонических напряжений в значительной мере влияет на напряженно-деформированное состояние подработанной толщи пород. При этом меняются как область влияния подземных горных работ, так и параметры обрушения до дневной поверхности. Важно отметить, что при определенном уровне и направлении тектонических напряжений устойчивость налегающего массива повышается [9]. В этой связи видится целесообразным внесение соответствующих корректировок в нормативные документы, особенно на уровне горных предприятий, с учетом фактических геомеханических условий.

ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗА ОБРУШЕНИЙ В ТЕКТОНИЧЕСКИ НАПРЯЖЕННЫХ МАССИВАХ ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ГЛУБИНЫ ГОРНЫХ РАБОТ

Глубина ведения горных работ на апатит-нефелиновых месторождениях Хибинского массива достигает 1000 м. Увеличение интенсивности горных работ при уменьшении мощности рудных тел приводит к необходимости вскрытия новых горизонтов и росту скорости углубления очистной выемки [10]. Меняется характер деформирования и обрушения налегающего массива, становясь менее предсказуемым и сопровождаемым высоким уровнем сейсмической активности.

Обрушение подработанной толщи покрывающих пород — это планируемое мероприятие, которое при правильном ведении горных работ не представляет опасности, а, напротив, способствует снижению уровня действующих напряжений и удароопасности в зонах опорного давления. Однако при формировании существенных объемов завесаний и накоплении потенциальной энергии деформирования процессы трещинообразования в подработанной толще могут сопровождаться негативными динамическими явлениями и внезапным обрушением налегающих пород на площадях 20–50 тыс. м², что особенно характерно для участков ведения горных работ встречными фронтами с образованием целиков [11].

Изучение процессов трещинообразования в консоли — важная задача, поскольку появляется возможность проследить развитие процесса разрушения от образования мелких трещин до их укрупнения и формирования трещины отрыва, а также дополнить данные сейсмичности результатами текущего и прогнозного моделирования НДС массива горных пород и фактических данных об объемах обрушений. Для реализации такого комплексного подхода в Горном институте КНЦ РАН разработаны программные приложения: оценка изменений сейсмического режима на месторождениях с развитой сетью сейсмического мониторинга; моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород методом конечных элементов в объемной постановке (SigmaGT); горно-геологическая информационная система (ГГИС) MineFrame. Ведутся работы по визуализации и разработке средств комплексного анализа трещинообразования в подработанной толще пород на базе ГГИС MineFrame [12].

ПЕРЕХОД К МАЛОЛЮДНЫМ ПОДЗЕМНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

Одним из возможных путей дальнейшего освоения глубокозалегающих от земной поверхности запасов рудных месторождений является переход с открытой и комбинированной технологий горнодобывающих предприятий на подземный способ с максимально возможным сохранением дневной поверхности и минимизацией нахождения людей в удароопасных условиях, что требует совместного изучения геомеханических и производственных процессов на рудниках.

Горнодобывающее предприятие — опасный производственный объект с комплексными рисками промышленной безопасности. Комплексный методический подход (КМП) проектирования параметров малолюдной подземной технологии [13 – 16] и планирования порядка ведения очистной выемки, разработанный на основе моделирования вариантов систем разработки и геомеханического состояния массива при ведении горных работ на больших глубинах и в охранных зонах удароопасных месторождений, направлен на обеспечение полноты извлечения запасов месторождений с созданием безопасных условий ведения подземных горных работ.

Для реализации КМП при разработке запасов удароопасных месторождений Арктического региона с помощью малолюдной технологии предполагается обоснование следующих инновационных решений:

- отработка подземных запасов месторождений, находящихся в охранных зонах;
- отработка подземных запасов маломощных и пологопадающих участков месторождений;
- отработка запасов при использовании погрузочно-доставочного оборудования на дистанционном управлении и лазерного сканирования в совокупности с беспилотными летательными аппаратами;
- утилизация породы от горнопроходческих работ при ведении подземных горных работ и вскрышных пород при комбинированном способе отработки запасов в выработанном пространстве подземных очистных камер.

Планирование порядка очистной выемки на основе моделирования геомеханического состояния массива при ведении горных работ на больших глубинах и в охранных зонах удароопасных месторождений является неотъемлемой частью КМП.

Малолюдные технологии с применением самоходной техники с дистанционным управлением и лазерного сканирования объектов подземной геотехнологии в совокупности с беспилотными летательными аппаратами позволят осуществлять добычу полезных ископаемых в зонах повышенной опасности — природной и техногенной, вывести работников из опасных по горно-геологическим и горнотехническим факторам участков горных работ, создать комфортные и безопасные условия труда.

ВЫВОДЫ

Развитие исследований процессов деформирования, сдвижения и обрушения подработанной толщи пород на удароопасных месторождениях Хибинского массива с учетом геодинамических и геомеханических рисков способствует принятию обоснованных решений безопасной выемки запасов системами разработки с обрушением руды и вмещающих пород. Основными задачами при дальнейшей отработке месторождений апатит-нефелиновых руд являются:

- учет горнотехнических и экологических ограничений и критических глубин при применении разработанных вариантов подземных технологий;
- исследование взаимного и совместного влияния отработки сближенных удароопасных месторождений на геомеханическое состояние и геодинамический режим Хибинского массива;

— развитие методики прогнозирования параметров обрушения покрывающих рудные тела пород по данным математического моделирования напряженно-деформированного состояния и параметров сейсмичности для конкретных условий подработки;

— определение границ ведения горных работ в охранных зонах удароопасных месторождений с дифференциацией участков по условиям их отработки на основе объемных моделей НДС массива горных пород с учетом основных геологических и горнотехнических факторов;

— разработка комплексного методологического подхода к проектированию параметров малолюдной подземной технологии на основе моделирования вариантов систем разработки и геомеханического состояния массива при ведении горных работ в охранных зонах удароопасных месторождений.

Решение этих задач обеспечит минимизацию опасности негативных техногенных явлений и сохранение экономической эффективности добычи минерального сырья при дальнейшей отработке месторождений апатит-нефелиновых руд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волченко Г. Н., Серяков В. М., Фрянов В. Н. Геомеханическое обоснование ресурсосберегающих вариантов разработки рудных месторождений системой этажного принудительного обрушения // ФТПРПИ. — 2012. — № 4. — С. 144–154.
2. Герман В. И. Прогноз обрушений на рудниках по данным сейсмического мониторинга // ФТПРПИ. — 2014. — № 2. — С. 99–109.
3. Еременко А. А., Машуков И. В., Еременко В. А. Геодинамические и сейсмические явления при обрушении блоков на удароопасных месторождениях Горной Шории // ФТПРПИ. — 2017. — № 1. — С. 70–76.
4. Громов Е. В., Билин А. Л., Белгородцев О. В., Наговицын Г. О. Обоснование вида и параметров горнотранспортных систем при освоении рудных месторождений в условиях Кольского полуострова // ФТПРПИ. — 2018. — № 4. — С. 70–78.
5. 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.
6. Barton N., Lien R., and Lunde J. Engineering classification of rock masses for design of tunnel support, Rock Mech., 1974, No. 6. — P. 189–236.
7. Bieniawski Z. T. Classification system in used to predict rock mass behavior, World Construction, 1976. Vol. 29, No. 5. — P. 45.
8. Laubscher D. H. Cave mining — the state of the art, J. South African Institute of Min. and Metallurgy, 1994, No. 94 (10). — P. 279–293.
9. Козырев А. А., Семенова И. Э., Аветисян И. М. Исследование изменений характера обрушений подработанной толщи с увеличением глубины горных работ на Кукисвумчоррском месторождении ОАО “Апатит” // ГИАБ. — 2011. — № 5. — С. 11–20.
10. Семенова И. Э., Аветисян И. М., Земцовский А. В. Геомеханическое обоснование отработки запасов глубокого горизонта в сложных горно-геологических и геодинамических условиях // ГИАБ. — 2018. — № 12. — С. 65–73.
11. Zhukova S., Korchak P., Streshnev A., and Salnikov I. Geodynamic rock condition, mine workings stabilization during pillar recovery at the level +320 m of the Yukspor deposit of the Khibiny massif, Problems of Complex Development of Georesources. electronic resource, E3S Web of Conf., 2018, Vol. 56.

12. Козырев А. А., Лукичев С. В., Наговицын О. В., Семенова И. Э. Геомеханическое и горно-технологическое моделирование как средство повышения безопасности отработки месторождений твердых полезных ископаемых // ГИАБ. — 2015. — № 4. — С. 73–83.
13. Описание системы Rig Control System. Режим доступа: https://www.miningandenergy.ca/technology/article/atlas_copcos_new_rig_control_system_wins_international_design_excellence_aw/, LKAB Magazine, 2013. — № 5. — С. 18–19.
14. Дик Ю. А., Котенков А. В., Танков М. С. Практика опытно-промышленных испытаний технологий разработки рудных месторождений. — Екатеринбург: УрФУ, 2014. — С. 480.
15. Нестеров Ю. В., Петрухин Н. П. Создание и развитие минерально-сырьевой базы отечественной атомной отрасли. — М.: ООО “Атлант-С”, 2017. — С. 402.
16. Кузьмин Е. В. Пластовая закладка выемочных камер на основе хвостов переработки урановых руд ПАО “ППГХО” // Технологии подземной разработки месторождений полезных ископаемых”. — 2016. — С. 27.

Поступила в редакцию 28/VII 2022

После доработки 25/X 2022

Принята к публикации 24/XI 2022