

УДК 622.83

**О ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ГОРНЫХ РАБОТ В УДАРООПАСНЫХ УСЛОВИЯХ
НА ПРИМЕРЕ ХИБИНСКИХ АПАТИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

А. А. Козырев, В. И. Панин, И. Э. Семенова, О. Г. Журавлева

*Горный институт Кольского научного центра РАН,
E-mail: innas@goi.kolasc.net.ru, ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия*

Представлены результаты исследований по решению актуальной задачи управления геодинамическими рисками при разработке Хибинских удароопасных месторождений на Кольском полуострове. Разработанные методики и подходы способствуют минимизации геодинамических рисков при ведении крупномасштабных горных работ на сближенных месторождениях апатит-нефелиновых руд. Создана геомеханическая модель, позволяющая рассматривать последовательную отработку комплекса сближенных месторождений Хибинского массива. По прогнозным данным моделирования напряженно-деформированного состояния определяется оптимальный порядок и направление развития горных работ в удароопасных условиях. При этом учитывается вложенная кольцевая структура массива, направление тектонического сжатия, основные радиальные разломы, рельеф дневной поверхности, параметры рудных тел. Проводится комплексирование прогнозных полей напряжений с данными сейсмического прогноза, что повышает надежность выявления зон повышенной удароопасности. Рассмотрены примеры обоснования порядка ведения очистных работ с использованием комплекса натуральных и численных методов. Показаны основные направления развития геомеханического сопровождения работ, варианты технологических решений, приводящие к региональной и локальной разгрузке массива горных пород.

Управление геодинамическими рисками, напряженно-деформированное состояние, сближенные месторождения, крупномасштабные горные работы, численное моделирование, тектонически напряженные массивы горных пород

DOI: 10.15372/FTPRPI20180504

В настоящее время из земных недр ежегодно извлекается около 200 млрд т горных пород, причем масштабы выемки полезных ископаемых продолжают расти. 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 работ существенным образом влияет также на напряженно-деформированное состояние геологической среды и может быть причиной геодинамических явлений с катастрофическими последствиями [1–5]. Проблема горных ударов и техногенной сейсмичности актуальна для многих регионов мира с развитой горнодобывающей промышленностью [6–9], в том числе и для большинства рудников Кольского полуострова.

Техногенная и естественная сейсмичность являются отражением процессов самоорганизации геологической среды в процессе ее эволюции: в первом случае — в горно-технической системе, во втором — в верхней части земной коры. Единство физической природы техногенных и тектонических землетрясений обусловило широкое использование моделей и методов классической сейсмологии в решении проблемы техногенной сейсмичности. Состояние проблемы техногенной сейсмичности тесным образом связано с состоянием проблемы сейсмичности природной (тектонической), где в последние годы четко обозначился кризис, вызванный нерешенностью вопросов средне- и краткосрочного прогноза землетрясений [10].

Одной из фундаментальных причин, накладывающих ограничения на возможность краткосрочных прогнозов как естественных, так и техногенных землетрясений является то, что геологическая среда — это открытая нелинейная диссипативная система, в которой при условии притока энергии постоянно идут процессы трансформации в условиях динамического равновесия с образованием новых структур и диссипацией энергии. При этом энергия внешних воздействий может быть на несколько порядков меньше самого динамического явления, т. е. момент и место реализации этого явления определяется триггерами, которых в геологической среде горнотехнической системы может быть достаточно много [11].

Другой важный фактор связан с тем, что большинство вариаций параметров геофизических полей имеет мозаичное распределение на больших территориях и не указывает на местоположение очага. “При разнообразии триггеров неизбежны как ложные тревоги, так и пропуски некоторых разрушительных землетрясений. В этих условиях ни в одной стране мира краткосрочные прогнозы не строятся на регулярной основе” [11]. Поэтому одна из насущных задач в проблеме прогноза землетрясений — изучение возможных триггеров и механизмов их влияния на сейсмоактивные разломы [12].

На современном этапе развития сейсмического прогноза предпочтение должно быть отдано определению участков, где наиболее вероятно проявление сильных сейсмических событий, хотя задача пространственно-временного прогноза этих событий также должна оставаться в числе приоритетных направлений соответствующих исследований. Аналогичная ситуация складывается в решении проблемы горных ударов и техногенных землетрясений.

В связи с этим предложена методология управления геодинамическими рисками при ведении горных работ в высоконапряженных массивах скальных пород, отличающаяся тем, что осуществляется прогноз и профилактика не отдельного динамического события, а кризисной области, опасной по динамическим явлениям типа горных ударов и техногенных землетрясений, что позволяет сделать более надежным геодинамический прогноз и повысить безопасность горных работ.

Управление рисками — комплекс организационно-технических мероприятий для обеспечения уровня безопасности с приемлемым уровнем риска. Управление геодинамическими рисками при ведении горных работ сводится к управлению напряженно-деформированным состоянием (НДС) геологической среды в горнотехнических системах, основная цель которого — обеспечение безопасности и технико-экономической эффективности горных работ при разработке месторождений полезных ископаемых, а также при различном подземном строительстве. В основе всякого управления лежит информация, циркулирующая в системе управления и содержащая в общем случае три составляющие: информацию о фактическом состоянии объекта управления; прогнозную модель условий в объекте управления; организационные и технические средства управления.

Эффективность любого управления определяется адекватностью оценки текущей ситуации и надежностью прогнозной оценки состояния объекта техногенного воздействия. В нашем случае речь идет о геодинамической безопасности, которая может быть обеспечена только надежным геомеханическим прогнозом и эффективной профилактикой.

В результате многолетних исследований по проблеме обеспечения безопасности при ведении горных работ в удароопасных условиях определилась оптимальная методология геомеханического прогноза, которая состоит из следующих этапов:

- создание инженерно-геологических моделей месторождения или разрабатываемых его участков;
- построение математических или численных моделей НДС месторождений или актуальных его частей;
- прогноз геомеханической ситуации и определение оптимального порядка ведения горных работ, выбор и обоснование противоударных профилактических мероприятий.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О НДС ХИБИНСКОЙ АПАТИТОВОЙ ДУГИ

Хибинский массив — крупнейшая сырьевая база для производства минеральных удобрений, не имеющая аналогов в мире, которая представлена десятью месторождениями; из них шесть эксплуатируются АО «Апатит», два — АО «Северо-западная фосфорная компания», еще два находятся в резерве. За период освоения месторождений добыто более 1.6 млрд т руды (1/3 всех запасов) или более 4.5 млрд т горной массы. Запасы месторождений отрабатываются открытым и подземным способами. При подземной выемке используются варианты системы с обрушением руды и вмещающих пород. Извлечение и перемещение больших объемов породных масс повлекло за собой изменение рельефа и геодинамического режима региона.

Существенным фактором формирования полей напряжений в Хибинском массиве является то, что он тектонически напряженный. Это комплекс пород одного генезиса, приуроченный к участкам поднятия земной коры, отделенного геолого-структурными границами от окружающих пород. Характерные признаки тектонически напряженных массивов — специфические проявления горного давления в выработках, дискование керна, эллипсообразность поперечного сечения скважин и выработок, азимутальные искривления стволов скважин, что обусловлено действием горизонтальной составляющей тензора напряжений, значительно превышающей вертикальную. Результаты натурных определений, проведенных в 1965 – 1995 гг., показали, что направление действия горизонтальных напряжений близко к залеганию кольцевых структур Хибинского массива. Считается, что регион Кольского полуострова находится в зоне действия субширотных тектонических сил [13]. В последующие годы уточнялись параметры НДС отдельных месторождений. К настоящему времени наиболее полная картина сложилась для месторождений Хибинской апатитовой дуги, отрабатываемых подземным способом, где измерения напряжений методом разгрузки проводились в пределах шахтного поля на нескольких горизонтах. На рис. 1, 2 представлена схема действия тектонических напряжений и их значения на различной глубине на Кукисвумчоррском, Юкспорском месторождениях и месторождении Апатитовый цирк.

Данные о параметрах поля напряжений месторождений в обязательном порядке вносятся в инструктивные документы горных предприятий, регламентирующие ведение горных работ на месторождениях Хибин, склонных и опасных по горным ударам.

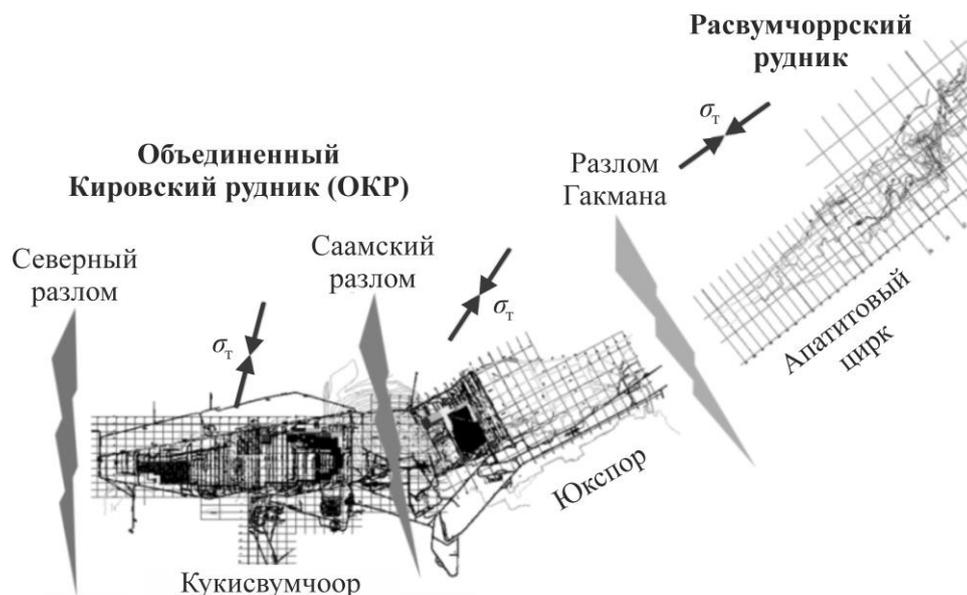


Рис. 1. Направление действия тектонических напряжений на месторождениях АО «Апатит», обрабатываемых подземным способом

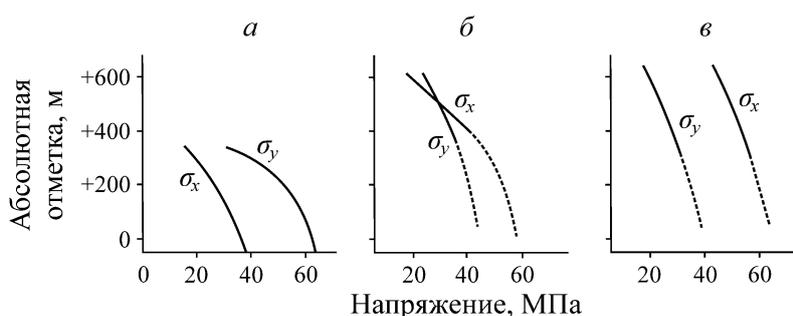


Рис. 2. Тектонические напряжения на месторождениях АО «Апатит», обрабатываемых подземным способом: *а* — Кукисвумчоррское крыло ОКР; *б* — Юкспорское крыло ОКР; *в* — Расвумчоррский рудник

Отработка Хибинских месторождений ведется в удароопасных условиях, связанных с действием в массиве пород высоких тектонических напряжений [14]. Неизбежное углубление горных работ и их интенсификация приводит к трансформации исходного НДС с формированием зон концентрации и зон разгрузки отдельных участков массива, а также к изменениям направления действия напряжений. В целом на планируемых к отработке горизонтах прогнозируется повышение фонового уровня напряжений и увеличение площадей потенциально опасных зон.

ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ХИБИНСКОГО МАССИВА

Для изучения геомеханических процессов, связанных с изменением НДС массива при ведении крупномасштабных горных работ в высоконапряженных массивах, разработана объемная конечно-элементная модель Хибинского массива с учетом вложенной кольцевой структуры, радиальных разломов, рельефа дневной поверхности, параметров рудных тел и горно-технических факторов на каждом месторождении [15].

Основная часть запасов апатитовых руд расположена в южной части массива в пределах так называемой Хибинской апатитовой дуги. При имитации последовательной выемки всех разведанных запасов установлены следующие особенности напряженно-деформированного состояния Хибинского массива (рис. 3):

- подтверждена гипотеза трансформации типа НДС с глубиной, определены абсолютные высотные отметки от -1000 до -1200 м, ниже которых вертикальные напряжения превалируют над горизонтальными, из чего следует, что все разведанные в настоящее время запасы Хибинской апатитовой дуги будут обрабатываться в условиях тектонического сжатия;
- 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 (рис. 4).

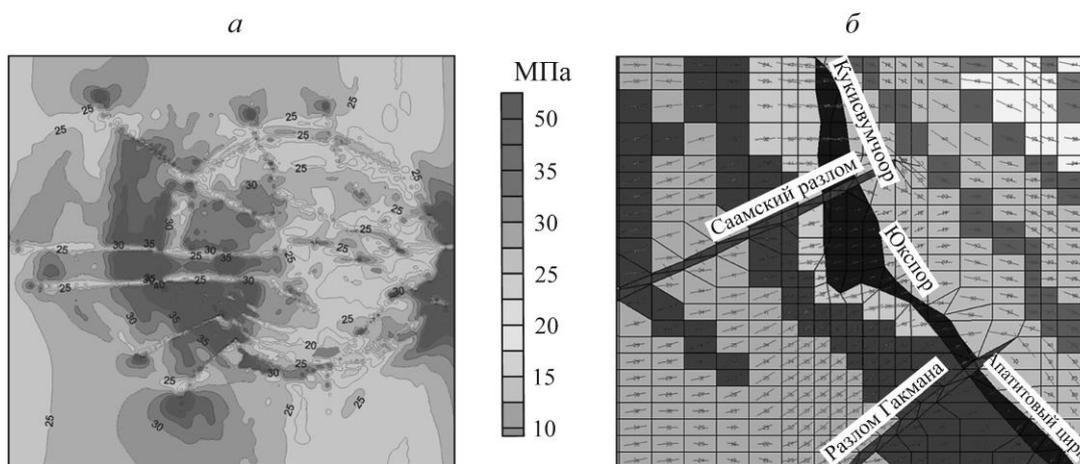


Рис. 3. Распределение σ_{\max} в горизонтальном сечении на нулевой отметке в варианте с учетом тектоники: *a* — изолинии для области, включающей весь Хибинский массив; *b* — векторное распределение для участка, включающего месторождения, обрабатываемые АО “Апатит” подземным способом

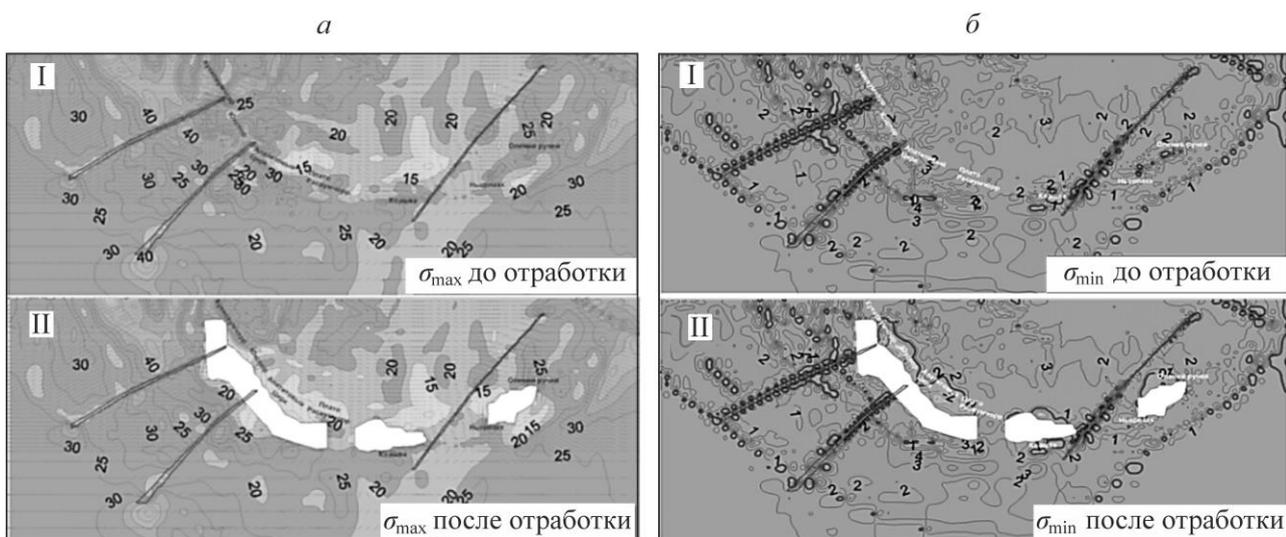


Рис. 4. Распределение σ_{\max} (*a*) и σ_{\min} (*b*) в горизонтальном сечении 50 м от дневной поверхности: I — нетронуемый массив; II — полная выемка разведанных запасов

Отметим, что по мере выемки запасов апатитовой руды векторы σ_{\max} на больших глубинах выполаживаются, т. е. поле напряжений приобретает более выраженный тектонический характер. По прогнозным данным фоновый уровень максимальных сжимающих напряжений на рабочих горизонтах после выемки запасов до нулевой отметки превысит 60 МПа, тогда как в настоящее время фоновые значения σ_{\max} не более 50 МПа. При таких напряжениях подавляющее большинство выработок будет иметь высокую категорию удароопасности, что потребует дополнительных затрат на крепление и увеличит стоимость добычи руды.

ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ

Для формирования мощных сейсмических событий, в том числе техногенных землетрясений при ведении горных работ, необходимо сочетание ряда условий. Прежде всего, высокий уровень горизонтальных тектонических напряжений, определяемый соответствующей тектонофизической обстановкой, т. е. наличие зон с большими градиентами скоростей современных движений. Кроме этого — наличие соответствующих хрупких высокопрочных пород с тектоническими неоднородностями в пределах зоны разработки, благоприятные геоморфологические условия (гористый рельеф), наличие крупномасштабной разработки, взрывное воздействие при проходке выработок и отбойке руды, сезонные водопритоки в горные выработки и многое другое.

Принципиальная схема подготовки и реализации сильных сейсмических событий в массиве при естественном развитии процесса в течение длительного времени включает три стадии подготовки разрыва:

- накопление тектонических напряжений при медленно развивающейся деформации, при этом выделяются небольшие порции энергии в виде слабых толчков или землетрясений (сейсмический фон);
- нарастание напряжений и активизация деформаций, сопровождающаяся проявлением форшоков и укрупнением разрывов, эта стадия завершается образованием крупного разрыва, вызывающего главный сейсмический толчок;
- последующее перераспределение напряжений, разрастание разрыва, проявление афтершоков.

Под влиянием горных работ напряжения концентрируются в окрестности очистного пространства и достигают предельных значений гораздо раньше и чаще реализуются в виде более слабых толчков. При мощных взрывных воздействиях поля напряжений складываются и реализация разрушений наступает еще раньше. Поэтому для прогноза горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений важна информация о напряженном состоянии нетронутого массива, возможных деформациях и дополнительных напряжениях вследствие крупномасштабной выемки горных масс, условиях высвобождения накопленной энергии.

Одно из мощных техногенных землетрясений с магнитудой ~ 3.5 произошло 21 октября 2010 г. в 12 ч 10 мин по московскому времени. Гипоцентр события находился в Кукисвумчоррском крыле Кировского рудника примерно на горизонте +16 м (360 м от поверхности) на некотором удалении от горных выработок. Выделившаяся энергия составила $7 \cdot 10^9$ Дж. Сильные толчки и горизонтальные колебания продолжительностью несколько секунд зафиксированы в п. Кукисвумчорр (0.5 – 1.5 км от эпицентра), Ботаническом саду КНЦ РАН (5 км) и г. Кировске (7 – 12 км). В г. Апатиты (25 – 30 км) сотрясения отмечены выборочно. В результате этого события в ряде подземных выработок рудника произошло раскрытие трещин, отслоение бетонной и набрызг-бетонной крепи, обрушение породы (рис. 5). Значимых последствий землетрясения на поверхности не выявлено.

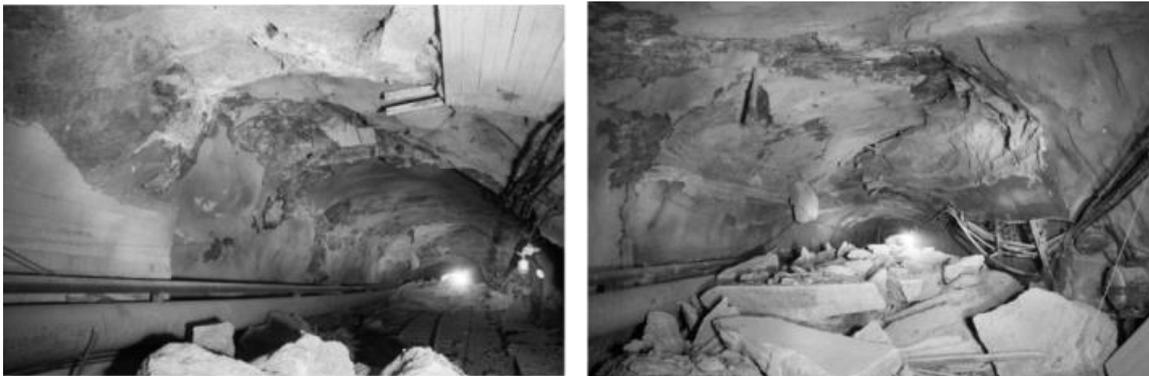


Рис. 5. Разрушения в выработках откаточного гор. +90 м Кукисвумчоррского крыла Кировского рудника в результате техногенного землетрясения

В [16] проведена оценка произошедшего разрыва, который составил порядка 700 м, при этом размер зоны подготовки землетрясения — несколько километров, т. е. включает в себя всю промышленную зону рудника.

В 1989 г. на Кировском руднике также произошло техногенное землетрясение. В обоих случаях наблюдалась активизация разломов и подвижки по ним. Последнее мощное сейсмическое событие (магнитуда ~ 3.3) зафиксировано 9 января 2018 г. в 06 ч по московскому времени. Гипоцентр события находился в лежачем боку за пределами рудного тела вне зоны ведения очистных работ Расвумчоррского рудника. Событие сопровождалось сильным звуковым эффектом, сотрясением массива и дневной поверхности, ощущалось как работниками Расвумчоррского рудника, так и жителями городов Кировск и Апатиты. Объем пород, в котором выявлено разрушение выработок, составил 135 000 м³.

Эти события свидетельствуют о сложной геодинамической ситуации в Хибинском массиве. Отметим, что события уровня техногенного землетрясения происходят раз в несколько лет и их очаги удалены от горных работ на сотни метров и более. С одной стороны, это затрудняет их прогноз (события не попадают в зону повышенной точности регистрации сейсмичности), с другой — снижает объем разрушений в зоне активного ведения горных работ. При этом за последние годы достигнуты существенные успехи в перспективном и текущем прогнозе удароопасности в окрестности создаваемых очистных обнажений и подработанном массиве пород, что позволяет снизить до минимума риск серьезных нарушений технологического процесса и особенно риск здоровью и жизни горняков.

ПРОГНОЗ УДАРООПАСНОСТИ

В Горном институте КНЦ РАН ведутся работы по развитию региональных и локальных методов прогноза. Сформирована серия конечно-элементных моделей отдельных месторождений Хибинской апатитовой дуги, реализующих метод конечных элементов в объемной постановке и позволяющих проводить моделирование поля напряжений и деформаций с учетом основных геологических и горнотехнических факторов. Расчеты НДС и категорий состояния выработок проводятся на нескольких масштабных уровнях, что дает возможность осуществлять ретроспективные, текущие и перспективные прогнозы эволюции параметров напряженно-деформированного состояния геологической среды в сложных горнотехнических системах. Результаты расчетов являются основой выбора наиболее безопасной по геомеханическим условиям системы разработки и ее параметров и используются при планировании безопасного порядка выемки запасов и противоударных мероприятий (рис. 6).

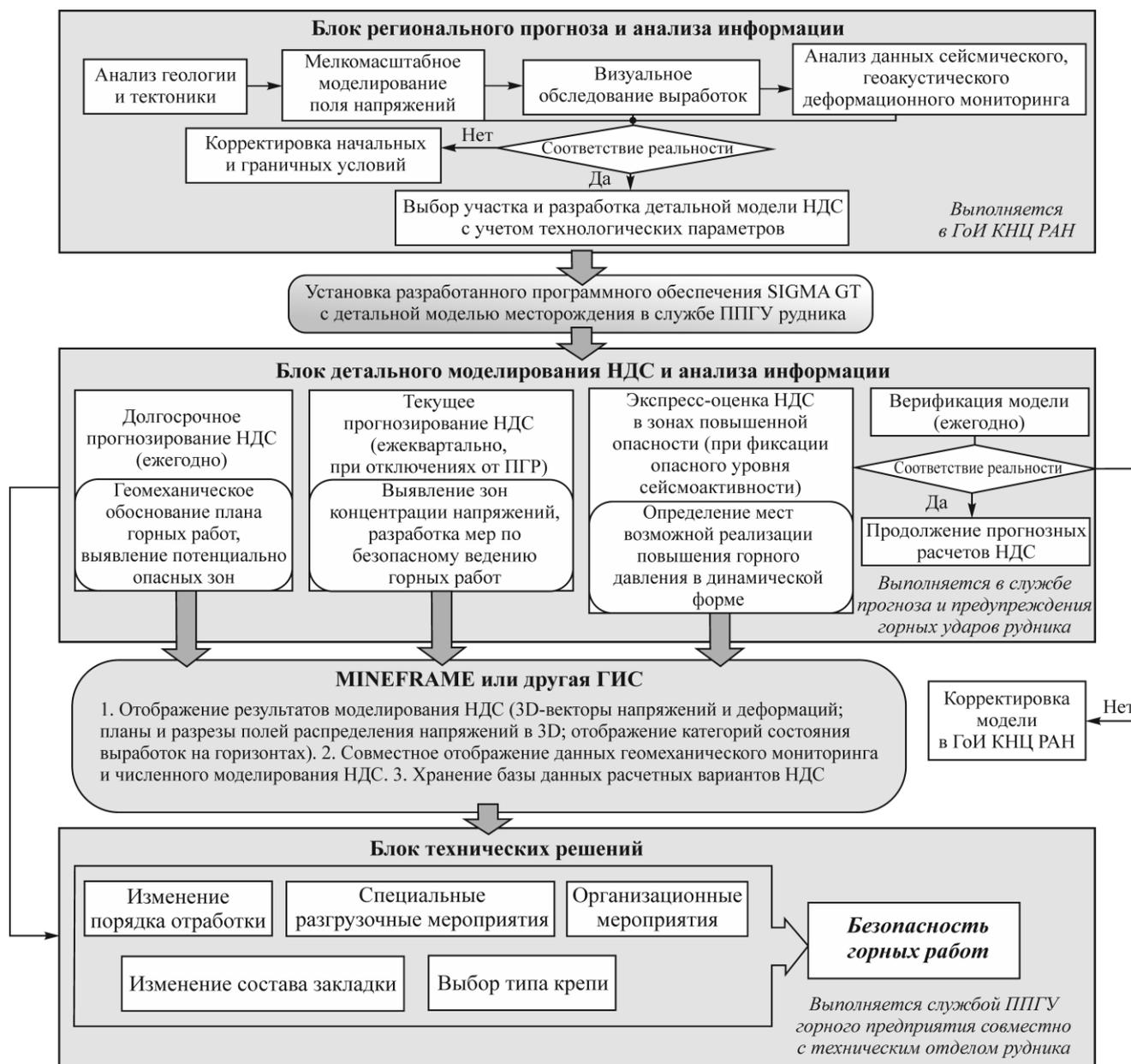


Рис. 6. Схема интеграции модуля прогноза НДС в систему обеспечения геодинамической безопасности горного предприятия

Важным направлением является обработка и анализ данных сейсмических наблюдений, полученных с помощью автоматизированных систем контроля состояния массива [17]. Разработана методика комплексной оценки сейсмической активности массива, основанная на совместном использовании нескольких прогностических критериев, различных по физическому смыслу и дополняющих друг друга. Для совместного использования критериев, отражающих различные параметры потока сейсмической эмиссии, рассчитываются значения комплексного критерия:

$$X'' = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X'_j,$$

где N — количество отдельных прогностических критериев; X'_j — значение каждого прогностического критерия.

Изменения количества, конфигурации и местоположения выделенных сейсмоактивных зон отражают характер перераспределения действующих напряжений в массиве в зависимости от интенсивности ведения крупномасштабных горных работ. По степени сейсмоактивности определяются зоны: устойчивая, пульсирующая, растущая (наиболее опасная). Комплексная оценка ряда отдельных критериев позволяет учитывать поведение каждого из них. С помощью комплексного критерия можно учесть поведение показателей всех отдельных критериев и точнее оценить прогностические параметры сейсмического режима в пространственной ячейке, чем при использовании одного критерия. Детальный анализ структуры множества сейсмических событий с целью выявления закономерностей формирования кластеров сейсмособытий и их взаимосвязи 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 (рис. 7). Опыт комплексного анализа показывает его актуальность, практическую значимость и необходимость дальнейшего развития с наработкой прогностических критериев по локализации пространственных и временных параметров опасных зон.

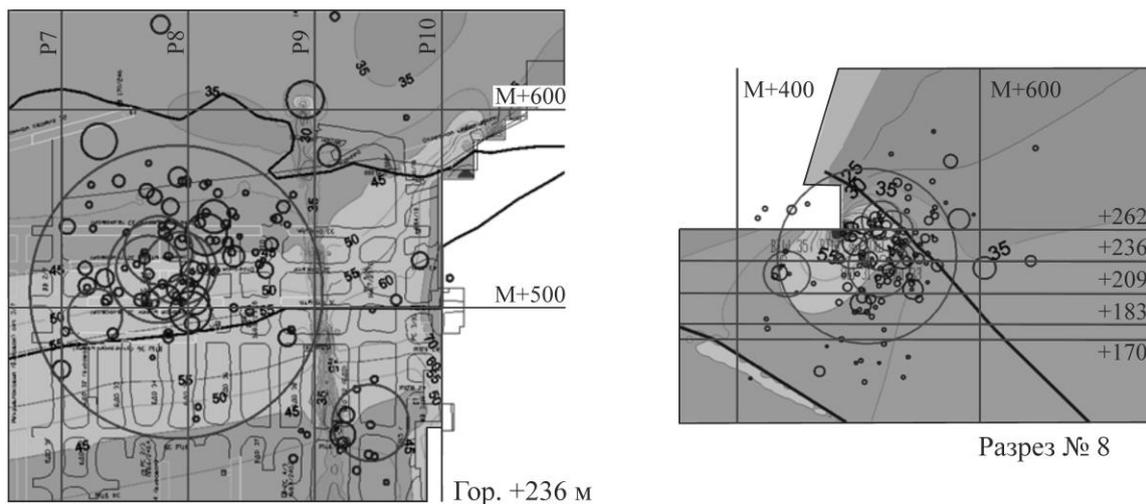


Рис. 7. Сопоставление сейсмичности и распределение напряжений в удароопасном блоке

ПРОФИЛАКТИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ

Анализ сейсмической активности, областей максимальных разрушений, результатов численных прогнозов НДС позволили определить основные зоны повышенной удароопасности при отработке запасов месторождений Хибинской апатитовой дуги. Участки массива между сближающимися крупномасштабными горными работами представляют блоки-целики с повышенной концентрацией сжимающих напряжений. Кроме того, на этих участках наблюдаются зоны растягивающих напряжений по минимальной компоненте. Такое сочетание совместного воздействия сил сжатия и растяжения служит фактором, негативно сказывающимся на устойчивости массива в целом и отдельных выработок в частности. Еще одна область с повышенным уровнем удароопасности — зона опорного давления от очистного пространства, где в большинстве случаев концентрация сжимающих напряжений максимальна. Решение этой проблемы связано с прогнозом и управлением обрушением подработанной толщи пород.

Нормативными документами предусматривается планомерное извлечение запасов в удароопасных условиях по возможности без образования целиков, острых углов и выступов фронта очистных работ. Оптимально по геомеханическим условиям развитие горных работ от центра рудной залежи к флангам либо от одного фланга к другому. В реальности невозможно избежать ситуации, когда возникает необходимость отработки участка между очистными пространствами (подземными и открытыми). Выемку запасов блока-целика необходимо регламентировать как с точки зрения технологии, так и с позиций обеспечения безопасности горных работ. Подобные блоки-целики формируются в следующих случаях: при отработке сближенных месторождений, имеющих условную границу; при отработке месторождения комбинированным способом; в случае нескольких разрезов на одном месторождении при подземной выемке запасов.

Проблема в том, что на начальном этапе проектирования открытые и подземные горные работы на месторождении и горные работы на сближенных месторождениях рассматриваются как независимые. В определенный момент горное предприятие встает перед фактом необходимости отработки стыковочной зоны. В случае удароопасных месторождений такая ситуация требует решения комплекса задач, многие из которых можно решить на основе многовариантного прогнозного моделирования напряженно-деформированного состояния.

Предложена технология ведения горных работ с созданием защитных зон (как правило, это опережающая разгрузочная зона висячем боку рудной залежи), которые позволяют снизить уровень максимальных сжимающих напряжений в значительной части массива более чем в 2 раза. Пример перераспределения напряжений в случае реализации такой технологии на Юкспорском месторождении приведен на рис. 8.

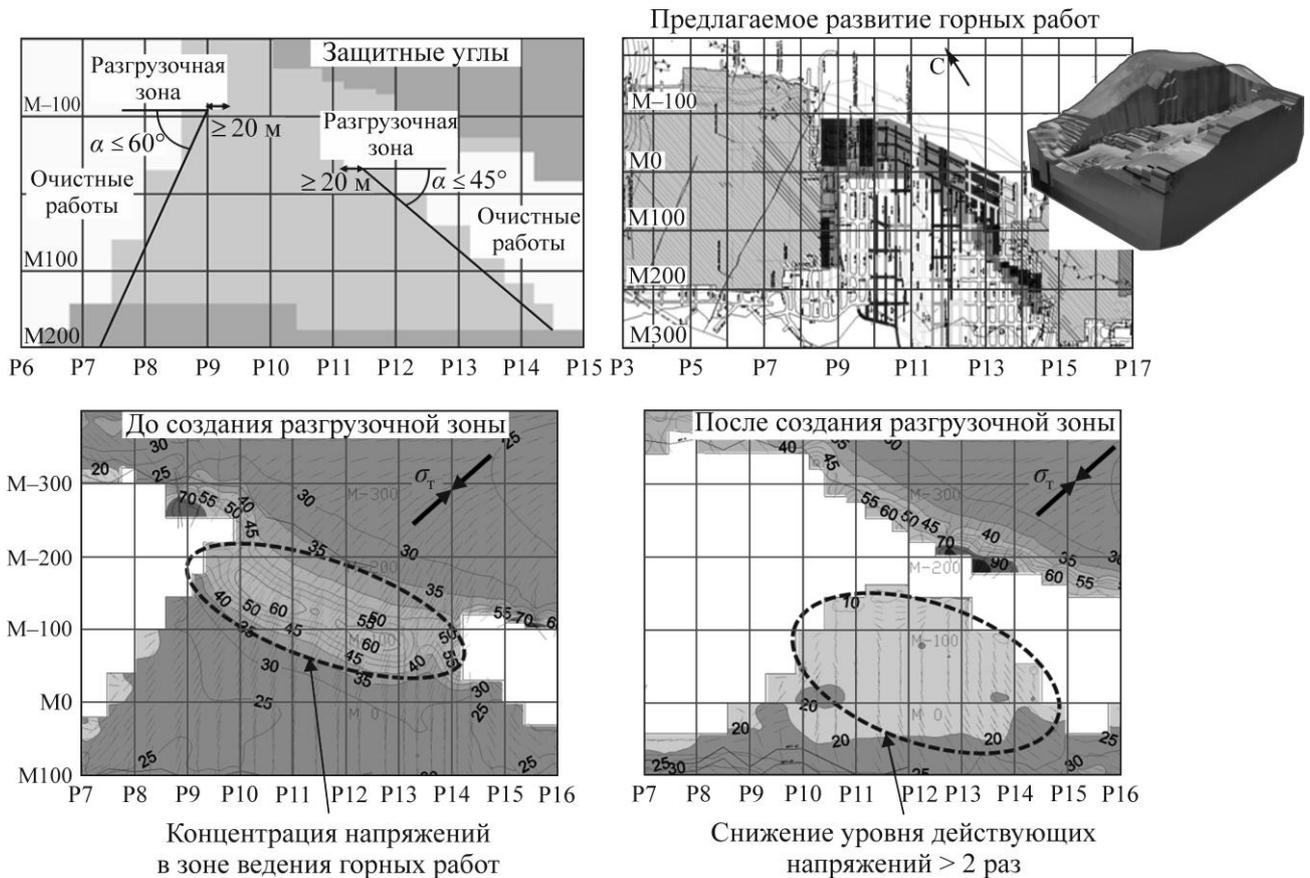


Рис. 8. Разработка региональных мероприятий по снижению действующих напряжений в зоне ведения горных работ на примере Юкспорского месторождения АО «Апатит»: σ_1 — направление сжимающих напряжений; 20–90 МПа — напряжения

Сформировано представление о стадийности процесса обрушения пород всячего бока до дневной поверхности в условиях действия тектонических сил: развитие и накопление трещин в зонах, приуроченных к границам заделки подработанных пород и непосредственно на дневной поверхности; слияние трещин и формирование магистрального разрыва; образование единой плоскости обрушения до дневной поверхности при накоплении массивом энергетического потенциала, необходимого для преодоления зоны с пониженными значениями растягивающих деформаций. Пример прогноза прорастания трещины отрыва в подработанном массиве и ее фактическое положение на дневной поверхности показаны на рис. 9.

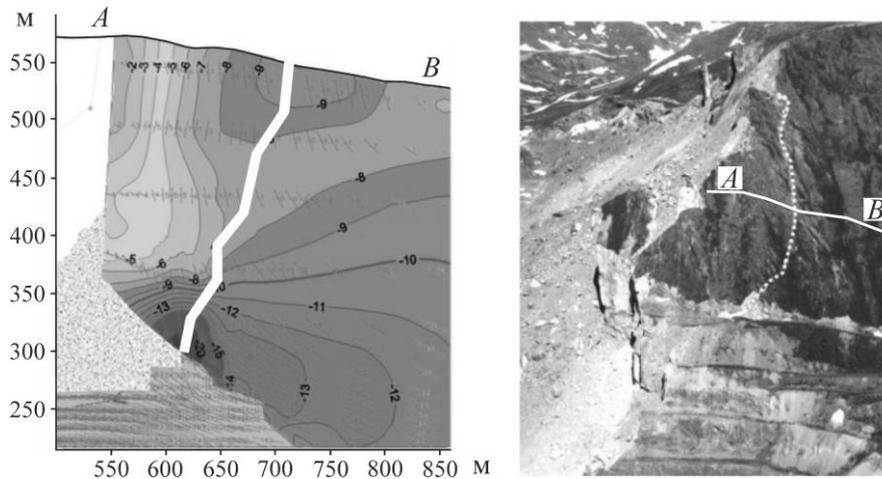


Рис. 9. Прогноз обрушения подработанных пород до поверхности на Кукисвумчоррском месторождении АО «Апатит»

Важным является также выполнение горно-подготовительных работ вне высоконапряженных участков за счет опережения их проходки на величину распространения зон концентраций, вызываемых очистными работами с последующим предварительным бурением строчки скважин для разгрузки приконтурного массива до подхода границ очистного пространства.

Повышение качества, оперативности и полноты информации о геомеханической ситуации осуществляется путем концентрации технических средств контроля и мероприятий по защите горных выработок от динамических проявлений горного давления в ограниченной, наиболее опасной зоне шахтного поля, примыкающей к всяческому боку рудного тела.

ВЫВОДЫ

Результаты проведенного анализа проявлений горного давления при отработке запасов апатит-нефелиновых месторождений Хибин и численного моделирования напряженно-деформированного состояния на нескольких масштабных уровнях, а также опыта прогноза удароопасности и разработки профилактических мероприятий позволили сформулировать следующее:

- подтверждена гипотеза трансформации типа НДС с глубиной, определены абсолютные высотные отметки от -1000 до -1200 м, ниже которых вертикальные напряжения превалируют над горизонтальными, из чего следует, что все разведанные в настоящее время запасы Хибинской апатитовой дуги будут отрабатываться в условиях тектонического сжатия;
- установлена переориентировка главных напряжений в блоках массива между радиальными разломами;
- предложена модифицированная схема обеспечения геодинамической безопасности горного предприятия, включающая прогнозные расчеты НДС, выделение зон сейсмической активности и их интеграцию в геоинформационную систему при планировании безопасного порядка выемки запасов, разработке противоударных мероприятий и определении параметров крепления выработок;

- реализована технология ведения горных работ с созданием опережающих разгрузочных зон висячем боку рудной залежи, что позволило в 2 раза снизить уровень максимальных сжимающих напряжений в области активного ведения горных работ;
- сформировано представление о стадийности процесса обрушения пород висячего бока до дневной поверхности в условиях действия тектонических сил, развивающегося одновременно у границ заделки подработанных пород и вблизи дневной поверхности с последующим слиянием трещин отрыва и формированием магистрального разрыва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козырев А. А., Панин В. И., Свинин В. С. Геодинамическая безопасность при разработке рудных месторождений в высоконапряженных массивах // Горн. журн. — 2010. — № 9. — С. 40–43.
2. Сашурин А. Д., Панжин А. А. Актуальные проблемы геомеханического обеспечения эффективного и безопасного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России // ГИАБ. — 2015. — № S30. — С. 62–70.
3. Курленя М. В., Серяков В. М., Еременко А. А. Техногенные геомеханические поля напряжений. — Новосибирск: Наука, 2005. — 264 с.
4. 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.
5. Адушкин В. В., Турунтаев С. Б. Техногенные процессы в земной коре. — М.: ИНЭК, 2005. — 252 с.
6. Hudyma M., Brown L., and Cortolezzis D. Seismic risk in Canadian mines, CIM MEMO, 2016. — 14 p.
7. Lasocki S., Orlecka-Sikora B., Mutke G., Pytel W., and Rudzinski L. A catastrophic event in Rudna copper-ore mine in Poland on 29 November, 2016: what, how and why. In: Proc. 9th Int. Symp. on Rockbursts and Seismicity in Mines — RaSiM9, November 15–17, Santiago, Chile (Vallejos J. A., ed.), Editec S. A., Santiago, Chile. — P. 316–324.
8. Van Aswegen G. Seismic Sources and Rock Burst Damage in South Africa and Chile, In: Proc. 9th Int. Symp. on Rockbursts and Seismicity in Mines — RaSiM9, November 15–17, Santiago, Chile (Vallejos J. A., ed.), Editec S. A., Santiago, Chile. — P. 72–86.
9. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Лескова Е. В., Шевкунова Е. В., Подкорытова В. Г. Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса (Бачатское землетрясение 18 июня 2013 г.) // ФТПРПИ. — 2014. — № 2. — С. 41–46.
10. Соболев Г. А. Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. — М.: ИФЗ РАН, 2011. — 56 с.
11. Соболев Г. А. Методология, результаты и проблемы прогноза землетрясений // Вестн. РАН. — 2015. — Т. 85. — № 3. — С. 203–208.
12. Соболев Г. А. Сейсмический шум. — М.: Наука и образование, 2014. — 272 с.
13. Марков Г. А. Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. — М.: Наука, 1977. — 213 с.
14. Козырев А. А., Панин В. И., Семенова И. Э., Федотова Ю. В., Рыбин В. В. Геомеханическое обеспечение технических решений при ведении горных работ в высоконапряженных массивах // ФТПРПИ. — 2012. — № 2. — С. 46–55.
15. Семенова И. Э. Исследование трансформации напряженно-деформированного состояния Хибинской апатитовой дуги в процессе крупномасштабной выемки полезных ископаемых // ГИАБ. — 2016. — № 4. — С. 300–313.
16. Козырев А. А., Каган М. М., Жиров Д. В., Константинов К. Н. Деформационные предвестники техногенного землетрясения на Объединенном Кировском руднике ОАО “Апатит” // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. — 2011. — Т. 2. — С. 228–234.
17. Корчак П. А., Жукова С. А., Меньшиков П. Ю. Становление и развитие системы мониторинга сейсмических процессов в зоне производственной деятельности АО “Апатит” // Горн. журн. — 2014. — № 10. — С. 42–46.

Поступила в редакцию 19/VI 2018