ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Опыт уточнения критической глубины удароопасности на рудном месторождении при переходе на подземный способ разработки

В.Ю.Синегубов[1], **М.Г.Попов**[2]✉, **М.А.Вильнер**[1], **А.И.Тхориков**[2]
[1] *ООО «Геотехническое бюро», Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*

Как цитировать эту статью: Синегубов В.Ю., Попов М.Г., Вильнер М.А., Тхориков А.И. Опыт уточнения критической глубины удароопасности на рудном месторождении при переходе на подземный способ разработки // Записки Горного института. 2026. Т. 279. С. 25-38. EDN WHRWJS

Аннотация
Статья посвящена проблеме уточнения критической глубины удароопасности для Ньоркпахкского месторождения апатит-нефелиновых руд в контексте перехода на подземный способ разработки. Актуальность исследования обусловлена несоответствием значения 400 м (согласно нормативной документации) реальным горно-геологическим условиям, особенно с учетом значительного влияния существующего карьера на напряженно-деформированное состояние массива и природных факторов региона. Целью исследования является разработка и апробация комплексной методики оценки критической глубины удароопасности, включающей анализ дискования керна, мониторинг сейсмичности, пространственное численное моделирование напряженно-деформированного состояния в программном комплексе CAE Simulia Abaqus, оценку потенциала удароопасности пород по критерию Кайзера и сопоставление с геомеханически подобным месторождением-аналогом Олений ручей. Анализ дискования керна выявил лишь локальные зоны напряжений, приуроченные к тектоническим нарушениям, без признаков региональной удароопасности до отметки +100 м. Результаты численного моделирования подтвердили отсутствие опасных концентраций напряжений до глубин +35 м как до начала, так и после завершения отработки карьера. Сопоставление методом подобия показало ожидаемое проявление удароопасности ниже отметки +50 м. Исследования согласно разработанной и подробно описанной в статье методике позволили научно обосновать возможность изменения в сторону увеличения критической глубины удароопасности относительно нормативного значения до отметки +100 м. Также определено, что для хибинских месторождений отсутствует прямая корреляция между критерием хрупкости и склонностью пород к удароопасности. Предложенная методика рекомендована для апробации на удароопасных месторождениях со сложными горно-геологическими условиями.

Ключевые слова
напряженно-деформированное состояние; глубина удароопасности; проявления горного давления; дискование керна; численное моделирование; критерий Кайзера; хрупкость пород

Финансирование
Отсутствует.

Поступила: 07.10.2025 ***Принята: 04.03.2026*** ***Онлайн: 13.05.2026*** ***Опубликована: 20.07.2026***

Введение

Проблема удароопасности горных массивов представляет собой одну из наиболее значительных угроз безопасности при подземной разработке месторождений полезных ископаемых. На определенных глубинах возникают динамические проявления горного давления – горные удары, сопровождающиеся внезапными интенсивными разрушениями породного массива и элементов разработки. Эти явления не только существенно осложняют ведение горных работ, но и создают прямую опасность для жизни работников. Склонность массива пород к горным ударам является сложной функцией множества взаимосвязанных факторов. Ключевым из них представляется естественное напряженное состояние массива [1], формируемое гравитационными силами и тектоническими процессами, которое

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

может достигать уровней, близких к пределу прочности пород на сжатие или превышающих его. Существенное влияние оказывают упругие и прочностные свойства пород и руд (модуль упругости, прочность на сжатие и растяжение), параметры трещиноватости массива (интенсивность, ориентация, протяженность трещин), а также характеристики крупных тектонических нарушений (разломов, даек) и их пространственное положение относительно горных выработок.

Помимо геомеханических условий, на удароопасность массива значительное влияние оказывают технологические факторы, определяемые системой разработки и технологией ведения горных работ:

- параметры залегания и свойства рудного тела – мощность, угол падения, направление простирания;
- свойства вмещающих пород;
- конструктивные решения системы разработки;
- геологические особенности – наличие, тип тектонических нарушений и зоны их влияния [2], границы между литотипами пород;
- степень изрезанности участка массива горными выработками, условия подработки или надработки;
- взаимовлияние смежных участков – ведение работ под охранными целиками; отработка встречными забоями [3].

На Ньоркпахкском месторождении, являющемся частью хибинских месторождений апатит-нефелиновых руд, проблема удароопасности стоит особенно остро [4]. Согласно действующим Федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности[1], данное месторождение классифицируется как удароопасное с глубины 400 м для основных типов пород и руд (ийолит-уртиты, бедные и богатые руды). Это обусловлено свойствами вмещающего массива – породы относятся к категории крепких, обладают высокой хрупкостью и ярко выраженной склонностью к хрупкому разрушению при достижении предела прочности [5, 6].

Нормативное значение критической глубины установлено для условного нетронутого массива, в реальности же напряженно-деформированное состояние (НДС) массива в зоне ведения горных работ претерпевает значительные изменения под влиянием горно-геологических и техногенных факторов [7, 8]. Наиболее существенным из них для Ньоркпахкского месторождения является влияние карьера на завершающей стадии отработки, формирующего зоны перераспределения напряжений и разгрузки, распространяющиеся на значительную глубину [9]. Критически важные для оценки удароопасности фактические физико-механические свойства пород, и особенно их хрупкость, определяющая механизм разрушения и предел прочности [10], могут изменяться с увеличением глубины залегания вследствие роста всестороннего сжатия. Наиболее неблагоприятным и опасным сценарием является сочетание пород с высокими хрупкими свойствами и действующих в массиве повышенных напряжений.

Для обеспечения безопасной и эффективной подземной разработки Ньоркпахкского месторождения актуальной задачей является достоверный прогноз напряженно-деформированного состояния массива, и, в частности, научно обоснованное уточнение критической глубины удароопасности с учетом фактической обстановки [11]. Решение этой задачи требует перехода от нормативных усредненных оценок к учету специфики месторождения и сложившейся горно-технической обстановки, чего можно достичь только применением комплексного подхода. В исследовании предлагается и обосновывается такой подход, базирующийся на интегрированном применении комплекса методов. Целью внедрения подхода является определение фактических отметок, начиная с которых Ньоркпахкское месторождение следует относить к категории склонных или опасных по горным ударам, что является фундаментальной основой для разработки эффективных мер по управлению горным давлением и обеспечению промышленной безопасности при подземной отработке.

[1] Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.12.2020 № 505 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности “Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых”» (ФНиП № 505).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Материалы и методы

Краткая геологическая характеристика Ньоркпахкского месторождения. В структурно-тектоническом отношении Ньоркпахкское месторождение расположено в линзовидном блоке, ограниченном с востока и юго-востока зоной тектонического контакта массива с вмещающими породами пояса Имандра-Варзуга, с юга – зоной нарушений, выраженных долиной р. Вуоннемйок, с севера и северо-запада – нарушениями, выраженными в рельефе долиной и притоками р. Тульйок.

По данным геологоразведочных работ, многоярусная рудная зона Ньоркпахкского месторождения состоит из трех залежей брекчированных апатит-нефелиновых руд. Массив пород Ньоркпахкского месторождения характеризуется сложным структурно-тектоническим строением и интенсивной степенью трещиноватости. Все породы массива пересекаются разнообразными по составу дайками лампрофиров (тингуаиты, мончикиты, шонкиниты и др.). Все эти факторы в совокупности формируют сложную структуру трещиноватости с разнообразными взаимоотношениями систем и подсистем. Масштаб элементов трещиноватости охватывает не менее пяти рангов – от нитевидных, волосяных до нарушений, размеры которых соизмеримы с высотой борта карьера или превышают ее [12].

Все типы пород и руд, слагающих месторождение, относятся к категории крепких. Для них характерны высокие показатели хрупкости и выраженная склонность к хрупкому разрушению при достижении предела прочности. Такие прочностные и деформационные свойства являются ключевым геомеханическим признаком, позволяющим отнести массив Ньоркпахкского месторождения к склонным к проявлению горных ударов.

Напряженное состояние геологической среды в районе месторождения имеет тектоническую природу и характеризуется преобладанием горизонтальных компонент напряжений над вертикальными, что обусловлено действием региональных тектонических сил. Дополнительным фактором риска является формирование локальных зон концентрации напряжений вблизи крупных тектонических нарушений.

Анализ методов оценки склонности месторождений к горным ударам. Прогноз удароопасности в соответствии с действующей нормативной документацией основывается на оценке напряженного состояния, характерных форм проявления хрупкого разрушения пород в горных выработках геомеханическими и геофизическими методами.

В ФНиП № 505 представлен список месторождений, а также пород и руд, склонных к хрупкому разрушению, указана глубина, начиная с которой при производстве горных работ возникают горные удары или установлена категория «Опасно». Породы и руды данных месторождений представлены в основном интрузивными и эффузивными прочными скальными породами, кварцевыми жилами, реже осадочными породами.

В соответствии с нормативными требованиями, разработанными в том числе ВНИМИ[2], для оценки склонности месторождения к горным ударам проводится комплексное исследование природных и техногенных факторов, которые управляют состоянием горного массива и параметрами геологической среды [13, 14].

Региональный прогноз может осуществляться с учетом данных геодинамического районирования различными методами [15-17], сведенными в таблице. В процессе проведения исследований специалисты нередко сталкиваются с определенными ограничениями. Это касается как технических возможностей испытательного оборудования, временных рамок исследований, так и количества доступных образцов горных пород. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка методов, позволяющих быстро и эффективно оценивать склонность пород к горным ударам. Существенный вклад в развитие методов оценки удароопасности пород внес канадский ученый П.Кайзер [18, 19], предложив критерий, учитывающий при комплексной оценке два основопола-

[2] Инструкция по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений, склонных и опасных по горным ударам. РД 06-329-99. Серия 06. Вып. 1. М.: Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2003. 88 с.

Методические рекомендации по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам. Серия 06. Вып. 8. М.: Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности, 2016. 52 с.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

гающих параметра – прочностные характеристики при сжатии и коэффициент хрупкости материала. Важным преимуществом этого подхода является то, что для его применения достаточно использовать стандартное лабораторное оборудование и общепринятые методики испытаний.

Сравнительный анализ методов оценки удароопасности горных массивов

Метод оценки	Краткое описание	Преимущества	Ограничения
Нормативная оценка	Использование утвержденных перечней удароопасных месторождений и критических глубин на основе типизации пород	Стандартизация подхода, простота применения для типовых условий	Не учитывает локальную специфику массива, техногенные факторы и динамику изменения НДС
Метод дискования керна	Оценка интенсивности раскалывания керна как индикация напряженного состояния и хрупкости пород	Возможность применения на стадии геологоразведки, интегральная оценка напряженности массива	Качественный характер оценки, зависимость от условий отбора и транспортировки керна, субъективность интерпретации
Инструментальный мониторинг	Системы непрерывного контроля деформаций, действующих напряжений, акустической эмиссии	Прямое измерение параметров в реальном времени, возможность оперативного реагирования, долгосрочный прогноз	Высокая стоимость оборудования, сложность установки, необходимость фильтрации помех
Геофизические методы	Диагностика зон концентрации напряжений и неоднородностей геофизическими методами	Неразрушающий контроль, возможность масштабных исследований, интегральная оценка свойств массива	Необходимость применения специальной аппаратуры, сложность интерпретации
Аналитические расчеты	Построение прогнозных карт НДС и удароопасности с учетом блочного строения массива на основании расчетов и моделирования	Гибкость прогноза при вариации планируемых условий и порядка отработки	Зависимость от достоверности исходных данных, упрощение реальной геометрии, высокая погрешность при сложной тектонике
Геодинамический полигон	Комплексные натурные исследования на специализированных площадках с использованием совокупности методов	Максимальная репрезентативность, учет взаимовлияния факторов, верификация других методов	Экстремально высокая стоимость, длительность наблюдений, ограниченность зоны охвата, сложность организации
Критерий Кайзера	Оценка потенциала удароопасности через прочность на сжатие и коэффициент хрупкости; порода считается удароопасной, если при 80 % от разрушающей нагрузки ≥ 70 % деформаций – упругие	Оперативность, использование стандартных испытаний, количественный результат	Не учитываются структурные особенности массива, экстраполяция свойств образцов на масштаб блока, ограниченность применения для анизотропных пород

Практическая апробация критерия Кайзера была успешно проведена при исследовании андезитов Новоширокинского полиметаллического месторождения и месторождений Норильского промышленного района [20, 21]. По результатам исследований весь массив образцов был дифференцирован на две категории – потенциально удароопасные породы и породы, не склонные к горным ударам. Поскольку критерий Кайзера продемонстрировал высокую эффективность, было решено применить этот метод для анализа удароопасности горных пород на апатит-нефелиновых месторождениях, находящихся в пределах Хибинского массива.

Часто встречающимся лабораторным критерием удароопасности является анализ поведения стандартных образцов под нагрузкой. Оценка склонности породы к горным ударам производится следующим образом: если при нагрузке, составляющей 80 % от разрушающей, упругие деформации достигают 70 % от суммарных деформаций, порода признается удароопасной [22]. Поскольку допредельные и запредельные необратимые деформации обусловлены развитием трещин, а между характеристиками этих стадий существует корреляция, логично предположить взаимосвязь между поведением горной породы на начальном этапе нагрузки и при достижении пиковых значений. Это дает возможность оценивать удароопасность пород по экспериментальным кривым даже без достижения предела их прочности [23].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Сводный анализ методов, представленных в таблице, позволил выявить общие преимущества и ограничения:

• нормативные методы обеспечивают стандартизацию, но могут не учитывать специфику конкретного месторождения и техногенное влияние;

• геофизические методы и инструментальный мониторинг дают ценную информацию о действующих напряжениях, но требуют сложной аппаратуры и методик интерпретации;

• лабораторные методы, в том числе дискование керна, критерий Кайзера, анализ деформаций относительно оперативны, но экстраполяция свойств образцов на массив ограничена репрезентативностью образцов и невозможностью учета техногенных воздействий;

• расчетные методы и моделирование гибки, но их точность зависит от достоверности исходных данных и адекватности моделей.

Таким образом, ни один из представленных методов самостоятельно не способен обеспечить всестороннюю и достоверную оценку удароопасности месторождений со сложной структурой, подобных Ньоркпахкскому. Ограниченность каждого подхода показывает необходимость их комплексного применения – только это позволяет нивелировать недостатки отдельных методов, использовать их преимущества и получить научно обоснованный прогноз удароопасности с учетом совокупности природных и техногенных факторов.

Результаты оценки критической глубины удароопасности Ньоркпахкского месторождения комплексом методов. В исследовании выполнены анализ критической глубины всеми рассмотренными методами и сопоставление полученных значений.

Анализ нормативных требований. Действующие нормативные требования в области промышленной безопасности **(**ФНиП № 505**)** устанавливают обязательное определение критической глубины удароопасности для всех разведываемых и эксплуатируемых месторождений, проектируемых и действующих горных предприятий. Данный параметр является ключевым фактором при выборе технологии отработки месторождения.

Критическая глубина удароопасности определяется как глубина от поверхности земли, начиная с которой при производстве горных работ возникают горные удары или установлена категория «Опасно», что соответствует напряженному состоянию массива в приконтурной части выработки, при котором может произойти горный удар [24].

Согласно ФНиП № 505, Ньоркпахкское месторождение относится к склонным и опасным по горным ударам с глубины 400 м для следующих литотипов: ийолит-уртиты, бедные и богатые апатит-нефелиновые руды.

Корпоративный регламент Кировского филиала АО «Апатит»[3], актуализированный в 2021 г., подтверждает значение критической глубины для месторождений, отрабатываемых открытым способом (включая Ньоркпахкское), – Коашвинское 400 м, Ньоркпахкское 400 м. Это соответствие обосновано отсутствием достаточного объема натурных данных для корректировки глубины.

Оценка методом дискования керна. Для первичной оценки склонности массива к горным ударам использован базовый метод дискования керна [23]. Участки дискования выбираются согласно следующим требованиям: длина участка дискования – не менее 25 см (при диаметре скважины 46-50 мм); толщина учитываемых дисков – не более половины диаметра керна.

Исследование кернового материала тринадцати геологоразведочных скважин Ньоркпахкского месторождения позволило идентифицировать зоны дискования и оценить уровень напряженности на рассматриваемых глубинах. Наличие участков дискования подтверждает действие тектонических напряжений в массиве, что коррелирует с данными инструментальных измерений методом разгрузки. Процесс разрушения керна может интенсифицироваться при изменении трещиноватости пород или параметров бурения.

[3] Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Апатит-нефелиновые месторождения, разрабатываемые КФ АО «Апатит» подземным способом: Кукисвумчоррское, Юкспорское, Апатитовый цирк, Плато Расвумчорр). Кировск, 2021. 96 с.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

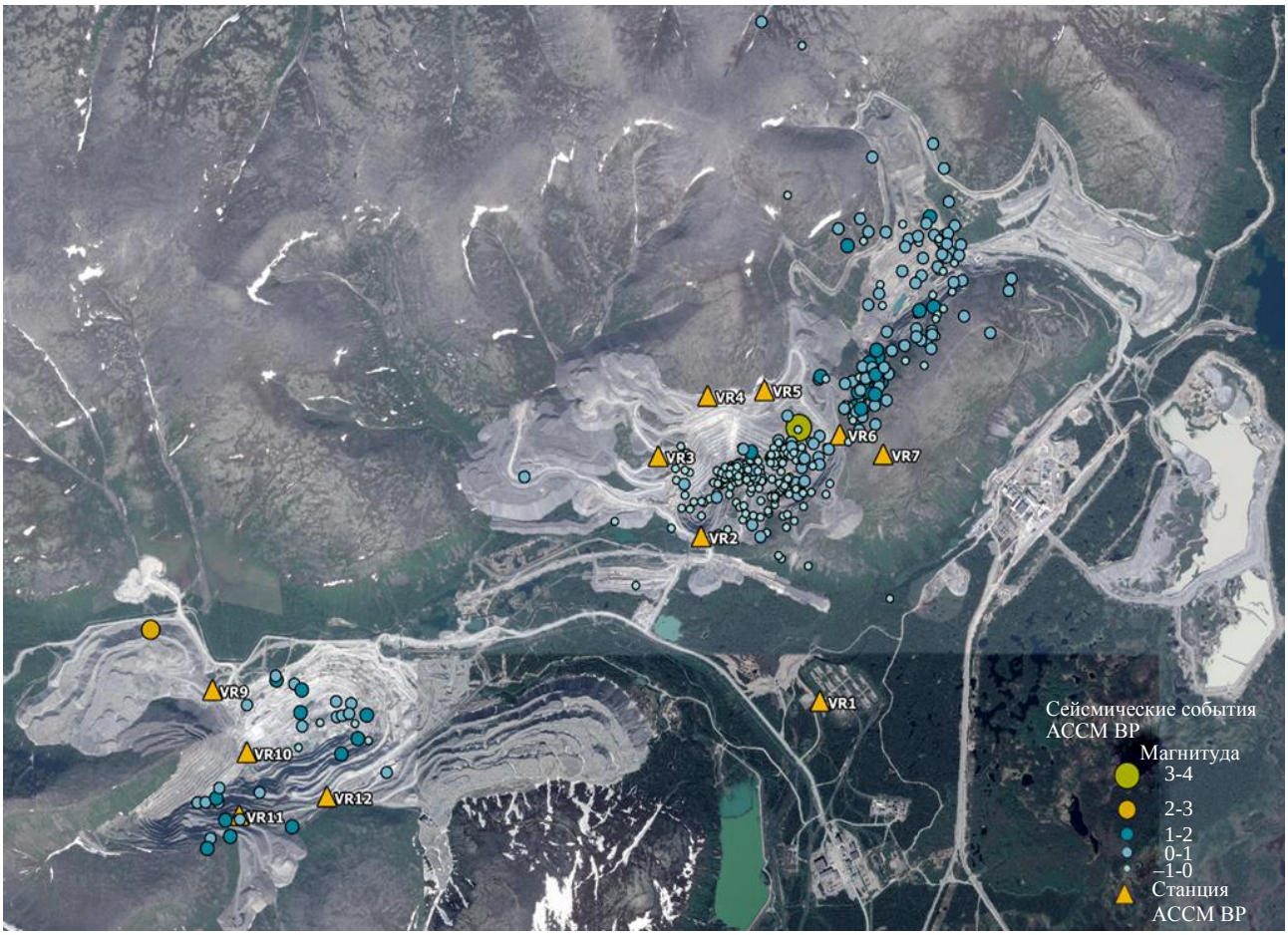


Рис.1. Результаты регистрации сейсмических событий промышленной площадки за 2022 г.

Анализ фотодокументации и образцов выявил, что дискование носит локальный характер, проявляясь на ограниченных глубинах и коротких интервалах скважин (менее 0,25 м), что может говорить о наличии зон тектонических нарушений, контактов литотипов, а также о пересечении скважиной напластований пород под острыми углами. Зоны дискования представлены преимущественно 5-8 фрагментами и не определяют зоны максимума горизонтальных напряжений. Пространственная визуализация интервалов дискования в модели с каркасом тектонических нарушений подтвердила их приуроченность к локальным структурным элементам.

Наблюдаемое дискование керна обусловлено локализацией геомеханических процессов в зонах влияния тектонических нарушений, что может объясняться двумя взаимодополняющими механизмами:

- концентрацией напряжений в приразломных областях при перераспределении тектонических нагрузок;
- снижением прочностных характеристик непосредственно в нарушении вследствие дезинтеграции пород и развития вторичной минерализации.

Анализ пространственного распределения интервалов дискования позволяет сделать следующий вывод: в пределах планируемых горизонтов отработки (до отметки +100 м) массив пород не проявляет признаков региональной удароопасности; локальные участки дискования не являются основанием для присвоения категории удароопасности. Необходимо отметить, что все скважины были пробурены до отметки +100 м, поэтому ниже удароопасность этим способом не исследовалась.

Мониторинг сейсмической активности. Мониторинг сейсмичности массива на карьерах Ньоркпахк и Коашва осуществляется автоматизированной системой сейсмического мониторинга Восточного рудника (АССМ ВР), развернутой совместно с Кольским филиалом Единой геофизической службы Российской академии наук (рис.1). Конфигурация сети мониторинга позволяет обеспечить точность определения координат в зоне промышленной площадки Восточного рудника не менее 50 м.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

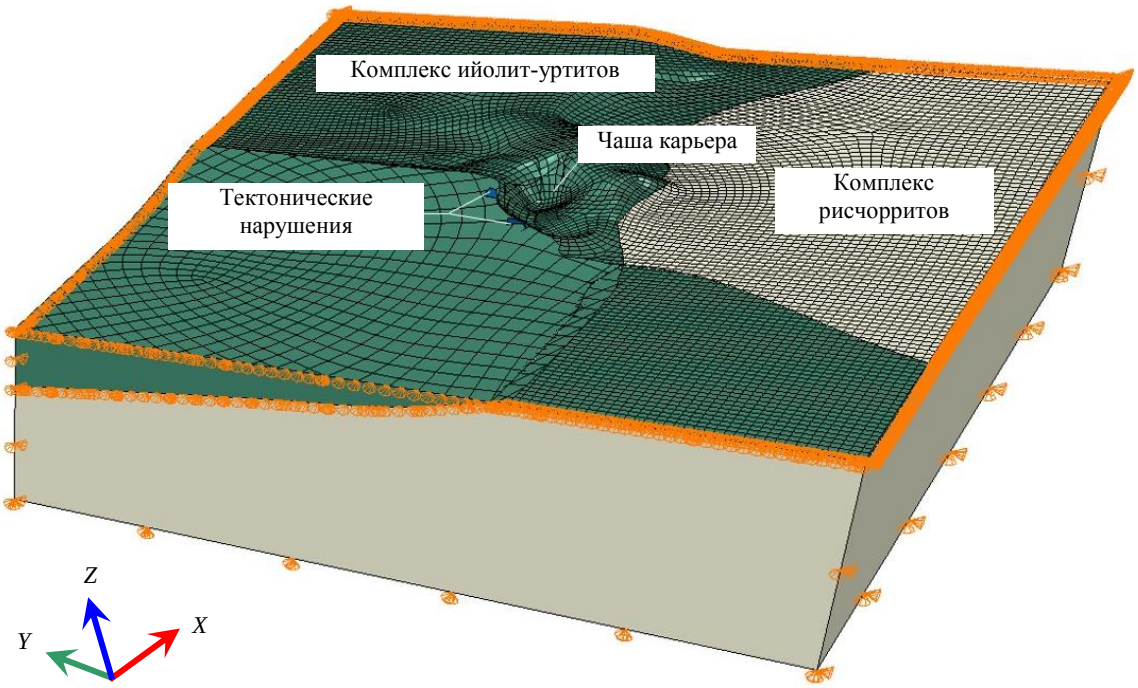


Рис.2. Общий вид модели

Сейсмический режим Ньоркпахкского месторождения определяется совокупностью природных и техногенных геодинамических процессов – поднятием Хибинского массива, увеличением водонасыщения массива в периоды снеготаяния и дождей, активизацией смещений по тектоническим нарушениям при критическом снижении эффективных напряжений [25, 26], динамическим воздействием массовых взрывов при добыче и проходке, перераспределением напряжений от отработки, трещинообразованием в налегающей толще пород при подземной разработке.

Согласно карте общего сейсмического районирования территории РФ (ОСР-97В), фоновая сейсмичность рудного поля месторождения оценивается в 6 баллов по шкале MSK-64. Данная оценка учитывает региональные сейсмогенные характеристики без поправки на текущие горно-технические воздействия [27].

Результаты численного моделирования. Напряженно-деформированное состояние массива исследовано для отметки +125 м с учетом влияния карьера на перераспределение напряжений в прибортовой зоне. Моделирование выполнено в программном комплексе CAE Simulia Abaqus для двух сценариев – до начала ведения горных работ и для проектного контура карьера (рис.2).

Геометрические размеры модели составили 12000 × 10000 × 3500 м, ее грани закреплены от перемещений в направлении перпендикулярных к ним осей. К объему модели приложено поле напряжений, параметры поля подобраны так, чтобы напряжения в расчетной части модели совпадали с данными натурных измерений на карьере и в подземных горных выработках на месторождениях-аналогах.

Тектонические нарушения задавались в виде тел, мощность которых соответствует фактической мощности зон нарушения. Прочностные параметры материала этих тел назначались в соответствии с генетическим типом нарушения. В рамках данной модели разломы интерпретировались как зоны интенсивной дезинтеграции горного массива, в связи с чем их прочностные характеристики были заданы со снижением до одного порядка относительно ненарушенного массива.

Модель разбита сеткой конечных элементов тетраэдрической формы; размер элементов в расчетной области в среднем составляет 3 м, на гранях модели достигает 100 м. Учтены ключевые особенности геомеханической среды: гористый рельеф, контакт двух комплексов – рисчорритов и ийолит-уртитов, близкие физико-механические свойства рудных тел и вмещающего массива, минимизирующие градиент напряжений на контакте.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

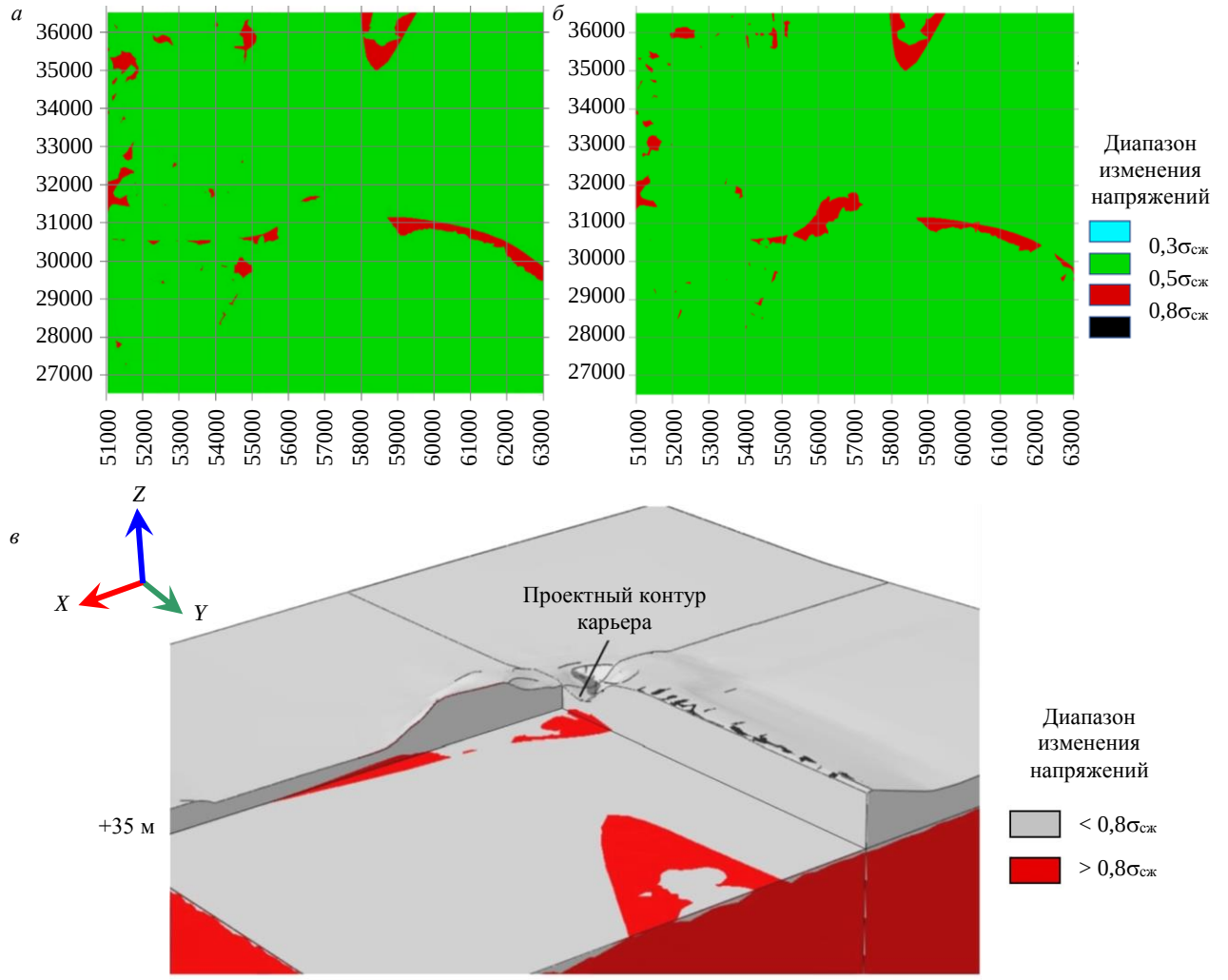


Рис.3. Эпюра распределения максимальных главных напряжений на отметке +100 м до начала (*а*) и после окончания (*б*) ведения открытых горных работ и эпюра распределения напряжений на трехмерной картине (*в*)

Результаты моделирования до начала ведения горных работ (рис.3, *а*) показали средние значения максимальных главных напряжений 35-45 МПа (< $0{,}5\sigma_{сж}$) с локальным максимумом 84 МПа ($0{,}8\sigma_{сж}$) в рисчорритах, обусловленным более высоким модулем упругости; при этом тектонические нарушения имеют лишь локальное влияние. Локальная разгрузка напряжений на краях тектонических нарушений связана с особенностями моделирования и не наблюдается в реальном массиве. Результаты моделирования для проектного контура карьера (рис.3, *б*) показывают незначительные изменения фоновых напряжений в диапазонах $0{,}3\sigma_{сж}$-$0{,}5\sigma_{сж}$-$0{,}8\sigma_{сж}$ без превышения критических значений удароопасности. На рис.3, *в* показаны результаты моделирования с выделенной нижней границей удароопасности на отметке +35 м (выделена красным цветом), запасы месторождения на этой отметке не попадают в удароопасную зону. Моделирование подтверждает неудароопасное состояние массива на отметке +35 м как до начала ведения горных работ, так и после отработки карьера, поскольку критический порог напряжений не был достигнут.

Прочностные характеристики и хрупкость. Одним из способов оценки потенциала горных пород к хрупкому разрушению является оценка удароопасности литотипов по критерию Кайзера [19]. Этот подход позволяет комплексно оценивать вероятность удароопасности различных типов пород с учетом двух важных параметров – прочностных характеристик при сжатии и степени хрупкости материала. Предел прочности породы при сжатии отражает ее способность накапливать энергию упругой деформации до момента разрушения. Коэффициент хрупкости, в свою очередь, демонстрирует потенциал породы к разрушению путем отрыва при механическом воздействии.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

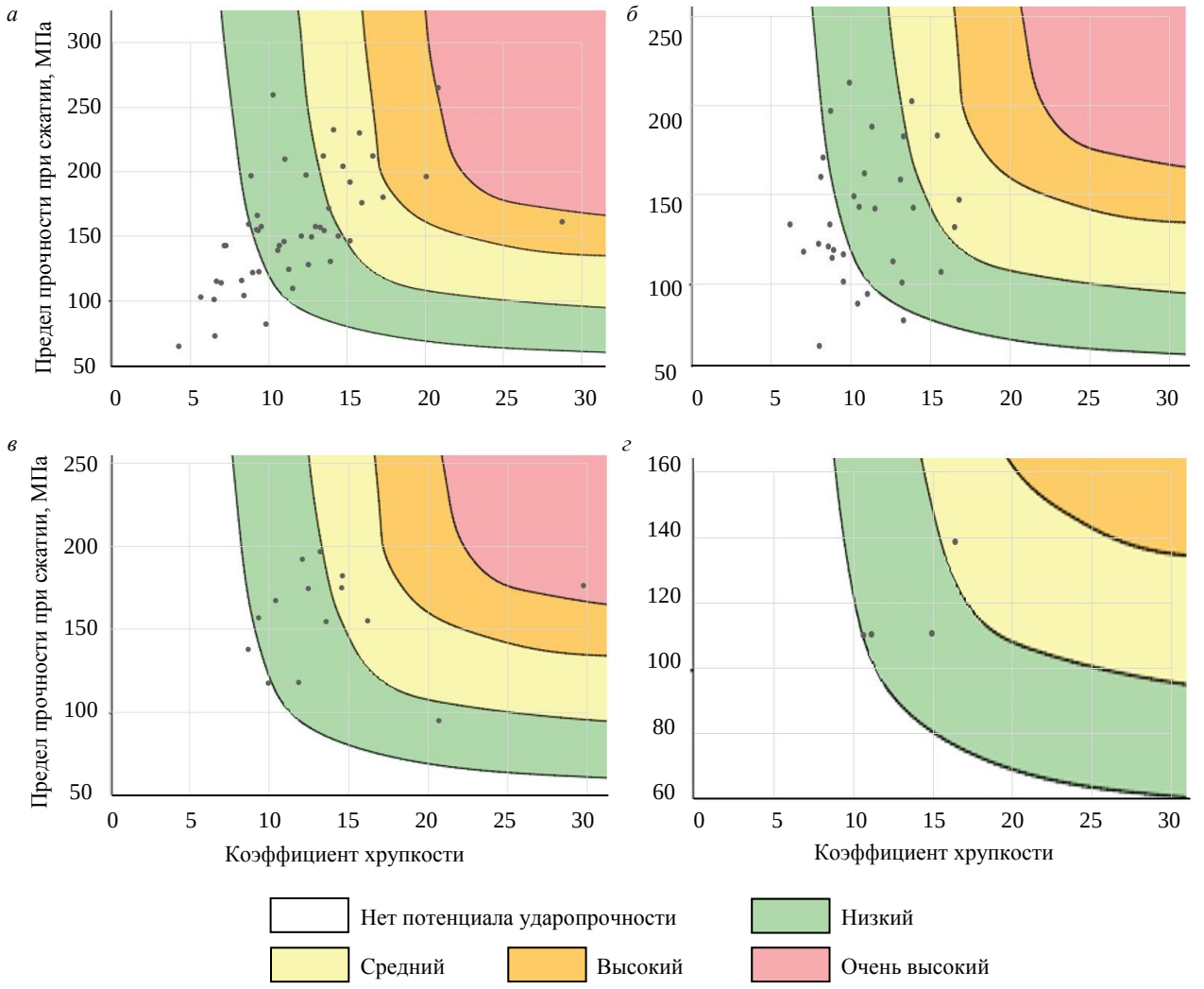


Рис.4. Графики оценки удароопасности пород по критерию Кайзера [19] – уртитов (*а*), ийолитов (*б*), ювитов (*в*), руд (*г*)

Существенным преимуществом данного метода является его практическая реализуемость – для проведения исследований достаточно использовать стандартное испытательное оборудование и общепринятые методики, что значительно ускоряет процесс оценки.

Взаимосвязь между прочностными характеристиками и коэффициентом хрупкости графически представлена на рис.4, где продемонстрированы результаты изучения образцов до глубины 190 м от поверхности. Анализ положения точки на графике позволяет сделать вывод о степени удароопасности породы:

- расположение в зеленой зоне указывает на низкую вероятность внезапного разрушения;
- попадание в красную область свидетельствует о высокой склонности породы к горным ударам.

Анализ физико-механических характеристик горных пород позволил выявить, что уртиты продемонстрировали максимальную прочность при сжатии, превышающую 250 МПа, тогда как минимальные показатели зафиксированы в рудном теле. Максимальный абсолютный показатель коэффициента хрупкости характерен для ювитов, а наибольшее среднее значение зафиксировано в рудах, хотя по опыту месторождения-аналога уртиты более склонны к удароопасности чем ювиты. Это показывает, что прямой корреляции между высокими значениями коэффициента хрупкости и потенциалом удароопасности не существует.

Все породы в основном имеют низкий (или не имеют вовсе) и средний потенциал удароопасности. Однако при разработке нижележащих горизонтов месторождения требуется доизучение и оценка прочностных и хрупких характеристик вмещающих пород и руд для локализации участков с породами, имеющими высокий потенциал удароопасности.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Исследование также определило отсутствие прямой корреляции между коэффициентом хрупкости и склонностью к горным ударам, так высокие значения хрупкости у ювитов не соответствуют их фактическому геомеханическому поведению.

Метод аналогов. Месторождением-аналогом назначается месторождение, сходное по петрографии и генезису, может использоваться для прогноза горно-технических условий неизученного месторождения. Принцип выбора месторождения-аналога – схожесть по региональному геологическому и тектоническому положению, генезису, геологическому строению, типу полезного ископаемого, характеристикам пород, гидрогеологическим и климатическим условиям. Принципы подобия геомеханических процессов, происходящих в горных породах при их нагружении, описаны Ю.Н.Огородниковым [1] и основываются на принципах статистического подобия. Для подобных процессов и явлений должны быть одинаковыми определяющие критерии и подобны условия однозначности. Условия однозначности позволяют исключить объекты, в которых деформационные процессы в силу различных причин развиваются по иным закономерностям. К условиям однозначности можно отнести способы разрушения породы, методы опробования массива, временные параметры процесса нагружения.

Критерии геометрического подобия определяются равенством отношений характерных размеров выработок и иных геомеханических объектов. Критерии подобия состояния массива для скальных пород представляют собой соотношение параметров, определяющих поведение системы в зависимости от характера деформирования: отношение предела прочности на сжатие к пределу прочности на растяжение $\sigma_{сж}/\sigma_р$; отношение вертикальных напряжений в массиве к пределу прочности на растяжение $\sigma_z/\sigma_р$; отношение предела прочности на сжатие к сцеплению $\sigma_{сж}/с$.

Наибольшее количество совпадающих с Ньоркпахкским месторождением факторов наблюдается у месторождения Олений ручей – оно является ближайшим к Ньоркпахкскому месторождению, и выработки на данном месторождении достигли уже отметки –140 м. Согласно ФНиП № 505, месторождение Олений ручей является удароопасным с глубины 400 м.

На данном месторождении также наблюдается превышение горизонтальной компонентой вертикальных в связи с действием тектонических напряжений. Авторы статьи и другие исследователи проводили натурные измерения напряженного состояния [28, 29] методом разгрузки в торцевом варианте в тупиковых выработках, которые показали, что скорость роста горизонтальных напряжений с глубиной затухает и носит экспоненциальный характер [1]. Предполагается, что такая же зависимость характерна для Ньоркпахкского месторождения, таким образом напряжения на нижележащих отметках будут ниже, чем прогнозируемые на настоящем этапе.

В рамках сопоставления Ньоркпахкского месторождения с месторождением-аналогом можно заключить, что ввиду их полного подобия можно назначить отметки критической глубины по удароопасности Ньоркпахкского месторождения по результатам натурных исследований с отметки +50 м и ниже. Однако на отметках выше +50 м могут формироваться условия для возникновения признаков проявления горного давления в динамической форме (в первую очередь в виде шелушений), как это проявлялось на месторождении-аналоге, что требует особых подходов к проходке горных выработок и выбору порядка и параметров отработки.

Разработка комплексной методики для уточнения критической глубины удароопасности. Методика разработана для решения проблемы несоответствия нормативных значений критической глубины удароопасности реальным горно-геологическим и техногенным условиям месторождений. Методика интегрирует три взаимосвязанных блока исследований (рис.5), представляя собой последовательный процесс от теоретического анализа к практическому внедрению и верификации.

Первый блок методики включает комплексный анализ инженерно-геологических и геомеханических условий и является фундаментальной стадией исследования. Блок объединяет анализ исторических данных, мировой опыт и анализ нормативных документов, что позволяет избежать методологических ошибок, связанных с применением устаревших или неподходящих для конкретных условий критериев. Проводится детальная оценка инженерно-геологических условий с акцентом на количественной характеристике структурной нарушенности массива (расположение разломов, морфология нарушений, мощность тектонических зон) и литолого-стратиграфической неоднородности.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0



Рис.5. Принципиальная последовательность уточнения критической глубины удароопасности с использованием комплексов методов

Анализируются данные месторождений-аналогов, сопоставимых по глубине, геомеханическим и структурным условиям. Целью блока исследований является выявление общих закономерностей и анализ опыта управления удароопасностью.

Второй блок нацелен на получение количественных исходных данных и переход к прогнозному моделированию. Его основное преимущество перед традиционными методами заключается в комплексном использовании натурных данных, лабораторных экспериментов и численном моделировании, что позволяет учесть специфику региона и спрогнозировать изменение НДС при отработке месторождения. В рамках исследований данного блока выполняются натурные и лабораторные испытания керна на прочность, деформационные и реологические характеристики пород; на основе геологической модели создается трехмерная геомеханическая модель. В модели явно задаются тектонические нарушения в виде тел со сниженными прочностными характеристиками, проводится расчет исходного и измененного поля НДС, осуществляется прогноз изменения полей напряжений при изменении горно-технической ситуации (углубление горных работ, отработка новых участков). На основе анализа зон потенциального хрупкого разрушения и динамических смещений по нарушениям производится предварительная оценка критической глубины.

Третий блок представляет собой систему динамического контроля и повышения достоверности прогноза. В рамках исследований для актуализации глубины удароопасности внедряется сеть сейсмоакустических датчиков, обеспечивающая непрерывный мониторинг, что позволяет в режиме реального времени идентифицировать проявления динамических процессов и оценивать их положение в массиве. Кроме того, применяются тектонофизические подходы для реконструкции полей палеонапряжений и анализа кинематики разломов. Это дает физически обоснованный инструмент для прогноза зон концентрации современных напряжений вблизи тектонических нарушений, где традиционные критерии часто не работают.

Комплексная методика предназначена для оценки и управления удароопасностью на глубоких рудниках со сложным строением. Научная значимость заключается в существенном повышении достоверности прогнозов критической глубины за счет интеграции современных методов

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

моделирования, непрерывного мониторинга и сравнительного анализа, что в итоге позволяет оптимизировать параметры системы разработки и повысить промышленную безопасность.

Обсуждение результатов

Разработанная комплексная методика оценки критической глубины удароопасности продемонстрировала применимость и эффективность в условиях Ньоркпахкского месторождения. Ее преимущество заключается в интеграции разноуровневых данных – нормативных требований, фактического соотношения напряжений и прочности пород [1, 30], а также альтернативных подходов (метод аналогов, тектонофизический анализ, автоматизированный мониторинг). Такая комбинация позволила преодолеть ограничения традиционных методов, что соответствует современным тенденциям в геомеханике [18, 19].

Выводы исследования опираются на детальную изученность инженерно-геологических условий Ньоркпахкского месторождения, включая иерархию тектонических нарушений (доминирование нарушений IV ранга субширотного простирания), распределение зон дробления и литолого-структурную неоднородность. Эта база обеспечила репрезентативность моделей, что является критическим фактором для достоверного прогноза удароопасности [31].

Оценка сейсмического режима района Ньоркпахкского месторождения выявила, что региону свойственна фоновая сейсмичность 6 баллов по шкале MSK-64; землетрясения такой интенсивности, согласно описанию шкалы, могут вызвать повреждения в сооружениях из кирпича и панелей и редко – оползни, т.е. повреждений горных выработок не ожидается. С развитием горных работ на территории месторождения прогнозируется умеренное возрастание сейсмической и геодинамической активности, в периоды ведения очистных и проходческих работ вблизи (не более 30 м) тектонических нарушений, сложенных дайковыми телами мощностью более 20 см, и зоны главного разлома. Опасности проявления крупных сейсмических событий (выше 5 баллов по MSK-64), связанных с отработкой месторождения до отметки +100 м, не ожидается, что коррелирует с данными аналогичных месторождений в тектонически активных районах.

Анализ кернового материала по тринадцати скважинам подтвердил локальный характер дискования ($\leq$ 0,25 м) с приуроченностью к зонам нарушений и литологических контактов. Полное отсутствие эффекта дискования керна ниже отметки +125 м свидетельствует об отсутствии критических напряжений.

Установлено, что максимальной компонентой главных напряжений является субгоризонтальная. В настоящее время точных зависимостей изменения напряжений с глубиной не установлено в первую очередь из-за влияния на НДС открытой отработки. Однако все исследования подтверждают зависимость повышения напряжений с глубиной и из-за близости Ньоркпахкского месторождения к месторождению-аналогу Олений ручей, наиболее обоснованно пользоваться его (аналога) зависимостями изменения напряжений по глубине, разработанными и надежно подтвержденными в ходе эксплуатации (визуальные наблюдения, метод дискования керна, разгрузка керна, ретроспективная оценка по зонам разрушения и др.). По мере отработки необходимо уточнять эти зависимости на основании новых данных [32].

По результатам анализа данных о численном моделировании Ньоркпахкского месторождения, проведенного различными организациями, занимающимися проблематикой горных ударов на месторождениях апатит-нефелиновых руд [33-36], и сопоставления с результатами численного моделирования, установлено, что, как до начала ведения горных работ, так и при наличии карьера с контуром на конец отработки запасов открытым способом, до отметки +35 м не ожидается превышения напряжения величин $0{,}8\sigma_{сж}$, что говорит о том, что массив неудароопасен.

Заключение

Результаты исследования показывают, что массив руд и пород Ньоркпахкского месторождения представлен прочными скальными горными породами со средним значением предела прочности на одноосное сжатие около 150 МПа для пород и 117 МПа – для руд при значительных напряжениях, способных к хрупкому разрушению. Но существующее поле напряжений до отметки +125 м даже с учетом влияния карьера не формирует напряжений, достаточных для перехода пород в удароопасное состояние.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Отметки потенциальной удароопасности Ньоркпахкского месторождения по разным методикам: метод дискования керна +100 м (оценка удароопасности выполнена только до отметки +100 м, так как ниже бурение керна не проводилось); метод сопоставления напряжений и прочности массива +50 м; метод численного моделирования +35 м; метод аналогов +50 м.

Критическую глубину удароопасности на месторождении ввиду значительной неровности поверхности, в том числе из-за открытой отработки карьером, однозначно невозможно установить (она колеблется в пределах 350-550 м со средним значением 450 м), но можно обоснованно с достаточным запасом назначить отметку отнесения месторождений к склонным по горным ударам на уровне +100 м и ниже, так как по всем методам оценки удароопасности отметки удароопасности выше +100 м не выявлены. Представленная в статье комплексная методика позволяет определить критическое глубины удароопасности месторождения более достоверно благодаря системному подходу и качественной подготовке инженерных кадров [37].

Для дальнейшего внедрения методика требует апробации на месторождениях с иными геодинамическими условиями и обязательной натурной верификации после начала подземной разработки, включающей сопоставление прогнозных моделей с фактическими проявлениями горного давления, корректировку зависимостей напряжений от глубины по данным инструментальных измерений, оценку репрезентативности критерия Кайзера для глубин более 500 м.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Беляков Н.А., Емельянов И.А.* Развитие подхода к обработке результатов измерений напряженного состояния методом кольцевой разгрузки // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2022. Вып. 2. С. 192-207. DOI: 10.46689/2218-5194-2022-2-1-192-207

2. *Локтюкова О.Ю., Корчак П.А., Павлович А.А., Шабаров А.Н.* Применение комплексной методики прогнозирования тектонических нарушений для обеспечения безопасной разработки месторождений апатит-нефелиновых руд открытым способом // Горный журнал. 2024. № 12. С. 42-50. DOI: 10.17580/gzh.2024.12.05

3. *Шабаров А.Н., Смирнов Э.В.* Методические принципы прогноза опасных природных процессов на основе геодинамического районирования недр // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. № 11-1. С. 157-170. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_157

4. *Козырев А.А., Семенова И.Э., Земцовский А.В.* Прогнозная оценка коэволюции напряженно-деформированного состояния восточной части апатитовой дуги Хибин при выемке полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 4. С. 93-102.

5. *Lai X.P., Shan P.F., Cao J.T. et al.* Simulation of Asymmetric Destabilization of Mine-void Rock Masses Using a Large 3D Physical Model // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2016. Vol. 49. Iss. 2. P. 487-502. DOI: 10.1007/s00603-015-0740-z

6. *Ning Li, Yushi Zou, Shicheng Zhang et al.* Rock brittleness evaluation based on energy dissipation under triaxial compression // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019. Vol. 183. № 106349. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106349

7. *Криницын Р.В.* Напряженно-деформированное состояние массива горных пород при отработке месторождений Урала // Горная промышленность. 2022. № 5. С. 79-82. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-5-79-82

8. *Трушко В.Л., Баева Е.К.* Обоснование рациональных параметров крепи комплекса горных выработок, проводимых в сложных горно-геологических условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 12. С. 55-69. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_55

9. *Протосеня А.Г., Куранов А.Д.* Методика прогнозирования напряженно-деформированного состояния горного массива при комбинированной разработке Коашвинского месторождения // Горный журнал. 2015. № 1. С. 17-20. DOI: 10.17580/gzh.2015.01.03

10. *Ильинов М.Д., Петров Д.Н., Карманский Д.А., Селихов А.А.* Аспекты физического моделирования процессов структурных изменений образцов горных пород при термобарических условиях больших глубин // Горные науки и технологии. 2023. Т. 8. № 4. С. 290-302. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-09-150

11. *Diyuan Li, Zida Liu, Armaghani D.J. et al.* Novel ensemble intelligence methodologies for rockburst assessment in complex and variable environments // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. № 1844. DOI: 10.1038/s41598-022-05594-0

12. *Вербило П.Э., Вильнер М.А.* Изучение анизотропии прочности и масштабного эффекта трещиноватого массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-2. С. 47-59. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_47

13. *Feng-qiang Gong, Yun-liang Wang.* Rockburst proneness criteria for rock materials: Review and new insights // Journal of Central South University. 2020. Vol. 27. Iss. 10. P. 2793-2821. DOI: 10.1007/s11771-020-4511-y

14. *Козырев А.А., Савченко С.Н., Панин В.И. и др.* Геомеханические процессы в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками. Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, 2019. 431 с. DOI: 10.37614/978.5.91137.391.7

15. *Носов В.В., Бадмажапов Б.Б., Чистяков А.Ю.* Оценка удароопасности участка массива горных пород по результатам регистрации сейсмоакустической активности горного массива после взрыва // Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии. Владикавказ: Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, 2022. С. 346-351. DOI: 10.33580/9785904868277_346

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

16. *Peng Xiao, Diyuan Li, Guoyan Zhao, Huanxin Liu.* New criterion for the spalling failure of deep rock engineering based on energy release // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021. Vol. 148. № 104943. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104943

17. *Ghasemi E., Gholizadeh H., Adoko A.C.* Evaluation of rockburst occurrence and intensity in underground structures using decision tree approach // Engineering with Computers. 2020. Vol. 36. Iss. 1. P. 213-225. DOI: 10.1007/s00366-018-00695-9

18. *Кузнецов Н.Н., Кондрашов Л.Ю.* Оценка потенциала удароопасности горных пород месторождений Хибинского массива по критерию Кайзера // Вестник МГТУ. 2023. Т. 26. № 2. С. 170-179. DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-2-170-179

19. *Ming Cai, Kaiser P.K.* Rockburst Support. Reference Book. In 2 volumes. Vol. 1: Rockburst Phenomenon and Support Characteristics. Sudbury: Laurentian University, 2018. 284 p.

20. *Господариков А.П., Зацепин М.А., Киркин А.П.* Определение потенциала удароопасности горных пород Норильского промышленного района // Записки Горного института. 2025. Т. 272. С. 83-90.

21. *Бирючев И.В., Макаров А.Б., Усов А.А.* Геомеханическая модель рудника. Часть 2. Использование // Горный журнал. 2020. № 2. С. 35-44. DOI: 10.17580/gzh.2020.02.04

22. *Malki J., Vennes I., Rowe C.D., Mitri H.S.* Evaluation of Rock Burstability with Mechanical Property Testing and Microscopic Image Analysis // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2025. Vol. 58. Iss. 4. P. 4441-4457. DOI: 10.1007/s00603-024-03797-7

23. *Сабянин Г.В., Алборов А.Э., Андреев А.А., Румянцев А.Е.* Выбор оптимального месторасположения скважины для оценки напряженного состояния геомеханическим методом по дискованию керна // Горный журнал. 2022. № 10. С. 58-63. DOI: 10.17580/gzh.2022.10.09

24. *Askaripour M., Saeidi A., Rouleau A., Mercier-Langevin P.* Rockburst in underground excavations: A review of mechanism, classification, and prediction methods // Underground Space. 2022. Vol. 7. Iss. 4. P. 577-607. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.11.008

25. *Кочарян Г.Г., Золотухин С.Р., Калинин Э.В. и др.* Напряженно-деформированное состояние массива горных пород Коробковского железорудного месторождения на участке зоны тектонических нарушений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 1. С. 16-24. DOI: 10.15372/FTPRPI20180102

26. *Абрашитов А.Ю., Онуприенко В.С., Корчак П.А.* Трехуровневая система сейсмического мониторинга массива горных пород Хибинских месторождений апатит-нефелиновых руд // Горная промышленность. 2023. № S1. С. 36-42. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-S1-36-42

27. *Жукова С.А., Журавлева О.Г., Онуприенко В.С., Стрешнев А.А.* Особенности сейсмического режима массива горных пород при отработке удароопасных месторождений Хибинского массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 7. С. 5-17. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_5

28. *Самсонов А.А.* Оценка состояния массива горных пород удароопасного месторождения «Олений ручей» по результатам измерений напряжений // Вестник Кольского научного центра РАН. 2019. Т. 11. № 1. С. 62-67. DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.1.62-67

29. *Семенова И.Э., Земцовский А.В., Павлов Д.А.* Комплексные геомеханические исследования массива горных пород удароопасного месторождения «Олений Ручей» при ведении подземных горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 4. С. 46-55.

30. *Afraei S., Shahriar K., Madani S.H.* Statistical assessment of rock burst potential and contributions of considered predictor variables in the task // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018. Vol. 72. P. 250-271. DOI: 10.1016/j.tust.2017.10.009

31. *Синегубов В.Ю.* Разработка комплексного подхода к прогнозу напряженного состояния породного массива и апробация на месторождении Олений ручей // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 2 (168). С. 68-79. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-68-79

32. *Chen Xu, Xiaoli Liu, Enzhi Wang et al.* Rockburst prediction and classification based on the ideal-point method of information theory // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018. Vol. 81. P. 382-390. DOI: 10.1016/j.tust.2018.07.014

33. *Jinglin Wen, Husheng Li, Fuxing Jiang et al.* Rock burst risk evaluation based on equivalent surrounding rock strength // International Journal of Mining Science and Technology. 2019. Vol. 29. Iss. 4. P. 571-576. DOI: 10.1016/j.ijmst.2019.06.005

34. *Hoek E., Brown E.T.* The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11. Iss. 3. P. 445-463. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.08.001

35. *Синегубов В.Ю., Попов М.Г., Вильнер М.А., Сотников Р.О.* Оценка влияния очистных работ на формирование нарушенных зон в массиве на контурах выработок большого сечения при освоении месторождений апатит-нефелиновых руд // Горный журнал. 2021. № 8. С. 24-30. DOI: 10.17580/gzh.2021.08.04

36. *Sedrette S., Rebai N.* A GIS Approach Using Morphometric Data Analysis for the Identification of Subsurface Recent Tectonic Activity. Case Study in Quaternary Outcrops – North West of Tunisia // Journal of Geographic Information System. 2022. Vol. 14. № 1. P. 94-112. DOI: 10.4236/jgis.2022.141006

37. *Litvinenko V.S.* A model of mining engineering education for the 21st century // Sustainable Development of Mountain Territories. 2025. Vol. 17. № 2 (64). P. 603-615. DOI 10.21177/1998-4502-2025-17-2-603-615

***Авторы*: Вячеслав Юрьевич Синегубов,** *канд. техн. наук, заместитель генерального директора* (*ООО «Геотехническое бюро», Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0009-0003-9043-7862*, **Михаил Григорьевич Попов,** *канд. техн. наук, доцент* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *popov_mg@pers.spmi.ru, https://orcid.org/0000-0002-4603-5757*, **Мария Александровна Вильнер,** *канд. техн. наук, главный специалист* (*ООО «Геотехническое бюро», Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-0424-100X*, **Андрей Игоревич Тхориков,** *канд. техн. наук, доцент* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-0404-5690*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0