

УДК 622.83(470.21)

# ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГОРНЫХ РАБОТ НА ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

**А. А. КОЗЫРЕВ**, зав. отделом геомеханики, проф., д-р техн. наук

**В. И. ПАНИН**, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук

**И. З. СЕМЕНОВА**, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук,  
innas@goi.kolasc.net.ru

**В. В. РЫБИН**, ведущий научный сотрудник, д-р техн. наук

Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

## Введение

Горнопромышленный комплекс северных регионов в обозримой перспективе сохранит свою хозяйственную специализацию как один из основных поставщиков сырьевых ресурсов для удовлетворения внутренних потребностей и поддержания экспортного потенциала страны. Ему же принадлежит ведущая роль в структуре валового промышленного продукта Мурманской области. Суровая природно-климатическая среда северных территорий, их экологическая уязвимость и усложняющиеся по мере выемки запасов полезных ископаемых горно-геологические условия разработки месторождений обуславливают необходимость применения новейших достижений научно-технического прогресса при добыче и переработке минерального сырья в арктических регионах [1]. Повышенные требования предъявляют к геомеханическому обеспечению горных работ для обоснования эффективных и безопасных геотехнологий.

Поскольку основная часть разрабатываемых и перспективных месторождений северо-запада Арктического региона находится в областях активных современных тектонических процессов, одной из главных задач в этих условиях является исследование специфики влияния тектонических напряжений как на породный массив в целом, так и на закономерности перераспределения напряжений при создании открытых и подземных обнажений. Следует заметить, что эта проблема актуальна не только для России, но и для других стран с развитой горнодобывающей промышленностью [2–4]. Полученные за несколько последних десятилетий знания дают возможность планировать и осуществлять горные работы с минимальными рисками при учете основных геологических и горнотехнических факторов. Геомеханическое обеспечение включает в себя несколько взаимосвязанных задач:

- натурные исследования для получения исходных данных о геомеханическом состоянии массива и свойствах слагающих его горных пород;
- выявление общих закономерностей распределения напряжений в нетронутым массиве и их трансформации в процессе ведения горных работ, а также оценка влияния тектонических напряжений на устойчивость массива и на отдельные элементы горной технологии с учетом геологических неоднородностей;
- разработка инструктивных документов и регламентов, определяющих безопасный порядок горных работ и параметры

*Представлены результаты и проблемы геомеханического обеспечения горных работ на месторождениях Кольского полуострова, находящихся под действием высоких тектонических напряжений. Разработаны геомеханические модели, позволяющие рассматривать последовательную отработку полезных ископаемых региона, прогнозировать трансформацию напряженно-деформированного состояния породного массива по мере выемки запасов, определять оптимальный порядок и направление развития горных работ в удароопасных условиях.*

**Ключевые слова:** тектонически напряженные массивы горных пород, управление геодинамическими рисками, напряженно-деформированное состояние, подземные и открытые горные работы, сближенные месторождения, численное моделирование, мониторинг геомеханических процессов.

**DOI:** 10.17580/gzh.2019.06.05

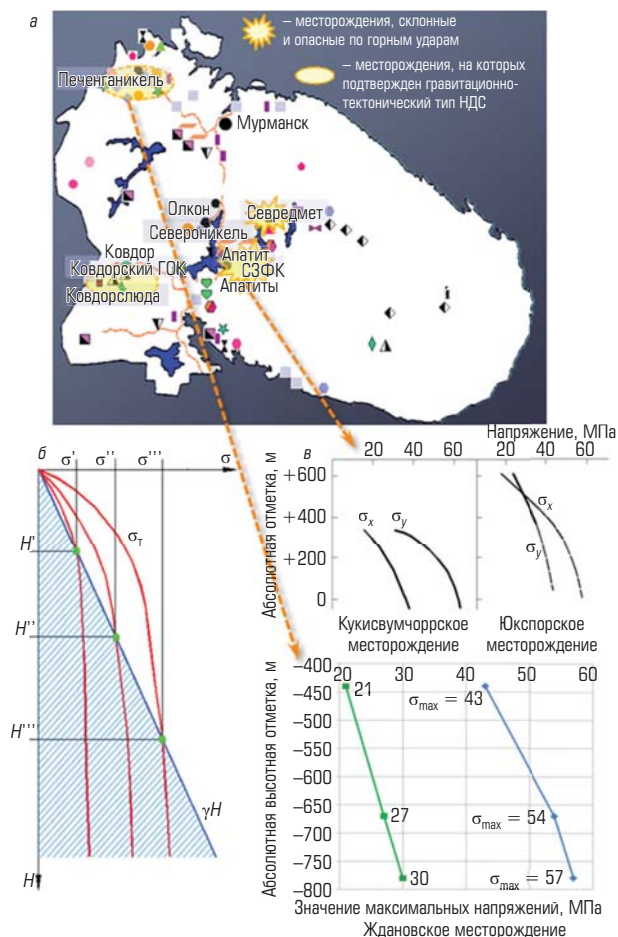
элементов горной технологии с учетом горно-геологических условий месторождения;

- сопровождение горных работ с выдачей рекомендаций по порядку и параметрам применяемых технологий: разработка мероприятий по разгрузке или упрочению массива, в том числе и с использованием различных видов крепления;
- мониторинг состояния геологической среды; прогноз геомеханической и геодинамической ситуации.

## Закономерности напряженно-деформированного состояния (НДС) тектонически напряженных массивов горных пород

Натурные исследования полей напряжений и свойств пород, слагающих отработываемые месторождения Кольского полуострова, Горный институт КНЦ РАН ведет с 1960-х годов. Результаты измерений подтвердили неравномерность распределения тектонических напряжений, обусловленную блочным строением и свойствами пород региона. Проявление аномально высоких горизонтальных напряжений в верхней части земной коры приурочено к ее участкам с восходящими тектоническими движениями. Современное тектоническое поднятие с максимальной интенсивностью имеет место в районе Хибинского и Ловозерского массивов, где инструментальными исследованиями зафиксирован наибольший уровень субгоризонтальных сжимающих напряжений в нетронутым массиве, достигающий 50–70 МПа, т. е. в 2–3 раза превышающий действие собственного веса пород ( $\sigma_T > 2\gamma H$ ); отработываемые здесь месторождения отнесены к склонным и опасным по горным ударам (**рис. 1**).

Измерения напряжений последних лет на месторождениях АО «Кольская ГМК» и АО «Ковдорский ГОК» также подтвердили наличие НДС гравитационно-тектонического типа с существенным превышением горизонтального сжатия над вертикальным.



**Рис. 1. Месторождения Кольского полуострова с подтвержденным гравитационно-тектоническим типом НДС:**

- а – местоположение объектов исследования НДС;
- б – зависимость тектонических напряжений от глубины и переход гравитационно-тектонического типа НДС в квазигидростатический от величины действующих тектонических напряжений;
- в – примеры изменения тектонических напряжений с глубиной

Так, максимальное значение  $\sigma_T$  на Ждановском месторождении составило более 50 МПа на глубине 600–700 м (см. рис. 1, в). По показателям физико-механических свойств породы Ждановского месторождения относятся к категории прочных скальных пород, способных к накоплению упругой энергии и к хрупкому разрушению в динамической форме (кроме брекчиевидных руд). На основе проведенных исследований разработаны рекомендации по безопасному ведению подземных горных работ. Выполнена корректировка нормативных документов, связанных с вопросами управления горным давлением.

На Ковдорском месторождении выявленные максимальные сжимающие напряжения составили около 30 МПа, что для глубин, на которых проводили измерения, существенно превышает действие собственного веса пород.

Изучены закономерности изменения тектонических напряжений с глубиной, показавшие, что увеличение абсолютных величин горизонтальных сжимающих напряжений аппроксимируется

параболической зависимостью, то есть рост  $\sigma_T$  постепенно замедляется. Изменение типа НДС на больших глубинах происходит в силу постепенного выравнивания действующих на массив горизонтальных и вертикальных напряжений. Чем меньше уровень действующих тектонических напряжений, тем на меньшей глубине происходит выравнивание горизонтальных и вертикальных составляющих напряжений, приближая тип НДС к квазигидростатическому (см. рис. 1, б). Кроме того, на всех объектах определено направление действующих напряжений, что необходимо для обоснования порядка очистных работ и проходки выработок.

Влияние тектонических напряжений на массив горных пород неоднозначно. Положительное влияние имеет место до достижения критических величин действующих сжимающих напряжений ( $\sigma_T < 0,5\sigma_{сж}$ , где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности пород на одноосное сжатие) в основном за счет минимизации влияния структурной нарушенности на устойчивость элементов горной технологии при умеренном уровне сжатия. С другой стороны, при достижении критических величин  $\sigma_T$  имеют место специфические проявления горного давления в динамической форме – от шелушения и стрелания до горных ударов и техногенных землетрясений.

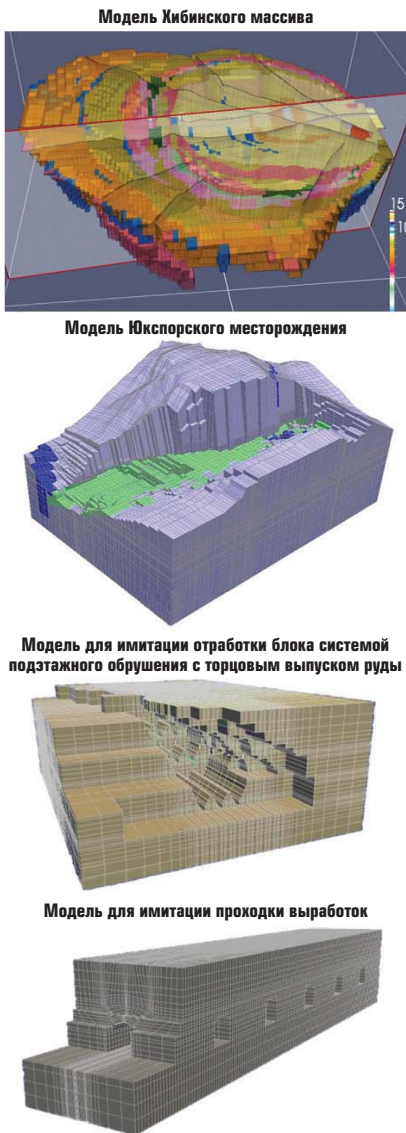
Учет выявленных закономерностей НДС в нетронутом массиве, а также особенностей трансформации напряжений в окрестности создаваемых породных обнажений и очистных пространств позволяет обеспечить эффективную выемку запасов полезных ископаемых при минимизации геодинамических рисков.

### Численное моделирование НДС для геомеханического обоснования горных работ

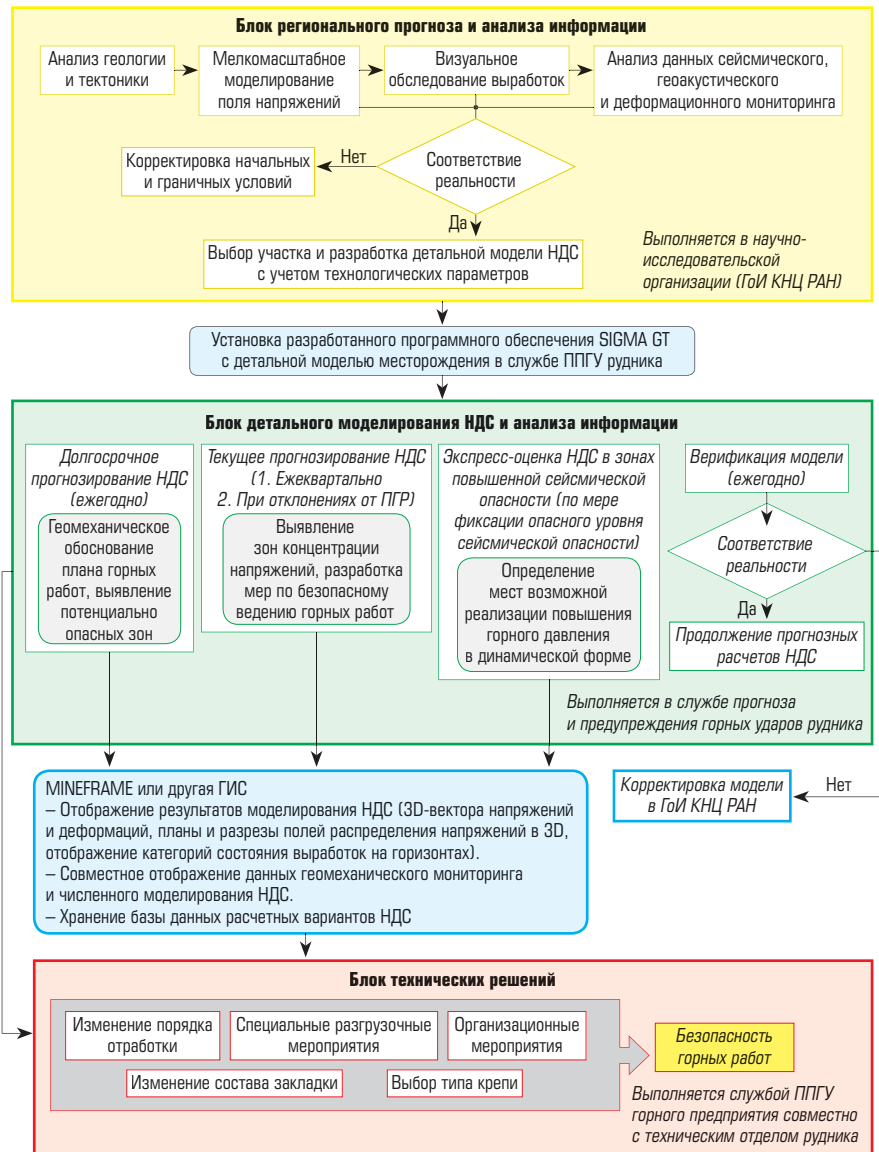
Методом, позволяющим учесть совокупность основных геологических и горнотехнических факторов при планировании обработки запасов месторождения, отдельных его горизонтов и участков, является численное моделирование напряженно-деформированного состояния на нескольких масштабных уровнях. Для генерации моделей, приближенных к реальным геомеханическим условиям, в Горном институте КНЦ РАН применяется методика последовательных приближений, предполагающая создание комплекса разномасштабных моделей – от мелкомасштабных, включающих протяженные участки геологической среды и рудные поля до моделей отдельных месторождений, блоков и элементов горной технологии. Расчеты выполняются с использованием программного комплекса SigmaGT.

В качестве примера приведем комплекс моделей, разработанных для Хибинского массива (рис. 2), где на сегодняшний день собран значительный объем геологической и геомеханической информации, позволяющий достичь максимальной адекватности численного моделирования НДС.

Геомеханическая модель всего Хибинского массива позволяет рассматривать обработку сближенных месторождений и определять уровень взаимного влияния горных работ с учетом кольцевой структуры массива, направления максимального тектонического сжатия, основных радиальных разломов, рельефа земной поверхности, параметров рудных тел. Установлены закономерности перераспределения напряжений в окрестности очистных пространств на больших глубинах на разных



**Рис. 2.** Примеры моделей разного масштабного уровня для месторождений Хибинского массива



**Рис. 3.** Схема интеграции модуля прогноза НДС в систему обеспечения геодинамической безопасности горного предприятия

этапах освоения месторождений апатитовой дуги [5], позволившие сформулировать основные принципы безопасного ведения горных работ в подобных геомеханических условиях. Получены граничные условия для детального моделирования и анализа изменений геомеханической ситуации по мере выемки запасов апатит-нефелиновых руд при варьировании порядка работ и применяемых технологий.

Разработанный комплекс моделей месторождения используется как на этапе проектирования горных работ и определения оптимальных по геомеханическим условиям систем разработки и параметров элементов горной технологии, так и непосредственно на горном предприятии для текущего прогноза геомеханической ситуации, выявления наиболее опасных элементов горной технологии и участков выработок, а также для принятия решений по их разгрузке и поддержанию (рис. 3).

Важным аспектом обеспечения геодинамической безопасности представляется также регистрация, обработка и анализ данных автоматизированной системы контроля сейсмичности массива [6–9]. Методика комплексной оценки сейсмической активности массива основана на совместном использовании нескольких прогностических критериев, различных по физическому смыслу и дополняющих друг друга, число которых может быть различно [10]. Детальный анализ структуры базы данных сейсмических событий и их связи с горно-геологическими факторами дает возможность понять природу сейсмической активности. Комплексирование сейсмических данных и результатов численного моделирования НДС массива позволяет более точно оценивать геомеханическое состояние массива горных пород, устанавливать причину возникновения динамических явлений, а также повысить качество оценки потенциально удароопасных

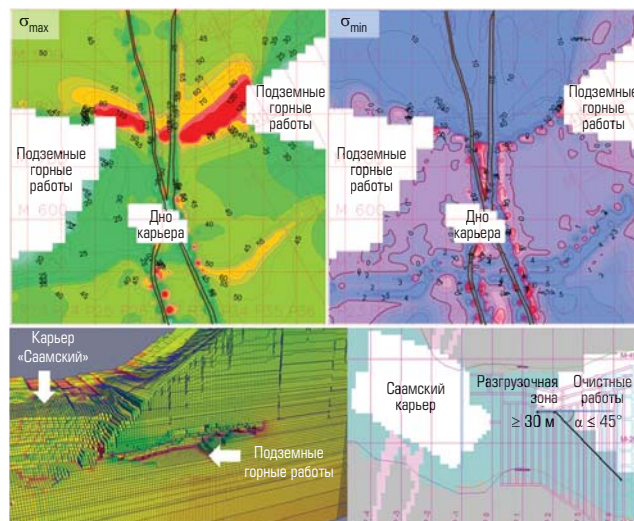
зон при планировании горных работ. Совпадение зон, опасных как по уровню сейсмичности, так и по уровню действующих напряжений увеличивает надежность отнесения таких участков к удароопасным, что при разработке соответствующих мероприятий повышает безопасность горных работ.

#### Геомеханическое обоснование подземных и комбинированных горных работ на удароопасных месторождениях

По результатам численного моделирования НДС, мониторинга и обследования горных выработок определены зоны повышенной удароопасности; предложены и показали свою эффективность варианты региональной и локальной разгрузки массива горных пород. Наиболее проблемными участками являются зоны стыковки горных работ, где по мере сближения фронтов происходит рост сжимающих напряжений. На примере Кировского рудника АО «Апатит» показано, что при отработке более 300 млн т запасов руды и понижении границ горных работ до отметки 1000 м от земной поверхности увеличивается вероятность возникновения сильных динамических проявлений горного давления, особенно при создании блоков-целиков и отработке месторождений встречными фронтами (рис. 4).

Оптимальным по геомеханическим условиям является развитие горных работ от центра рудной залежи к флангам либо от одного фланга к другому. Однако в реальности в силу исторических и экономических факторов практически невозможно избежать ситуации, когда между очистными пространствами (подземными и открытыми) возникает необходимость отработки участка, являющегося, по сути, блоком-целиком. В случае удароопасных месторождений данная ситуация требует решения целого комплекса задач [11]. Многие из них можно решить на основе многовариантного прогнозного моделирования напряженно-деформированного состояния. Методика включает в себя определение ряда влияющих факторов: зон взаимного влияния горных работ, оптимального порядка ведения работ в данной зоне (блоке-целике), расположения и размеров стыковочной секции, технологии горных работ при отработке стыковочной секции, а также расчет категорий состояния выработок по мере развития горных работ и разработку мероприятий по поддержанию горных выработок и порядка контроля состояния массива.

При обосновании оптимального развития горных работ в блоке-целике важен выбор такого порядка и параметров работ, при которых концентрация напряжений в массиве блока-целика будет наименьшей, что снизит геодинамические риски. В то же время не следует допускать избыточной разгрузки массива, что может увеличить вероятность разрушений за счет действия растягивающих напряжений и деформаций и прорастания трещин отрыва, особенно в геологически и технологически нарушенных зонах. Специалистами ГоИ КНЦ РАН предложена и апробирована технология работ с созданием защитных зон (как правило, это опережающая разгрузочная зона висячем боку рудной залежи), которая позволяет снизить уровень максимальных сжимающих напряжений в зоне активного ведения горных работ более чем в 2 раза.



**Рис. 4. Прогноз распределения напряжений при сближении фронтов подземных горных работ вблизи дна карьера и мощной разломной структуры – Саамского разлома (показан коричневой линией) и рекомендуемые параметры разгрузочной зоны**

Объектами, на которых реализованы рассматриваемые методические подходы, являются подземные Кировский и Расвумчоррский рудники АО «Апатит» и зоны их стыковки с карьерами. С учетом геометрии карьерных выемок, наличия сейсмоактивных разломных структур и геомеханических особенностей участков массива пород определены размеры стыковочных секций, порядок их отработки [11].

Для апатит-нефелинового месторождения «Олений Ручей», обрабатываемого АО «СЗФК», геомеханическое обеспечение Горным институтом КНЦ РАН велось со стадии ТЭО и проекта, осуществлялось во время работы карьера, проходки капитальных выработок и продолжается для начавшейся в 2017 г. подземной отработки запасов. На этом месторождении инструментальными методами зафиксирован высокий уровень горизонтальных напряжений (30–40 МПа на глубинах 300–400 м от земной поверхности), отмечены динамические проявления горного давления в выработках. Месторождение отнесено к склонным и опасным объектам по горным ударам.

Методом численного моделирования определены закономерности исходного поля напряжений, его трансформации при отработке запасов карьера на проектную глубину. Установлены параметры взаимного влияния карьера и развивающегося подземного очистного пространства. Определены параметры камер и целиков при отработке слепых рудных тел системой с открытым очистным пространством, а также условия перехода к системе с подэтажной отбойкой и торцовым выпуском руды с принудительным обрушением кровли. Обоснован порядок отработки месторождения, позволяющий избежать развития обрушения подработанных пород до поверхности, в том числе в массиве охранного целика смежного Ньюрпахкского месторождения.

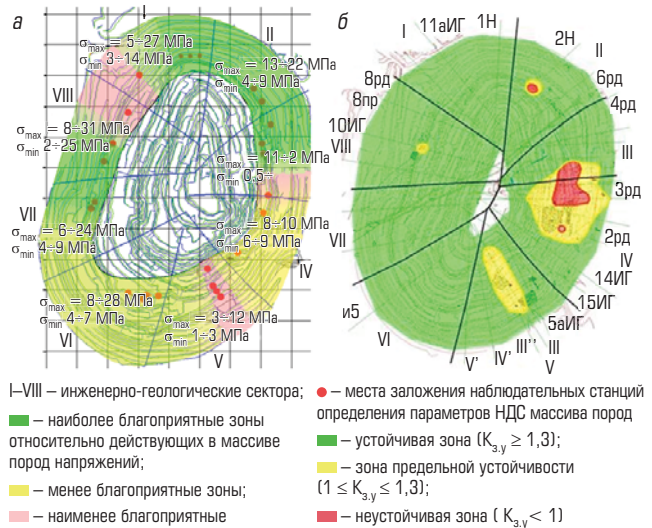
Разработаны методические указания по ведению горных работ в удароопасных условиях и инструкция по креплению выработок, учитывающие специфику месторождения. На предприятии начато создание комплексной системы мониторинга состояния массива и прогноза удароопасных зон. В перспективе будет совершенствоваться технология выемки запасов на глубоких горизонтах.

**Устойчивость бортов карьеров в тектонически напряженных массивах**

Разработка методических основ учета влияния действующих в массиве пород напряжений на устойчивость бортов карьеров является актуальной задачей [12, 13]. При действии в массиве пород повышенных горизонтальных напряжений, с одной стороны, создается дополнительная нагрузка, нормальная граням структурных блоков, перпендикулярных контуру карьера, что увеличивает силу трения по контактам блоков пород. Как следствие, повышается устойчивость отдельных уступов и борта карьера в целом. Именно этот фактор делает возможным увеличение угла откоса борта карьера, что продлевает срок службы карьера и минимизирует затраты на отработку и доработку запасов полезных ископаемых открытым способом. С другой стороны, учитывая прогнозируемые величины действующих напряжений на больших глубинах, сравнимые с прочностью пород на одноосное сжатие, появляется вероятность разрушения скальных пород в динамической форме под дном карьера.

Для каждого месторождения величины предельного угла откоса борта и глубины карьерной выемки зависят от всей совокупности геологических и горнотехнических факторов. На основе исследований НДС, физических свойств и структурной нарушенности массива пород в окрестности карьера «Железный», отрабатывающего Ковдорское месторождение, предложено районирование карьерного поля по величине действующих в массиве пород напряжений (рис. 5, а) и коэффициента запаса устойчивости  $K_{з.у}$ , в результате чего определены опасные зоны возможных нарушений устойчивости (см. рис. 5, б); местоположение опасных зон может меняться во времени в зависимости от динамики геомеханических трансформаций в прибортовом массиве. Выявленные в пределах карьерного поля зоны локальной неустойчивости требуют особого внимания для обеспечения безопасности горных работ. С этой целью возможно изменение технологии отработки отдельных участков карьера с учетом выявленных ослабленных зон; снижение динамической взрывной нагрузки на законтурный массив; применение мер по снижению обводненности массива пород; крепление групп уступов.

В настоящее время глубина карьера «Железный» достигла 500 м, действующим проектом предусмотрено ее увеличение до 850 м. Геомеханическое сопровождение открытых горных работ осуществляется применением средств мониторинга устойчивости элементов системы разработки. В дальнейшем при отработке Ковдорского месторождения возможен постепенный переход от открытой к комбинированной геотехнологии [14], что потребует дополнительных исследований для обеспечения геодинамической безопасности.



**Рис. 5. Районирование карьерного поля по величине действующих в массиве пород напряжений (а) и коэффициенту запаса устойчивости  $K_{з.у}$  (б)**

На основе анализа распределения напряжений  $\sigma_{max}$  в окрестности крупных карьерных выемок можно сделать следующие основные выводы. Во-первых, НДС массива пород в окрестности карьера «Железный» при его современном состоянии характеризуется относительно невысоким уровнем напряжений, при котором массив умеренно сжат. Иными словами, действующие в массиве пород напряжения сжимают структурные блоки, препятствуя образованию вывалов по трещинам, но в то же время не разрушают саму породу, т. е.  $\sigma_{действ} \leq 0,5 \sigma_{сж}$ . В зонах геологических нарушений имеет место пониженный уровень напряжений сжатия. Наиболее опасные участки с достаточно высокими сжимающими напряжениями приурочены к зонам, расположенным между структурными неоднородностями под дном карьерной выемки и на сопряжении борта с дном карьера. Во-вторых, нижняя часть глубоких карьерных выемок находится в зоне действия высоких сжимающих напряжений, сравнимых по абсолютным величинам с пределом прочности вмещающих пород и руд на одноосное сжатие. Здесь увеличивается вероятность проявлений горного давления в динамической форме, особенно на сопряжении борта и дна карьера, что подтверждается практикой.

**Заключение**

Сформулированы методические подходы к оценке и прогнозу геодинамической безопасности при отработке месторождений Кольского полуострова. По результатам измерений напряжений на месторождениях Мурманской области выявлены тенденции их изменения с глубиной.

На основе комплекса геологических, геомеханических и технологических моделей, верифицированных натурными определениями НДС и свойств пород в массиве, изучено влияние масштабов и параметров геотехнологий на состояние Хибинской горнотехнической системы. Выявлены новые закономерности

трансформации напряжений на глубинных горизонтах месторождений. С учетом геомеханических ограничений по условиям удароопасности даны рекомендации по отработке запасов, позволяющие увеличить производительность действующих горных предприятий.

Разработанные принципы геомеханического сопровождения горных работ и мероприятия по разгрузке или упрочению массива позволяют минимизировать геодинамические риски при отработке запасов в тектонически напряженных массивах Кольского полуострова.

**Библиографический список**

1. Skufina T. P., Samarina V. P., Krachunov H., Savon D. Yu. Problems of Russia's Arctic development in the context of optimization of the mineral raw materials complex use // *Eurasian Mining*. 2015. No. 2. P. 18–21. DOI: 10.17580/em.2015.02.05
2. Maleki H., Lawson H. Analysis of Geomechanical Factors Affecting Rock Bursts in Sedimentary Rock Formations // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 191. P. 82–88.
3. 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*. – Leiden : CRC Press/Balkema, 2018. P. 47–61.
4. Руководство по проектированию бортов карьера / под ред. Д. Рида, П. Стейси : пер. с англ. – Екатеринбург : Правовед, 2015. – 544 с.
5. Kozыrev A. A., Semenova I. E. Geomechanical Aspects of Large-Scale Mining at the Khibiny Contiguous Apatite Deposits // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*. – Albena, 2017. Vol. 17. Iss. 13. P. 367–374.
6. Мельников Н. Н., Козырев А. А., Панин В. И. Техногенная сейсмичность как отражение эволюции напряженно-деформированного состояния геологической среды в горно-рудной природно-технической системе // *Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле : матер. докл. Всероссийской конф. – М. : ИФЗ, 2009. Т. 2. С. 366–377.*
7. Hudyma M., Brown L., Cortolezzis D. Seismic Risk in Canadian mines // *Maintenance Engineering and Mine Operations : Conference*. – Sudbury, 2016.
8. Lasocki S., Orlecka-Sikora B., Mutke G., Pytel W., Rudzinski L. A catastrophic event in Rudna copper-ore mine in Poland on 29 November, 2016: what, how and why // *Proceedings of*

- the 9th International Symposium on Rockbursts & Seismicity in Mines. – Santiago, 2017. P. 316–324.
9. Сашурин А. Д., Бале А. Е., Панжин А. А., Усанов С. В. Инновационная технология диагностики геодинамической активности геологической среды и оценки безопасности объектов недропользования // *Горный журнал*. 2017. № 12. С. 16–20. DOI: 10.17580/gzh.2017.12.03
10. 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.
11. Семенова И. Э., Аветисян И. М. Отработка стыковочной зоны между открытыми и подземными горными работами Расвумчорского рудника АО «Апатит» в удароопасных условиях // *ГИАБ*. 2016. № 4. С. 314–325.
12. Зотеев В. Г., Зотеев О. В. О необходимости совершенствования нормативно-методической базы по геомеханическому обеспечению открытых горных работ // *Горный журнал*. 2010. № 1. С. 66–68.
13. Сашурин А. Д. Современные геодинамические движения и их роль в формировании напряженно-деформированного состояния массива горных пород // *Геомеханика в горном деле : докл. Всероссийской науч.-техн. конф. с междунар. участием*. – Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 2014. С. 3–12.
14. Леонтьев А. А., Белгородцев О. В., Громов Е. В., Казачков С. В. Вскрытие глубоких горизонтов карьера «Железный» Ковдорского ГОКа подземными выработками // *ГИАБ*. 2013. № 4. С. 212–220. [PX](#)

«GORNYI ZHURNAL», 2019, № 6, pp. 45–50  
DOI: 10.17580/gzh.2019.06.05

**Geomechanical support of mining operations in mines of the Murmansk Region**

**Information about authors**

**A. A. Kozыrev**<sup>2</sup>, Head of Rock Mechanics Department, Professor, Doctor of Engineering Sciences  
**V. I. Panin**<sup>1</sup>, Leading Researcher, Candidate of Engineering Sciences  
**I. E. Semenova**<sup>1</sup>, Leading Researcher, Candidate of Engineering Sciences, innas@goi.kolasc.net.ru  
**V. V. Rybin**<sup>2</sup>, Leading Researcher, Doctor of Engineering Sciences  
<sup>1</sup> Mining Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

**Abstract**

The article presents the results and issues of geomechanical support of mining operations at the deposits of the Kola Peninsula, which is an edge part of the Baltic shield and exposed to impact of high subhorizontal stresses. The authors discuss ambiguity of the effect of tectonic compression on the rock mass of deposits under mining and the approaches to solving the actual problem of managing geodynamic risks in the development of rockburst-hazardous deposits. According to the results of stress measurements in the deposits of the Murmansk Region, the trends of their changes with depth and the direction of action are revealed.

The data obtained on the stress field, main fault structures, surface topography, parameters of ore bodies and geometry of stoping excavations have allowed the design of large-scale geomechanical models of the Khibiny and Kovdor massifs, as well as the Zhdanovskoe copper–nickel deposit. Varying the volumes of mined-out and displaced reserves made it possible to consider sequential development of contiguous deposits, obtaining patterns of stress–strain state change, and optimizing sequence and direction of mining operations in rockburst-hazardous conditions.

Designed to meet the needs of the mining industry, Sigma GT software and a set of deposit models are used to predict geomechanical situation, evaluate mining plans, and get recommendations on supporting mine excavations directly in mines. Regional and local measures are proposed to ensure the safety of mining operations in the particular conditions of specific deposits.

The developed principles of geomechanical support of mining operations allow minimizing geodynamic risks when developing reserves in tectonically stressed rock masses of the Kola Peninsula.

**Keywords:** tectonically stressed rock mass, geodynamic risk management, stress–strain state, underground and open-pit mining, contiguous deposits, numerical modeling, geomechanical monitoring.

**References**

1. Skufina T. P., Samarina V. P., Krachunov H., Savon D. Yu. Problems of Russia's Arctic development in the context of optimization of the mineral raw materials complex use. *Eurasian Mining*. 2015. No. 2. pp. 18–21. DOI: 10.17580/em.2015.02.05

2. Maleki H., Lawson H. Analysis of Geomechanical Factors Affecting Rock Bursts in Sedimentary Rock Formations. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 191. pp. 82–88.
3. 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*. Leiden : CRC Press/Balkema, 2018. pp. 47–61.
4. Read J., Stacey P. (Eds.). *Guidelines for Open pit slope design*. Translated from English. Ekaterinburg : Pravoved, 2015. 544 p.
5. Kozыrev A. A., Semenova I. E. Geomechanical Aspects of Large-Scale Mining at the Khibiny Contiguous Apatite Deposits. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*. Albena, 2017. Vol. 17, Iss. 13. pp. 367–374.
6. Melnikov N. N., Kozыrev A. A., Panin V. I. Induced seismicity as an indication of stress state evolution in a geological environment within the natural–technical system of a mine. *Tectonophysics and Current Issues in Geosciences : All-Russian Conference Proceedings*. Moscow : IFZ, 2009. Vol. 2. pp. 366–377.
7. Hudyma M., Brown L., Cortolezzis D. Seismic Risk in Canadian mines. *Maintenance Engineering and Mine Operations : Conference*. Sudbury, 2016.
8. Lasocki S., Orlecka-Sikora B., Mutke G., Pytel W., Rudzinski L. A catastrophic event in Rudna copper-ore mine in Poland on 29 November, 2016: what, how and why. *Proceedings of the 9th International Symposium on Rockbursts & Seismicity in Mines*. Santiago, 2017. pp. 316–324.
9. Sashurin A. D., Balek A. E., Panzhin A. A., Usanov S. V. Innovative technology for diagnosis of geodynamic activity in geological media and safety assessment of subsoil use objects. *Gornyi Zhurnal*. 2017. No. 12. pp. 16–20. DOI: 10.17580/gzh.2017.12.03
10. Kozыrev A. A., Panin V. I., Semenova I. E., Zhuravleva O. G. Geodynamic safety of mining in rockburst-hazardous conditions in terms of the khibiny apatite deposits. *Journal of Mining Science*. 2018. Vol. 53.
11. Semenova I. E., Avetisyan I. M. Mining of a joining area between open and underground mining in the Rasvumchorr mine, JSC «Apatit», under rock burst hazardous conditions. *GIAB*. 2016. No. 4. pp. 314–325.
12. Zoteev V. G., Zoteev O. V. About necessity of improvement of standard & methodical base on geomechanical security of open mining work. *Gornyi Zhurnal*. 2010. No. 1. pp. 66–68.
13. Sashurin A. D. Modern geodynamic movements and implications for the stress state formation in rock mass. *Geomechanics in Mining : Proceedings of the All-Russian Scientific–Technical Conference with International Participation*. Yekaterinburg : IGD Uro RAN, 2014. pp. 3–12.
14. Leontiev A. A., Belogorodtsev O. V., Gromov E. V., Kazachov S. V. Deep levels opening by the underground workings at the Zhelezny mine, Kovdorsky GOK. *GIAB*. 2013. No. 4. pp. 212–220.