

И.Э. Семенова

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ХИБИНСКОЙ АПАТИТОВОЙ ДУГИ В ПРОЦЕССЕ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ВЫЕМКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ*

Представлены результаты исследования геомеханических процессов, связанных с изменением напряженно-деформированного состояния (НДС) массива при ведении крупномасштабных горных работ в высоконапряженных массивах. Изложен методический подход к разработке разномасштабных численных моделей объемного НДС массива горных пород, с возможностью дифференцированного или комплексного учета основных геологических и горнотехнических факторов на примере создания геомеханической модели Хибинского горнорудного района. Создана геомеханическая модель. Проведены многовариантные прогнозные расчеты с последовательной выемкой рудных залежей апатит-нефелиновой дуги. Установлены особенности НДС Хибинского массива, подтверждающие гипотезу трансформации типа НДС с глубиной и переориентировку главных напряжений в блоках массива между радиальными разломами. Определены абсолютные высотные отметки -1000÷ -1200 м, ниже которых вертикальные напряжения преобладают над горизонтальными.

Ключевые слова: сближенные месторождения, крупномасштабные горные работы, численное моделирование, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, тектонически напряженные массивы горных пород, кольцевые структуры, радиальные разломы.

Введение

Масштабы промышленной деятельности, связанной с выемкой полезных ископаемых неуклонно растут. В настоящее время из земных недр ежегодно извлекается около

*Исследования выполнены в рамках гранта по приоритетному направлению деятельности РНФ «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» № 14-17-00751.

200 млрд т горных пород. Перемещение такого объема породных масс ведет к изменениям, затрагивающим практически все элементы биосферы: водный и воздушный бассейны, земную поверхность, недра, растительный и животный мир. Техногенное воздействие горных разработок вносит также серьезные изменения в напряженно-деформированное состояние больших участков земной коры и может являться причиной геодинамических явлений с катастрофическими последствиями [1–3].

Хибинский массив является крупнейшей сырьевой базой для производства минеральных удобрений, не имеющей аналогов в мире, которая представлена десятью месторождениями; из них шесть эксплуатируются АО «Апатит», два принадлежат АО «Северо-западная фосфорная компания», еще два находятся в резерве. За период освоения месторождений добыто более 1,6 млрд т руды (около 1/3 всех запасов) или более 4,5 млрд т горной массы, что повлекло за собой изменение рельефа и геодинамического режима региона. В недрах остаются еще более двух миллиардов тонн руды. Однако для этих запасов характерно более низкое содержание апатита и более сложные условия отработки. В этой связи особенно актуальной становится разработка стратегии долгосрочного, эффективного и безопасного использования уникальной рудной базы Хибин, очередности вовлечения в разработку резервных месторождений и комплексного использования добываемых руд.

Решение этой задачи на современном уровне невозможно без создания комплексной модели Хибинского горнорудного района. Такая модель создана и пополняется в Горном институте Кольского научного центра РАН и включает в себя рельеф местности, объекты геологической среды (рудные тела, наиболее значимые тектонические нарушения и поля тектонических напряжений), комплексы подземных выработок и конструктивных элементов карьеров, отвалы, хвостохранилища и объекты промышленной инфраструктуры [4, 5]

Характеристика объекта исследования

Наиболее распространенная на сегодня гипотеза о геологическом строении и образовании Хибин представляет его как эллипсоидный в плане многофазный Плутон, вытянутый в субширотном направлении с осями протяженностью 45 и 35 км со смещенной к востоку корневой частью [6]. Морфологически он близок ассиметричному лополиту с крутыми восточными и северными внешними контактами и более пологими южны-

ми и западными. Западный контакт до глубины 5–6 км падает на восток под углом 70° , южный к центру массива под углом 80° , выполаживаясь на глубине до $40\text{--}50^\circ$, северный и восточный контакты крутые до вертикальных. Внутреннее строение массива концентрически зональное, причем контакты разнопородных зон не параллельны внешним контактам массива и, как правило, являются более пологими. Углы падения апатит-нефелиновых рудных тел варьируют в пределах $30\text{--}40^\circ$. От периферии к центру массива друг друга сменяют дугообразные в плане тела массивных и трахитоидных хибинитов, рихсчорритов, йолит-уртитов и связанных с ними апатитовых руд, лянчорритов и в ядре массива – эллипсоидная площадь распространения фойяитов, в восточной части которой находится шток карбонатитов.

Существенным фактором с точки зрения формирования полей напряжений Хибинского массива является то, что он относится к тектонически-напряженным массивам. По определению, это комплекс пород одного генезиса, приуроченный к участкам поднятия земной коры, отделенного геолого-структурными границами от окружающих пород. Характерными признаками тектонически напряженных массивов являются специфические проявления горного давления в выработках, дискование кернa, азимутальные искривления стволов скважин, что обусловлено действием горизонтальной составляющей тензора напряжений, значительно превышающей вертикальную составляющую. Для обрабатываемых месторождений Хибинского массива это подтверждено инструментальными измерениями напряжений. То есть, выемка полезных ископаемых на месторождениях Хибин ведется в удароопасных условиях, связанных с действием в массиве пород высоких тектонических напряжений [7–9]. При этом неизбежное углубление горных работ и их интенсификация приводит к повышению как фонового уровня напряжений, так и увеличению по площади и абсолютным величинам зон концентрации напряжений в окрестности продвигающихся фронтов горных работ и элементов горной технологии.

Методика последовательных приближений

В соответствии с разработанной методикой последовательных приближений [10] в первую очередь осуществляют постановку и решение ряда трехмерных, мелкомасштабных задач, отражающих основные горно-геологические и горно-технологические особенности моделируемого массива. Последова-

тельность операций на первом этапе (региональное моделирование) следующая:

- определение параметров расчетной области, включающей объект моделирования (в нашем случае это Хибинский массив);
- разработка инженерно-геологической и численной модели;
- обоснование граничных условий и последовательности решения ряда трехмерных задач механики горных пород для определения основных факторов, влияющих на закономерности формирования первичного поля напряжений на региональном уровне;
- сопоставление результатов расчетов с данными других (прямых или косвенных методов) оценки исходного напряженного состояния массива;
- проведение при необходимости корректировки модели и повтор расчетов;
- выбор участков для более детального моделирования НДС месторождений.

Соответствие получаемого на этом этапе поля напряжений реальному геомеханическому состоянию массива во многом зависит от обоснованного выбора размеров модели и граничных условий. Областью моделирования на первом этапе являлся весь Кольский полуостров. Столь значительное удаление границ от объекта моделирования обусловлено необходимостью учета глубинных разломов полуострова, наличие которых сказывается на типе и параметрах НДС Хибинского массива и взято в качестве граничных условий на следующем этапе моделирования.

Второй этап — мелкомасштабное моделирование проводится с заданием граничных условий в виде узловых сил (напряжений), соотношение которых по осям берется из результатов, полученных на этапе регионального моделирования. На этом этапе более подробно отображается рельеф дневной поверхности, параметры рудных тел и геологических разностей, вводится информация о разломных структурах III—IV ранга. В результате получаем уточненное поле напряжений и деформаций, которое используется в качестве начального на следующем этапе моделирования.

Третий этап (крупномасштабное моделирование НДС месторождения) включает в себя:

- определение области влияния максимально достигаемых объемов выемок на месторождении как подземным, так и открытым способом при сравнении соответствующих вариантов мелкомасштабного моделирования для определения размеров расчетной области III этапа;

- задание на ее границах узловых перемещений, полученных путем интерполяции перемещений предыдущего этапа моделирования;
- проведение расчетов для моделирования различной последовательности выемки запасов;
- анализ расчетных данных и определение безопасных параметров систем разработки, применяемых или планируемых к применению на месторождении;

Последующие этапы моделирования могут включать отдельные блоки, стыковочные зоны, выработки или их сопряжения, то есть любые участки массива, которые находятся в предварительно рассчитанном на предыдущих этапах поле напряжений.

Подобная вложенность моделей позволяет осуществлять ретроспективные, текущие и перспективные прогнозы изменения напряженно-деформированного состояния сложных природно-технических систем. Результаты расчетов НДС являются основой выбора наиболее безопасной по геомеханическим условиям системы разработки ее параметров на перспективных месторождениях; а также используются при планировании безопасного порядка выемки запасов на действующих горных предприятиях.

В качестве метода расчетов был выбран метод конечных элементов в объемной постановке; использовали программный комплекс Sigma GT, разработанный при непосредственном участии автора.

Разработка конечно-элементной модели Хибинского массива

С целью изучения геомеханических процессов, связанных с изменением напряженно-деформированного состояния массива при ведении крупномасштабных горных работ в высоконапряженных массивах была разработана объемная конечно-элементная модель Хибинского массива с учетом основных геологических: вложенной кольцевой структуры массива, радиальных разломов, рельефа дневной поверхности, параметров рудных тел и горно-технических факторов: геометрии открытых и подземных очистных пространств.

Алгоритмы конечно-элементного моделирования дают возможность расчета напряженно-деформированного состояния в рамках упругой, упруго-пластической, пластической и вязкой постановки задачи. Для обоснования физической модели среды выполнен анализ имеющихся данных о прочностных и

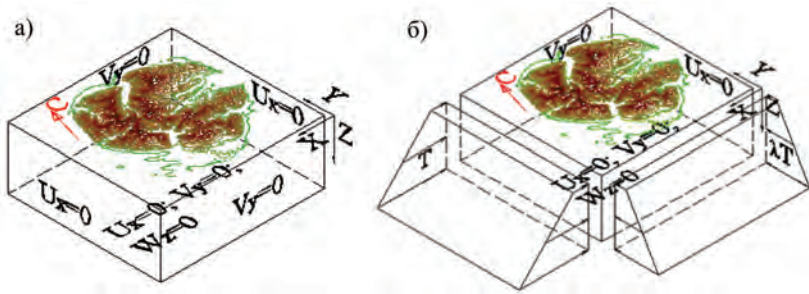


Рис. 1. Схема задания граничных условий для модели Хибинского массива: а) гравитационная постановка; б) с учетом тектонических сил $T_x > T_y$

упругих характеристиках руд и пород, слагающих Хибинский массив. На основании анализа, как абсолютных значений показателей, так и их изменений при нагрузке, для большинства пород можно сделать вывод об упругом их деформировании вплоть до разрушения. Это подтверждается также данными натурных наблюдений за характером разрушений пород в окрестности выработок на обрабатываемых месторождениях. Таким образом, в качестве модели среды принята упругая модель.

Задача решалась как при действии собственного веса пород, так и при задании дополнительных граничных условий в виде горизонтальной пригрузки в субширотном направлении (рис. 1). Значения горизонтальных напряжений соответствуют данным многолетних натурных измерений, как по абсолютным величинам на различных глубинах, так и по направлению, то есть было симитировано тектоническое поле напряжений, приближенное к реальному.

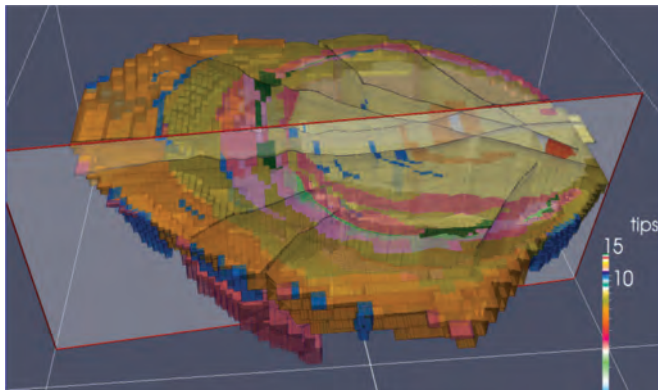


Рис. 2. Конечно-элементная модель Хибинского массива

Размеры модели в плане 90 км × 75 км, высота около 20 км. Размерность модели 264 960 узлов и 249 090 элементов. Сгущения сетки приурочены к местоположению эксплуатируемых и перспективных месторождений Хибинского массива. Минимальный размер элемента в плане 100 м × 100 м. Общий вид объемной конечно-элементной модели Хибинского массива представлен на рис. 2.

Результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния

В первую очередь определены параметры поля напряжений для нетронутого массива. Полученные данные сравнивали с полем напряжений без учета тектоники, то есть при учете только собственного веса пород и бокового отпора. Слоистость массива и разломные структуры были промоделированы одинаково. На рис. 3 представлено распределение максимальной компоненты главных напряжений σ_{\max} в горизонтальном сечении на нулевой отметке. Как видно, при учете только собственного веса пород основным фактором, влияющим на распределение напряжений σ_{\max} , является рельеф дневной поверхности и кольцевая структура массива. В случае же дополнительного учета действующих тектонических сил более значимым становится влияние разломных структур, градиент снижения напряжений в которых увеличивается.

Основная часть запасов апатитовых руд расположена в южной части Хибинского массива в пределах так называемой Хи-

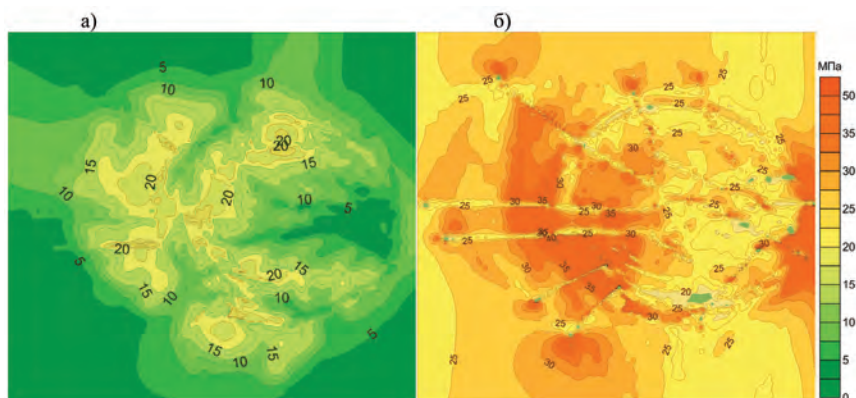


Рис. 3. Распределение σ_{\max} в горизонтальном сечении на нулевой отметке: а) вариант с учетом собственного веса пород; б) вариант с учетом собственного веса пород и тектоники

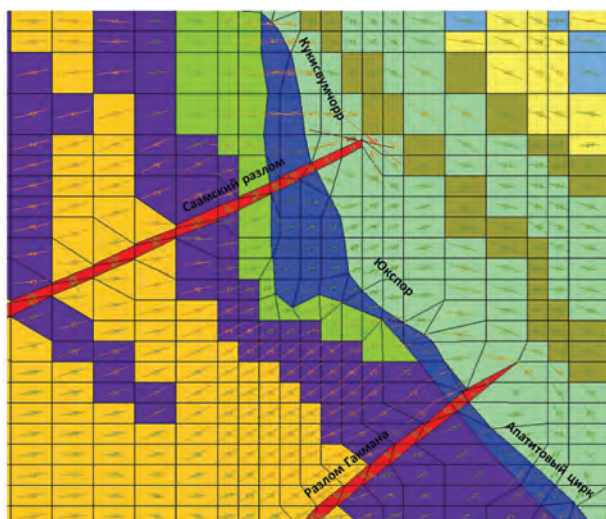


Рис. 4. Распределение векторов σ_{\max} в окрестности апатитовых месторождений Хибин в плане

бинской апатитовой дуги, где выемка полезных ископаемых проводится как подземным, так и открытым способом. При анализе результатов векторного поля σ_{\max} была подтверждена гипотеза о переориентировке напряжений в окрестности крупных разломных структур, в том числе разломов Саамского и Гакмана, с чем связаны особенности распределения напряжений на месторождениях Кукисвумчорское, Юкспорское и Апатитовый цирк. Направление действия максимальной компоненты напряжений на некоторых участках месторождений под углом более 45° и даже вкрест простирания рудного тела при установленном субширотном направлении регионального сжатия (рис. 4). При этом наибольшие концентрации сжимающих напряжений приурочены к концам разломных структур и границам разномодульных сред. В самих разломах максимальные напряжения ориентированы перпендикулярно их простиранию и остаются субгоризонтальными даже на больших глубинах.

На следующем этапе модельных исследований имитировали последовательную выемку рудных залежей апатит-нефелиновой дуги. На рис. 5 и 6 представлено распределение максимальной и минимальной компонент напряжений вблизи дневной поверхности до ведения горных работ и после выемки всех разведанных запасов Хибинской апатитовой дуги. Следует отметить значительное снижение сжимающих напряжений σ_{\max} при появле-

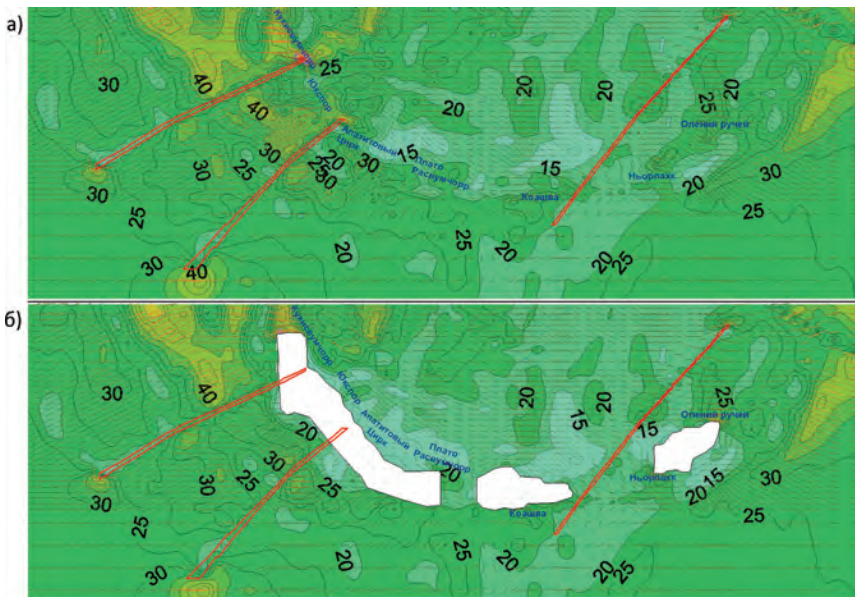


Рис. 5. Распределение σ_{max} в горизонтальном сечении на глубине около 50 м: а) нетронутый массив; б) полная выемка разведанных запасов

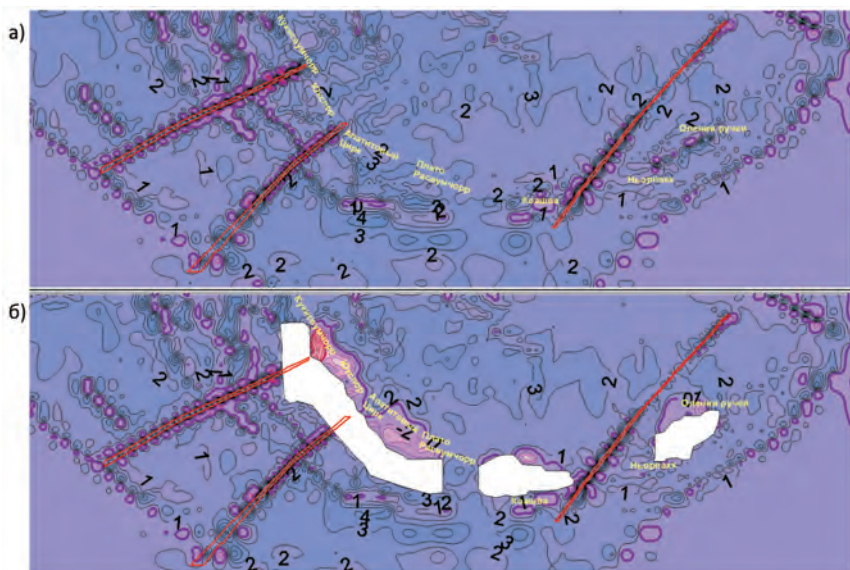


Рис. 6. Распределение σ_{min} в горизонтальном сечении на глубине около 50 м: а) нетронутый массив; б) полная выемка разведанных запасов

нии зон растягивающих напряжений σ_{\min} и увеличении площади данных зон, а также рост абсолютных величин растяжений со стороны висячего бока рудной залежи. Так, при полной выемке всех запасов зона и имитации обрушения подработанных пород, размер зоны растяжений в плане достигает размеров самой выемки вкрест простирания (рис. 6, б, 8, б) с увеличением абсолютных величин напряжений до критических, сопоставимых с пределом прочности пород на растяжение. То есть, в породах висячего бока будет происходить активное трещинообразование, что приведет в дальнейшем в результате процессов разрушения и выветривания к значительному выполаживанию гористого рельефа в районе апатитовой дуги Хибин.

В результате анализа полученных данных подтверждена гипотеза о трансформации типа НДС с глубиной. Рассмотрим вертикальное сечение вкрест простирания Кукисвумчоррского месторождения (рис. 7). Поскольку направление действующих максимальных напряжений на данном участке практически совпадает с направлением сечения, то можно считать, показанные на рисунке вектора являются векторами σ_{\max} . Как видно, превалирование вертикальных напряжений над горизонтальными начинается с абсолютных отметок $-1000 \div -1200$ м. Так как по данным геологической разведки рудные тела Хибинской апа-

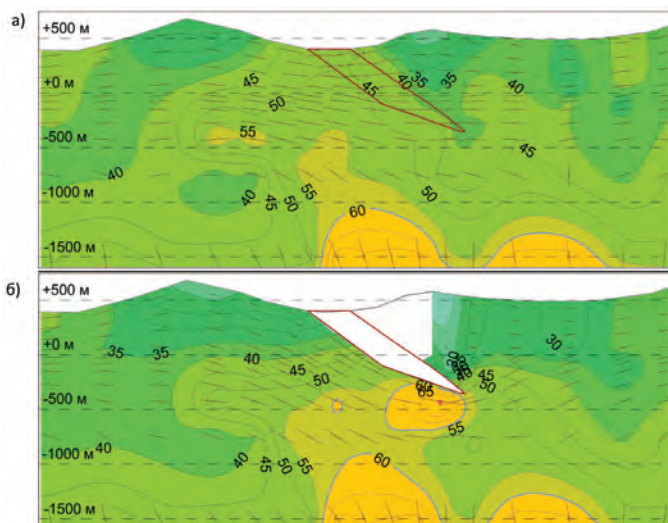


Рис. 7. Распределение σ_{\max} в окрестности Кукисвумчоррского месторождения в вертикальном сечении: а) нетронутый массив; б) полная выемка разведанных запасов

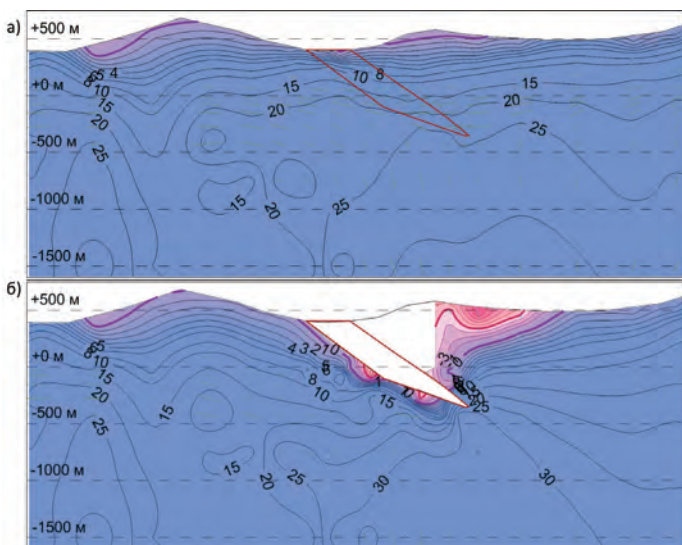


Рис. 8. Распределение σ_{\min} в окрестности Кукисвумчоррского месторождения в вертикальном сечении: а) нетронутый массив; б) выемка запасов до нулевой отметки; в) полная выемка разведанных запасов

титовой дуги выклиниваются до абсолютной высотной отметки -500 м, то можно предполагать, что все разведанные на сегодняшний день запасы будут обрабатываться в условиях гравитационно-тектонического поля напряжений с превалированием горизонтальных напряжений над вертикальными. Следует также отметить, что по мере выемки запасов апатитовой руды вектора σ_{\max} на больших глубинах выполаживаются, то есть поле напряжений носит еще более выраженный тектонический характер. По прогнозным данным фоновый уровень максимальных сжимающих напряжений на рабочих горизонтах после выемки запасов до нулевой отметки более 60 МПа, тогда как в настоящее время фоновые значения σ_{\max} не превышают 50 МПа. При таком уровне напряжений подавляющее большинство выработок будет иметь высокую категорию удароопасности (Г и Д), что потребует дополнительных затрат на крепление и будет влиять на увеличение стоимости добычи руды.

Участки массива между сближающимися крупномасштабными горными работами, по сути, являются блоками-целиками с повышенной концентрацией сжимающих напряжений. С другой стороны на данных участках наблюдаются зоны растягивающих напряжений по минимальной компоненте. Такое

сочетание совместного воздействия сжимающих и растягивающих напряжений является фактором, негативно сказывающемся на устойчивости массива в целом и отдельных выработок в частности.

Заключение

В результате проведенных исследований создана геомеханическая модель Хибинского массива, позволяющая рассматривать отработку комплекса сближенных месторождений и определять оптимальный порядок и направление развития горных работ в удароопасных условиях с учетом вложенной кольцевой структуры массива, направления тектонического сжатия, основных радиальных разломов, рельефа дневной поверхности, параметров рудных тел. Установлены особенности напряженно-деформированного состояния (НДС) Хибинского массива, заключающиеся в следующем:

- подтверждена гипотеза трансформации типа НДС с глубиной, определены абсолютные высотные отметки -1000÷-1200 м, ниже которых вертикальные напряжения преобладают над горизонтальными, из чего следует, что все разведанные запасы Хибинской апатитовой дуги будут обрабатываться в условиях выжатого тектонического сжатия пород;
- установлена переориентировка главных напряжений в блоках массива между радиальными разломами;
- полная выемка разведанных запасов обуславливает снижение сжимающих напряжений σ_{\max} при появлении зон растягивающих напряжений σ_{\min} с увеличением их площади в приповерхностной части массива висячем боку рудной залежи; здесь возможно активное трещинообразование, что приведет в дальнейшем к значительному выполаживанию гористого рельефа в районе апатитовой дуги Хибин.

Полученные результаты могут быть использованы при принятии решений по отработке других сближенных месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козырев А. А., Панин В. И., Мальцев В. А., Аккуратов М. В., Кожин В. С. Изменение геодинамического режима и проявление техногенной сейсмичности при ведении крупномасштабных горных работ на апатитовых рудниках в Хибинском массиве / Проблемы геодинамической безопасности. – СПб.: ВНИМИ, 1997. – С. 66–71.

2. Козырев А. А., Панин В. И., Свинин В. С. Геодинамическая безопасность при разработке рудных месторождений в высоконапряженных массивах // Горный журнал. – 2010. – № 9. – С. 40–43.

3. Сашурин А. Д., Панжин А. А. Актуальные проблемы геомеханического обеспечения эффективного и безопасного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № S30. — С. 62–70.

4. Семенова И. Э. Создание трехмерной геомеханической модели Хибинского горнорудного района // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № S6. — С. 263–277.

5. Лукичев С. В., Наговицын О. В. Информационная поддержка освоения и эксплуатации месторождений Хибинского горнорудного района // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2012. — № 6. — С. 98–105.

6. Пожиленко В. И., Гавриленко Б. В., Жиров Д. В., Жабин С. В. Геология рудных районов Мурманской области. — Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2002. — 359 с.

7. Турчанинов И. А., Марков Г. А., Иванов В. И., Козырев А. А. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок. — Л.: Наука, 1978. — 256 с.

8. 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. — 2015. — № 4. — С. 73–83.

9. Козырев А. А., Мальцев В. А., Федотова Ю. В., Панин В. И., Рыбин В. В., Семенова И. Э. и др. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Хибинские апатит-нефелиновые месторождения). — Апатиты-Кировск, 2010. — 117 с.

10. Козырев А. А., Панин В. И., Семенова И. Э. Управление геодинамическими рисками на Хибинских апатитовых рудниках // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — № 12. — С. 347–359. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Семенова Инна Эриковна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: innas@goi.kolasc.net.ru, Горный институт Кольского научного центра РАН.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 4, pp. 300–313.

UDC 622.83:
539.3

I.E. Semenova

STUDY OF THE Khibiny APATITE ARC STRESS-STRAIN STATE TRANSFORMATION AT LARGE-SCALE MINING

The paper presents the research results on geomechanical processes connected with changing in stress-strain state of the rock mass at large-scale mining in highly stressed rock massifs. The methodical approach has been shown to developing different-scale numerical

models of volume stress-strain state of the rock mass, with possibility of differential or complex account of main geological and mining-engineering factors on an example of design of a geomechanical model for the Khibiny mining region. The geomechanical model allows observing development of adjacent deposits in the Khibiny and defining an order and direction of mining operations under rockburst hazardous conditions with accounting a nested circular rock mass structure, direction of tectonic compression, main radial faults, relief of surface, and parameters of ore bodies. Multi-variant forecast calculations have been performed with successive extraction of ore bodies in the apatite-nepheline arc. Particularities have been stated of stress-strain state of the Khibiny rock massif that confirm a hypothesis on transforming a type of the stress-strain state with the depth, and reorientation of principal stresses in the blocks between radial faults. Absolute high marks have been determined (-1000 ÷ -1200 m) below which vertical stresses prevail over horizontal ones. The results obtained indicate that all the Khibiny apatite arc reserves prospected will be mined under conditions of apparent tectonic rock compression. The results obtained can be applied when making decisions on developing other adjacent deposits.

Key words: adjacent deposits, large-scale mining, numerical modeling, stress-strain state, finite element method, tectonically stressed rock massifs, circular structures, radial faults.

AUTHOR

Semenova I. E., Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
e-mail: innas@goi.kolasc.net.ru,
Mining Institute of Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences,
184209, Apatity, Russia.

REFERENCES

1. Kozyrev A. A., Panin V. I., Mal'tsev V. A., Akkuratov M. V., Kozhin V. S. *Problemy geodinamicheskoy bezopasnosti* (Problems of geodynamic safety), Saint-Petersburg, VNIMI, 1997, pp. 66–71.
2. Kozyrev A. A., Panin V. I., Svinin V. S. *Gornyy zhurnal*. 2010, no 9, pp. 40–43.
3. Sashurin A. D., Panzhin A. A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no S30, pp. 62–70.
4. Semenova I. E. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2011, no S6, pp. 263–277.
5. Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2012, no 6, pp. 98–105.
6. Pozhilenko V. I., Gavrilenko B. V., Zhirov D. V., Zhabin S. V. *Geologiya rudnykh rayonov Murmanskoy oblasti* (Geology of ore provinces in the Murmansk Region), Apatity, Izd. Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN, 2002, 359 p.
7. Turchaninov I. A., Markov G. A., Ivanov V. I., Kozyrev A. A. *Tektonicheskie napryazheniya v zemnoy kore i ustoychivost' gornyykh vyrabotok* (Tectonic stresses in the earth's crust and stability of underground excavations), Leningrad, Nauka, 1978, 256 p.
8. Kozyrev A. A., Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V., Semenova I. E. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 4, pp. 73–83.
9. Kozyrev A. A., Mal'tsev V. A., Fedotova Yu. V., Panin V. I., Rybin V. V., Semenova I. E. *Ukazaniya po bezopasnomu vedeniyu gornyykh rabot na mestorozhdeniyakh, sklonnykh i opasnykh po gornym udaram (Khibinskie apatit-nefelinovye mestorozhdeniya)* (Instructions on safe mining under conditions of rockburst hazard (Khibiny apatite–nepheline deposits), Apatity-Kirovsk, 2010, 117 p.
10. Kozyrev A. A., Panin V. I., Semenova I. E. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2010, no 12, pp. 347–359.