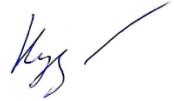


На правах рукописи



КУЗНЕЦОВ Николай Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ СКАЛЬНЫХ
ГОРНЫХ ПОРОД С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ ИХ УДАРООПАСНОСТИ
(на примере месторождений Кольского региона)**

Специальность 25.00.20 –

«Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Апатиты – 2021

Работа выполнена в Горном институте – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра “Кольский научный центр Российской академии наук”

Научный руководитель:

Козырев Анатолий Александрович - заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом “Геомеханики” Горного института – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра “Кольский научный центр Российской академии наук”

Официальные оппоненты:

Батугин Андриан Сергеевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Безопасность и экология горного производства», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»)

Макаров Александр Борисович – доктор технических наук, профессор, главный консультант по геомеханике SRK Consulting (Russia) Ltd Филиал частной компании с ограниченной ответственностью «Эсаркей Консалтинг (Россия) Лимитед» (Великобритания)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (ПФИЦ УрО РАН)

Защита состоится 28 сентября 2021 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 004.010.02 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН) по адресу: 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институте горного дела Уральского отделения Российской академии наук и на сайте <https://diss.igduran.ru>

Автореферат разослан _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Панжин Андрей Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. При ведении горных работ в скальных тектонически-напряженных массивах одной из актуальных проблем является оценка степени удароопасности отрабатываемых месторождений. В ходе интенсивной добычи полезных ископаемых регистрируют динамические проявления горного давления, приводящие не только к материальным потерям, но и к травмированию или гибели людей. Эта проблема не теряет своей актуальности и для месторождений Кольского региона.

Значительный вклад в изучение закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород и развития процессов динамических проявлений горного давления при отработке месторождений внесли М.В. Курленя, И.А. Турчанинов, Н.П. Влох, А.А. Барях, В.Л. Яковлев, С.В. Корнилков, В.Н. Захаров, И.Ю. Рассказов, А.А. Козырев, А.Н. Шабаров, А.В. Леонтьев, Д.В. Яковлев, А.Д. Сашурин, Г.А. Марков, В.Н. Опарин, А.С. Батугин, А.Б. Макаров, А.Е. Балек, А.В. Зубков, С.Н. Савченко, О.В. Зотеев, И.И. Айнбиндер и др.

Можно утверждать, что одной из основных предпосылок динамических проявлений горного давления является энергообмен в массиве пород, когда приток энергии из внешней среды превышает её поглощение и диссипацию в ходе разрушения. Для изучения процесса энергообмена в лабораторных экспериментах исследуют механические и энергетические характеристики образцов пород, получаемые при нагружении их до предела и за пределом прочности. С использованием этих характеристик можно оценивать степень удароопасности горных пород, которая проявляется в их способности к динамическим разрушениям.

К настоящему времени разработано множество методов определения механических свойств горных пород. Особый вклад в изучение этих свойств внесли М.М. Протодяконов, Г.Н. Кузнецов, Э. Хук, Э.Т. Браун, З.Т. Беньявски, Л.И. Барон, Е.И. Ильницкая, И.А. Турчанинов, А.А. Козырев, Г.А. Ковалева, В.И. Панин, Р.В. Медведев, Н.И. Белов, Д.К. Джаегер, В.В. Ржевский, А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня, Ю.М. Карташов, В.Д. Ломтадзе, В.А. Мансуров, П.М. Дайт, Б.Г. Тарасов, Е.В. Лодус, В.А. Асанов, В.Л. Шкуратник, А.И. Берон, В.И. Борщ-Компониец, В.Т. Глушко, Ю.П. Щуплецов, А. Базу и др.

Исследованием процесса энергообмена на образцах горных пород и в массиве занимались А.А. Скочинский, А.М. Терпигорев И.М., Петухов, А.Н. Ставрогин, Б.Г. Тарасов, С.Н. Савченко, Е.В. Лодус, В.А. Аниколенко, В.К. Шехурдин, В.И. Старостин, И.В. Куликов, В.И. Бондаренко, В.И. Брылин и др.

Применительно к условиям месторождений Кольского региона эта проблема изучена не в полной мере. К тому же существующие методы оценки удароопасности горных пород не всегда учитывают происходящие в массивах процессы энергообмена, а также требуют использования труднодоступного специализированного оборудования. Поэтому исследования механических и энергетических параметров скальных пород месторождений Кольского региона при разных условиях нагружения, а также разработка подхода к оценке удароопасности

(склонности к динамическим разрушениям) пород с позиции энергоемкости их разрушения являются актуальными.

Цель работы: разработка критерия оценки склонности к динамическим разрушениям (удароопасности) скальных горных пород с позиции их энергоемкости на примере месторождений Кольского региона.

Идея работы заключается в использовании особенностей механических и энергетических параметров для изучения процессов энергообмена, деформирования и разрушения скальных горных пород и определения их склонности к динамическим разрушениям (удароопасности).

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ существующих методов исследования энергоемкости разрушения горных пород и энергетических критериев оценки склонности пород к динамическим разрушениям.

2. Провести комплексное исследование механических и энергетических свойств скальных горных пород месторождений Кольского региона при различных режимах нагружения и определить характер их разрушения.

3. Разработать критерий оценки склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям (удароопасности) при испытании на стандартных прессах в условиях одноосного сжатия.

4. Выполнить оценку склонности скальных горных пород месторождений Кольского региона к динамическим разрушениям (удароопасности) в условиях трехосного сжатия при различных величинах бокового давления.

Методы исследования: для решения поставленных задач применен комплексный метод, включающий анализ и обобщение научного и практического опыта по проблеме, использование современного испытательного оборудования для определения механических и энергетических параметров образцов скальных горных пород, применение компьютерных технологий для обработки результатов исследований.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Зависимость между характером разрушения скальных горных пород месторождений Кольского региона и величиной их критической удельной энергии деформирования, показывающая, что в условиях одноосного сжатия при значениях критической удельной энергии до $0,05 \text{ МДж/м}^3$ преобладает статическое разрушение, а при больших величинах этого параметра для пород характерны динамические разрушения, интенсивность которых возрастает с его увеличением.

2. Упрощенный критерий оценки склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям, основанный на анализе допредельных диаграмм деформирования образцов при одноосном сжатии и сопоставлении величин расчетной идеально упругой и реальной энергии их деформирования, согласно которому в случае, если график деформирования имеет вогнутый вид и разница значений расчётной идеально упругой и реальной энергии деформирования больше 10%, то порода не склонна к разрушениям в динамической форме, а во всех остальных случаях породы склонны к разрушениям в динамической форме.

3. Степень неоднородности тензора действующих в массиве напряжений определяет характер выделения упругой энергии при разрушении скальных горных

пород и их склонность к динамическим разрушениям (удароопасности), а именно с возрастанием различий между величинами компонент напряжений скорость выделения накопленной энергии и склонность скальных пород к динамическим разрушениям увеличиваются, а при выравнивании значений компонент действующих напряжений - уменьшаются.

Научная новизна работы:

1. Установлено, что в условиях одноосного сжатия образцы скальных горных пород месторождений Кольского региона с величиной критической удельной энергии деформирования ниже $0,05 \text{ МДж/м}^3$ разрушаются в статической режиме, а образцы пород с величиной критической энергии выше $0,05 \text{ МДж/м}^3$ разрушаются в динамической форме с сильным звуком и разлетом осколков. При этом наиболее интенсивное разрушение выявлено для образцов со значениями критической энергии свыше $0,25 \text{ МДж/м}^3$ (вмещающие породы апатит-нефелиновых месторождений – уртиты и ийолиты).

2. Определено, что в условиях трехосного сжатия с увеличением бокового давления также возрастают значения пределов прочности и критической удельной энергии деформирования образцов скальных горных пород (на примере апатит-нефелиновых руд, уртитов, ийолитов, гнейса, туфогенно-осадочной породы и карбонатита). При боковом давлении порядка 20-30 МПа значения прочности по сравнению с одноосным сжатием увеличились в два-три раза, а критической энергии - в пять-десять раз. Для образцов уртита среднезернистого массивного при боковом давлении 80 МПа прочность возросла в четыре раза по сравнению с одноосным сжатием, а критическая энергия – в четырнадцать раз.

3. Выявлено, что для скальных горных пород месторождений Кольского региона, склонных к динамическим разрушениям, характерно быстрое выделение накопленной в условиях трехосного сжатия (при боковом давлении до 30 МПа) упругой энергии (менее 40 с), а критическая удельная энергия деформирования в два и более раз превышает остаточную энергию в образцах после их разрушения. Для несклонных к динамическим разрушениям пород время выделения энергии в условиях трехосного сжатия более длительное (около 200 с и выше), а разница между величинами критической и остаточной энергии близка к нулю.

4. Установлено, что при переходе от условий одноосного сжатия к трехосному изменяется характер деформирования скальных горных пород: при трёхосном нагружении допредельные графики деформирования образцов имеют более выраженную выпуклость, что объясняется затруднением деформирования в горизонтальной плоскости и свидетельствует о большем накоплении энергии. Эта же затруднённость деформирования в результате действия боковых нагрузок приводит к изменению режима запредельного деформирования и уменьшению склонности скальных пород к динамическим формам разрушения.

Практическая значимость работы:

- определены критические величины удельной энергии деформирования на образцах скальных горных пород, превышение которых в породном массиве может служить в качестве индикатора возможного возникновения удароопасной ситуации;
- разработанный упрощенный критерий оценки склонности к динамическим разрушениям (удароопасности) скальных горных пород месторождений Кольского

региона может быть использованы для прогноза удароопасности и выявления участков массива, склонных к проявлению динамических форм разрушения.

Достоверность научных положений и выводов подтверждена экспериментальными исследованиями, проводимыми на современном высокоточном испытательном оборудовании.

Личный вклад автора состоит в обобщении и анализе результатов по теме исследования и постановке задач, участии в выполнении экспериментальных исследований, подготовке образцов скальных горных пород, статистической обработке и анализе полученных экспериментальных результатов, разработке критерия оценки склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям.

Реализация результатов работы. Результаты исследований получены в процессе выполнения работ в рамках темы НИР ГоИ КНЦ РАН «Исследование геомеханических процессов в геологической среде горнотехнических систем для обеспечения геодинамической безопасности разработки недр», темы НИР «Исследование процессов энергообмена в геологической среде горнотехнических систем для обеспечения геодинамической безопасности разработки недр северо-запада Арктического региона», темы НИР «Комплексная геомеханическая оценка удароопасных месторождений Северо-запада Арктической зоны РФ». В ходе выполнения договоров выданы заключения об оценке склонности скальных горных пород к динамическим формам разрушения для месторождений Кольского региона, отрабатываемых предприятиями АО «Апатит», АО «Ковдорский ГОК» и АО «Кольская ГМК».

Результаты работы отражены в следующем нормативном документе, регламентирующем безопасные условия и порядок ведения горных работ:

- Регламент по обоснованию устойчивых параметров борта карьера и отвалов участка Гакман Юкспорского месторождения. - Апатиты, 2020 г.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на XV и XVII Межрегиональных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых (Апатиты, 2012 и 2014), на II Международной конференции горнопромышленного комплекса «Горнодобывающая промышленность Баренцева Евро-Арктического региона» (Кировск, 2012), на V и VI школах молодых ученых ГоИ КНЦ РАН (Апатиты, 2013 и 2014), на международном геомеханическом коллоквиуме EUROCK 2015 (Зальцбург, 2015), на X Международной школе-семинаре «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород» (Апатиты, 2016), на Европейском симпозиуме EUROCK 2017 (Острава, 2017), на Европейском симпозиуме по геомеханике EUROCK 2018 (Санкт-Петербург, 2018), на третьей Международной конференции «Свойства горных пород при динамических нагрузках» RocDyn-3 (Тронхейм, 2018), на XIII Всероссийской молодежной научно-практической конференции "Проблемы недропользования" (Екатеринбург, Апатиты, Хабаровск, 2019 г.), были изложены в научно-исследовательских отчетах ГоИ КНЦ РАН, опубликованы в научных статьях.

Публикации. По результатам исследований опубликована 41 печатная работа (из них 9 работ – в изданиях, рекомендованных ВАК, 11 - в изданиях,

индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, и 2 патента на изобретения).

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 145 страницах машинописного текста, в том числе 63 рисунка, 9 таблиц и список использованных источников из 160 наименований.

Автор считает своим долгом выразить искреннюю благодарность научному руководителю работы Заслуженному деятелю науки Российской Федерации, профессору, доктору технических наук А.А. Козыреву за помощь в постановке проблемы и руководство исследованиями; доктору технических наук Э.В. Каспарьяну и кандидату технических наук Ю.В. Федотовой за помощь в разработке упрощенного критерия оценки склонности скальных пород к динамическим разрушениям, ценные советы и обсуждение результатов исследований; доктору технических наук В.В. Рыбину и кандидату технических наук В.И. Панину за пристальное внимание к работе и ценные советы; кандидату технических наук А.Н. Шокову, научному сотруднику А.К. Паку, научному сотруднику А.С. Калюжному, ведущему инженеру В.П. Гуменникову, ведущему инженеру М.И. Потокину и ведущему технологу И.В. Данилову за помощь в проведении испытаний. Автор благодарен всем сотрудникам отдела "Геомеханики" и Горного института за внимание к работе и плодотворное сотрудничество.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, поставлены цель и задачи исследований, сформулирована идея работы, защищаемые научные положения, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе обоснована актуальность проблемы исследования процессов энергообмена в массивах горных пород. Приведен обзор методов изучения энергетических процессов в массиве пород и на образцах. Проанализированы существующие энергетические критерии оценки склонности горных пород к динамическим разрушениям.

Во второй главе приведена обобщенная методика определения механических свойств и энергоемкости разрушения скальных горных пород в условиях одноосного и трехосного напряженного состояния. Представлены результаты экспериментальных исследований образцов скальных горных пород месторождений Кольского региона. Показана взаимосвязь между характером разрушения образцов и величиной их критической удельной энергии деформирования при одноосном сжатии.

В третьей главе представлен упрощенный критерий оценки склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям по результатам испытаний при одноосном сжатии. Выполнен сравнительный анализ результатов оценки по предложенному критерию и критерию А.Н. Ставрогина, основывающемуся на сопоставлении величин модуля спада и модуля упругости. Показано, что

предложенный подход позволяет определять склонность скальных горных пород к разрушениям в динамической форме аналогично подходу А.Н. Ставрогина.

В четвертой главе приведены результаты определения склонности скальных горных пород Хибинского и Ковдорского массивов к динамическим разрушениям при трехосном сжатии. Выполнен анализ условий динамического разрушения скальных пород. Предложен общий алгоритм оценки склонности скальных горных пород к разрушениям в динамической форме.

В заключении приведены основные выводы и результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых научных положениях:

1. Зависимость между характером разрушения скальных горных пород месторождений Кольского региона и величиной их критической удельной энергии деформирования, показывающая, что в условиях одноосного сжатия при значениях критической удельной энергии до 0,05 МДж/м³ преобладает статическое разрушение, а при больших величинах этого параметра для пород характерны динамические разрушения, интенсивность которых возрастает с его увеличением.

Для определения механических свойств и энергоемкости разрушения скальных горных пород **в условиях одноосного напряженного состояния** выполнен отбор керн со следующих месторождений Кольского региона: апатит-нефелиновые месторождения Кукисвумчорское, Юкспорское и "Апатитовый цирк", отрабатываемые КФ АО "Апатит"; Ковдорское магнетит-apatит-бадделейтовое месторождение, отрабатываемое АО "Ковдорский ГОК"; железорудное месторождение Куркенпахк, отрабатываемое АО "Оленегорский ГОК"; Ждановское медно-никелевое месторождение, отрабатываемое АО "Кольская ГМК". Всего отобрано пятнадцать литологических разновидностей скальных пород, представленных тридцатью четырьмя разновидностями руд и вмещающих пород.

Испытания проводили в Горном институте КНЦ РАН на сервогидравлической испытательной машине MTS 816 Rock Test System. Подготовленные образцы горных пород имели форму цилиндра с отношением высоты к диаметру равным двум.

По результатам испытаний определены основные механические свойства исследуемых скальных горных пород: пределы прочности при одноосном сжатии и растяжении, модуль упругости и коэффициент Пуассона. Также рассчитаны величины критической удельной энергии деформирования образцов при сжатии и растяжении по формулам (1) и (2) соответственно:

$$W_{*сж} = \frac{\sigma_{сж}^2}{2E}, \quad (1)$$

$$W_{*р} = \frac{\sigma_p^2}{2E} \quad (2)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности при одноосном сжатии, МПа; σ_p – предел прочности при растяжении, МПа; E – модуль упругости, МПа.

Анализ полученных данных позволил установить, что наибольшие значения пределов прочности при сжатии (свыше 190 МПа) и модулей упругости (свыше $8,00 \cdot 10^{-4}$ МПа) соответствуют вмещающим породам удароопасных апатит-

нефелиновых месторождений – ийолитам и уртитам. Наибольшие значения пределов прочности при растяжении (свыше 10 МПа) соответствуют лампрофиллит-эгирин-полевошпатовой жиле (апатит-нефелиновые месторождения) и вмещающим породам Ждановского месторождения. Наименьшие величины прочностных характеристик (ниже 60 МПа при сжатии и 6 МПа при растяжении) и модулей упругости (ниже $5,00 \cdot 10^{-4}$ МПа) установлены для ювитов с содовым налетом (апатит-нефелиновые месторождения) и кальцитового карбонатита (Ковдорское месторождение).

На основе полученных экспериментальных данных выполнен сравнительный анализ энергоемкости и характера разрушения исследуемых скальных горных пород при одноосном сжатии. По результатам такого анализа установлено, что породы с величиной критической удельной энергии деформирования свыше 0,0500 МДж/м³ разрушались в динамической форме с разлетом осколков и взрывоподобным звуком (Рис. 1). При этом наиболее интенсивное разрушение выявлено для образцов уррита неравномерно-зернистого, уррита среднезернистого массивного (полевошпатового до ювитов) и ийолита трахитоидного (апатит-нефелиновые месторождения). Величины критической удельной энергии деформирования таких пород являются самыми высокими (свыше 0,2500 МДж/м³).

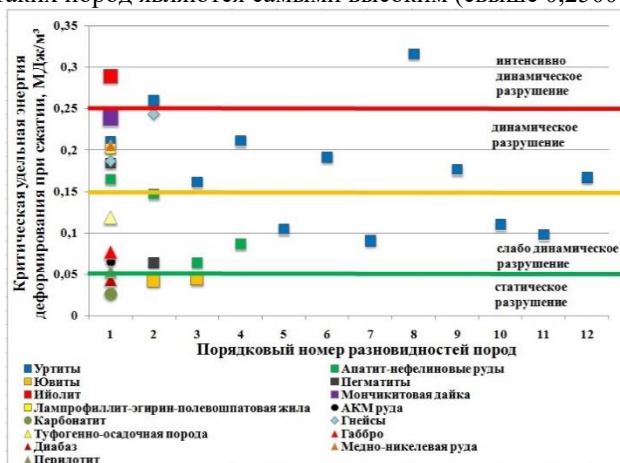


Рис. 1. Характер разрушения образцов исследуемых литологических разностей скальных горных пород при одноосном сжатии

Статический характер разрушения установлен для двух литологических разностей - ювит мелко-среднезернистый массивный с эвдиалитом и содовым налетом, ювит мелко-среднезернистый массивный со сфеном и кальцитовый карбонатит, критическая удельная энергия деформирования которых ниже 0,0500 МДж/м³. Также часть образцов диабаз Ждановского месторождения разрушалась без динамических проявлений (средняя величина критической энергии 0,0434 МДж/м³).

Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что скальные горные породы, величина критической удельной энергии деформирования которых ниже

0,0500 МДж/м³, не склонны к динамическим разрушениям. В случае, если критическая энергия горных пород будет превышать величину 0,0500 МДж/м³, то они будут склонны к динамическим видам разрушения. При этом наиболее опасными по таким видам разрушения будут породы со значениями энергии свыше 0,2500 МДж/м³.

Исследование механических и энергетических параметров в условиях **трехосного напряженного состояния** проведено для пяти литологических разновидностей скальных горных пород месторождений Кольского региона: линзовидно-полосчатой апатит-нефелиновой руды, уртита среднезернистого массивного, ийолита трахитоидного (apatит-нефелиновые месторождения), гнейса серого лейкократового (месторождение Куркенпахк) и туфогенно-осадочной породы (Ждановское месторождение).

Основная задача исследования заключалась в том, чтобы выявить тенденцию изменения величин пределов прочности и критической удельной энергии деформирования образцов скальных горных пород при переходе от условий одноосного сжатия к трехосному (величины бокового давления до 30 МПа).

Анализ результатов испытаний позволил установить, что значения пределов прочности образцов при трехосном сжатии изменяются следующим образом. При боковом давлении 20 МПа прочность образцов уртита в среднем увеличилась в три раза по сравнению с прочностью при одноосном сжатии, а образцов ийолита - в два раза. Для линзовидно-полосчатой апатит-нефелиновой руды при боковом давлении 15 МПа прочность возросла в три раза. Для образцов гнейса и туфогенно-осадочной породы при боковом давлении 30 МПа пределы прочности увеличились в два раза. Графически полученные результаты представлены на рисунке 2.

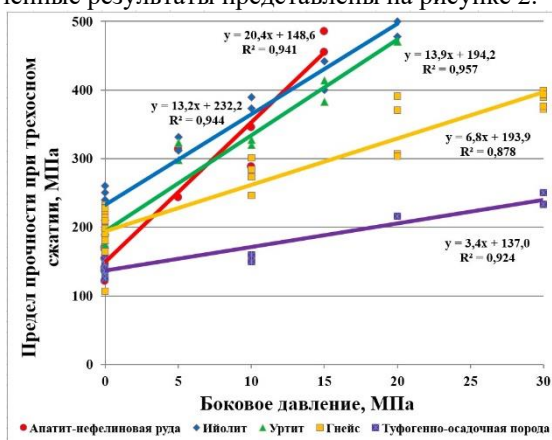


Рис. 2. Зависимость значений пределов прочности при трехосном сжатии образцов исследуемых скальных горных пород от величин бокового давления

Из рисунка 2 следует, что характер изменения величин прочности с увеличением бокового давления при трехосном сжатии образцов ийолита и уртита является схожим. Для образцов апатит-нефелиновой руды установлена иная

тенденция, а именно - резкое возрастание прочности при небольшом увеличении боковой нагрузки.

Если провести горизонтальную прямую (Рис. 3, прямая Б) из точки пересечения линии тренда зависимости "предел прочности при трехосном сжатии - боковое давление" (прямая А) и оси ординат, то получим, что для исследуемых типов пород угол α между прямыми А и Б также будет различным.

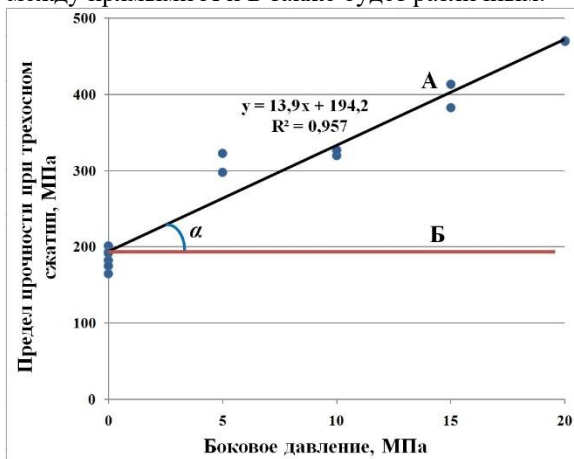


Рис. 3. Зависимость значений пределов прочности при трехосном сжатии от величин бокового давления (на примере образцов уртита среднезернистого массивного); А - линия тренда; Б - условная горизонтальная линия, проведенная из точки пересечения прямой А с осью ординат; α - угол между прямыми А и Б

Таким образом, угол α будет характеризовать изменение значений пределов прочности образцов при увеличении бокового давления, а именно: чем больше угол, тем быстрее происходит процесс упрочнения исследуемой породы. Для апатит-нефелиновой руды $\alpha = 88^\circ$, для уртита $\alpha = 87^\circ$, для ийолита $\alpha = 86^\circ$, для гнейса - 82° , для туфогенно-осадочной породы - 70° . Следовательно, наибольший темп роста величин прочности при трехосном сжатии будет соответствовать руде, а наименьший - туфогенно-осадочной породе.

На основании полученных в ходе испытаний результатов для определения характера изменения значений пределов прочности образцов скальных горных пород в условиях трехосного сжатия была предложена следующая зависимость:

$$\sigma_{тр} = \sigma_{сж} + \sigma_{бок} \operatorname{tg} \alpha \quad (3)$$

где $\sigma_{тр}$ – предел прочности при трехосном сжатии, МПа; $\sigma_{сж}$ – предел прочности при одноосном сжатии, МПа; $\sigma_{бок}$ – боковое давление, МПа; α – угол между графиком зависимости "предел прочности при трехосном сжатии – боковое давление" и прямой, проведенной из точки пересечения графика с осью ординат параллельно оси абсцисс.

Значения критической удельной энергии деформирования исследуемых скальных горных пород при трехосном сжатии рассчитывали по формуле (4).

$$w_{*тр} = \frac{1}{2E} (\sigma_{тр}^2 + \sigma_{бок1}^2 + \sigma_{бок2}^2 - 2\nu(\sigma_{тр}\sigma_{бок1} + \sigma_{тр}\sigma_{бок2} + \sigma_{бок1}\sigma_{бок2})) \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{бок1,2}}$ - боковые давления на образец, МПа; ν - коэффициент Пуассона.

Установлено, что, как и в случае с прочностными характеристиками, величины критической удельной энергии возрастают с увеличением бокового давления. При $\sigma_{\text{бок1,2}} = 20$ МПа критическая энергия образцов уртита в среднем возросла в семь раз по сравнению с критической энергией при одноосном сжатии, а образцов ийолита - в пять раз. Для гнейса и туфогенно-осадочной породы при боковом давлении 30 МПа критическая энергия возросла в 4 и 3 раза соответственно. Наибольшее увеличение установлено для образцов апатит-нефелиновой руды - в десять раз. Графики изменения значений критической удельной энергии деформирования исследуемых скальных пород с увеличением бокового давления подобны графикам, представленным на рисунке 2.

Таким образом, в условиях трехосного сжатия с увеличением бокового давления будут также возрастать значения пределов прочности и критической удельной энергии деформирования скальных горных пород. При боковом давлении порядка 20-30 МПа значения прочности по сравнению с одноосным сжатием увеличились в два-три раза, а критической энергии - в пять-десять раз. В связи с этим горные породы в условиях трехосного сжатия будут способны выдерживать большие нагрузки и накапливать больше энергии, чем в условиях одноосного сжатия. Однако при их разрушении в окружающий массив также будет поступать большее количество энергии. Как результат, вероятность динамических разрушений будет выше, а их последствия будут гораздо более серьезными.

2. Упрощенный критерий оценки склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям, основанный на анализе допредельных диаграмм деформирования образцов при одноосном сжатии и сопоставлении величин расчетной идеально упругой и реальной энергии их деформирования, согласно которому в случае, если график деформирования имеет вогнутый вид и разница значений расчётной идеально упругой и реальной энергии деформирования больше 10%, то порода не склонна к разрушениям в динамической форме, а во всех остальных случаях породы склонны к разрушениям в динамической форме.

Основной целью проводимых исследований является изучение характера накопления упругой энергии в процессе нагружения и деформирования образцов различных пород при одноосном сжатии для оценки их склонности к динамическим разрушениям на стандартных прессах. Для решения поставленной задачи проведены испытания скальных горных пород Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений (Хибинский массив) - апатит-нефелиновой руды, ийолита и уртитов. Также с целью увеличения степени достоверности получаемых результатов проведены испытания апатит-карбонатно-магнетитовой руды и карбоната Ковдорского месторождения (Ковдорский массив) и гнейсов железорудного месторождения Куркенпахк (Заимандровский железорудный район).

Испытания проводили на сервогидравлической установке MTS 816 Rock Test System (коэффициент жесткости нагрузочной рамы 1,1 ГН/м). Подготовленные образцы имели форму цилиндра с отношением высоты к диаметру равным 2, а их количество составляло 4 - 5 шт. для каждого типа горной породы.

На первом этапе испытаний образцы нагружали до 30% от предела прочности при сжатии с определенным шагом (10 кН для карбонатита, 20 кН для ийолита и 15 кН для всех остальных пород) и разгружали с тем же шагом. Величины продольных деформаций регистрировали при помощи тензодатчиков. По результатам первого этапа нагружения определяли значения деформационных параметров исследуемых скальных горных пород - модуль упругости и коэффициент Пуассона.

На втором этапе испытаний образцы нагружали при одноосном сжатии до разрушения. На основе полученных результатов строили графики зависимости «напряжение - деформация» и рассчитывали величины энергии деформирования для каждого образца.

В ходе исследований скальных горных пород в условиях одноосного сжатия установлено два различающихся режима деформирования, которые схематично представлены на рисунке 4. Здесь ОВС – условная линия идеально упругого деформирования, ОАС - график неупругого деформирования, ОЕС - частный случай упругого деформирования с избытком упругой энергии. Точка С – предел прочности при одноосном сжатии; точка D – величина продольной деформации, соответствующая пределу прочности при одноосном сжатии.

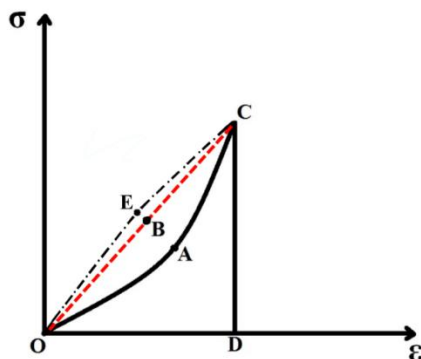


Рис. 4. Графики деформирования скальных горных пород, установленные по результатам испытаний: σ - нормальное напряжение, ε - относительная продольная деформация

Как следует из рисунка 4, графики деформирования изучаемых скальных горных пород могут иметь вогнутую и выпуклую форму относительно прямой линии (показана пунктиром), которая характеризует идеально упругое деформирование материала.

Величина энергии деформирования пород до предела прочности (W_n) определяется как значение интеграла:

$$W_n = \int_0^D \sigma(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (5)$$

где $\sigma(\varepsilon)$ - функция "напряжение-деформация".

Величина энергии при идеально упругом деформировании ($W_{и.у.}$) определяется как площадь треугольника ОВСD в координатах σ - ε (Рис. 4):

$$W_{и.у.} = S_{ОВСD} = \frac{OD \cdot DC}{2}, \quad (6)$$

Когда в результате испытаний получаем график деформирования пород вогнутой формы, это значит, что энергия деформирования не накапливается в образце, а реализуется в виде пластических деформаций в процессе нагружения. При этом во все периоды времени энергия деформирования остаётся меньше величины энергии, соответствующей идеально упругому деформированию.

В том случае, когда график деформирования имеет выпуклую форму, упругая энергия накапливается в образце и во все периоды времени превышает величину энергии, соответствующую идеально упругому деформированию.

В таблице 1 приведены результаты определения энергетических параметров исследуемых скальных горных пород месторождений Кольского региона.

Табл. 1. Результаты определения энергетических параметров (средние значения) исследуемых скальных горных пород при одноосном сжатии до разрушения

Наименование горных пород	$W_{и.у.}$ (МДж/м ³) / V (%)	$W_{п.}$ (МДж/м ³) / V (%)	Разница между $W_{и.у.}$ и $W_{п.}$		Заклчение о склонности к динамическому разрушению
			МДж/м ³	%	
Ийолит трахитоидный	<u>0,2016</u> 40	<u>0,1856</u> 37	0,0160	8	склонен
Уртит неравномерно-зернистый	<u>0,2398</u> 5	<u>0,2376</u> 2	0,0022	1	склонен
Уртит среднезернистый массивный	<u>0,1760</u> 17	<u>0,1758</u> 17	0,0002	0	склонен
Уртит пегматойдный	<u>0,1361</u> 28	<u>0,1324</u> 29	0,0037	3	склонен
Линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда	<u>0,1343</u> 26	<u>0,1246</u> 28	0,0097	7	склонен
Гнейс серый	<u>0,1258</u> 35	<u>0,1234</u> 39	0,0024	2	склонен
Гнейс серый лейкократовый	<u>0,1230</u> 38	<u>0,1107</u> 39	0,0123	10	склонен
Кальцитовый карбонатит	<u>0,0137</u> 34	<u>0,0099</u> 32	0,0038	28	не склонен
Апатит-карбонатно-магнетитовая руда	<u>0,0444</u> 9	<u>0,0433</u> 7	0,0011	2	склонен

*V – коэффициент вариации

Для образцов уррита неравномерно-зернистого установлено, что графики их деформирования имеют преимущественно слабо выпуклый вид (Рис. 5а) или близки

к прямой идеально-упругого деформирования. Разница между идеально-упругой и реальной энергиями в среднем составляет 1%. Образцы этой породы разрушались в ярко выраженном динамическом режиме с интенсивным выделением энергии, сильным звуком и разлётом фрагментов.

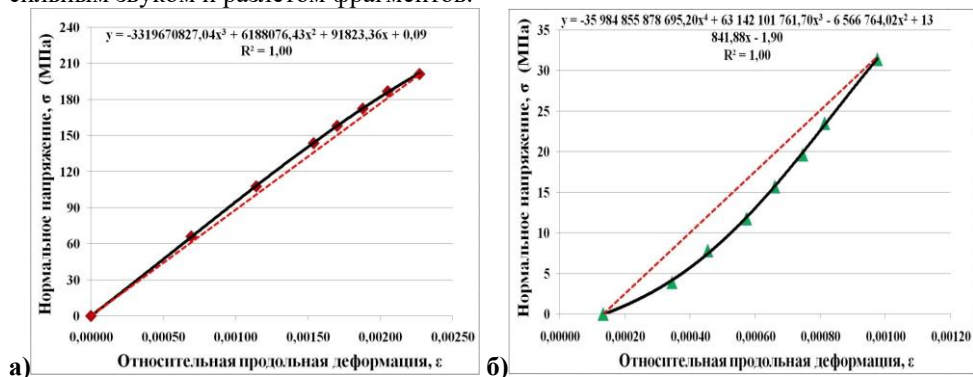


Рис. 5. Графики деформирования: а) образца уррита неравномерно-зернистого; б) образца кальцитового карбонатита; пунктир - условная линия идеально упругого деформирования

Графики деформирования образцов карбонатита имеют отчетливо вогнутый вид (Рис. 5б). При этом графики начинаются не с нуля из-за того, что в ходе цикла нагрузки-разгрузки до 30% от предела прочности на сжатие в образцах произошли необратимые деформации. Разница между величинами расчетной идеально упругой и реальной энергиями в среднем составляет 28 %. Разрушения происходили без разлёта осколков в явно статическом режиме.

Деформирование остальных типов скальных пород происходило в некотором промежуточном режиме по сравнению с деформированием уррита неравномерно-зернистого и кальцитового карбонатита. В частности, графики деформирования отдельных образцов уртитов (пегматоидного и среднезернистого массивного), апатит-нефелиновой руды, гнейсов и апатит-карбонатно-магнетитовой руды приближались к идеальной прямой или имели слабую вогнутую форму, при этом различие в величинах реальной энергии W_p и условно расчётной энергией $W_{и.у.}$ колебалось в относительно небольших пределах (0-10%). Образцы этих пород разрушались менее интенсивно, но разлёт осколков имел место.

Таким образом, в результате проведенных исследований выявлено два различающихся режима деформирования для испытанных типов пород и определен критерий отнесения пород к различным категориям по степени склонности к разрушениям в динамической или статической форме.

В частности, если значение реальной энергии деформирования меньше условно-расчётной идеально упругой энергии на величину свыше 10%, то порода может быть уверенно отнесена к типу пород, разрушение которых возможно только в статическом режиме. Для этих пород разрушения в динамической форме маловероятно, следовательно, такие породы должны быть отнесены к категории «неопасных пород по горным ударам».

Во всех остальных случаях, когда разница значений реальной энергии деформирования меньше условно-расчётной идеально упругой энергии на величину до 10% или равна нулю, а также, если значения реальной энергии превышают значения идеально упругой, то породы являются склонными к разрушениям в динамической форме, а массивы пород, включающие их, должны быть отнесены к склонным и опасным по горным ударам.

Результаты исследований также показали, что наиболее склонными к динамическим разрушениям из испытанных пород Хибинских апатит-нефелиновых месторождений являются уртиты, несколько менее склонными - ийолиты и апатит-нефелиновые руды; из пород Заимандровского железорудного района - гнейсы; из пород Ковдорского месторождения: склонные - апатит-карбонатно-магнетитовые руды и совершенно несклонные - кальцитовые карбонатиты.

С целью увеличения степени достоверности проводимой по предложенной методике оценки выполнены испытания образцов на жестком прессе при одноосном сжатии. Для этого выбраны два типа скальных горных пород Хибинского массива - линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда и уртит среднезернистый массивный, и один тип пород Ковдорского массива - кальцитовый карбонатит. Такой выбор обусловлен тем, что представленные породы имеют различные прочностные и деформационные характеристики.

Испытания проводились в Санкт-Петербургском Горном университете на сервогидравлической установке MTS 816 с повышенной жесткостью (коэффициент жесткости нагружной рамы 3 ГН/м) в режиме контролируемых деформаций. Подготовленные образцы имели форму цилиндра с отношением высоты к диаметру равным 2, а их количество составляло 6 шт. для каждого типа горной породы.

Оценку склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям выполняли по критерию А.Н. Ставрогина и А.Г. Протосени на основании сопоставления величин модуля упругости и модуля спада (7). В том случае, когда отношение этих величин (коэффициент удароопасности, K_1) меньше или равно единице ($K_1 \leq 1$), порода считается склонной к динамическому разрушению. Если же величина коэффициента удароопасности больше единицы ($K_1 > 1$), то порода не склонна к динамическим видам разрушения.

$$K_1 = E/M, \quad (7)$$

где E - модуль упругости, МПа; M - модуль спада, МПа.

Результаты определений деформационных характеристик и коэффициентов удароопасности исследуемых скальных горных пород представлены в таблице 2.

По результатам испытаний (Табл. 2) установлено, что для всех образцов уртита и апатит-нефелиновой руды значения коэффициента удароопасности меньше единицы, то есть выполняется условие $K_1 \leq 1$. Таким образом, эти горные породы являются склонными к динамическим разрушениям. Для образцов карбонатита значения коэффициента удароопасности больше единицы ($K_1 > 1$). Следовательно, данная порода не является склонной к динамическим разрушениям.

При сопоставлении результатов определения склонности исследуемых горных пород к динамическим разрушениям по предлагаемой методике анализа графика деформирования до предела прочности и методике анализа полного графика деформирования пород с использованием жёстких прессов можно сделать основной

вывод, что и в том и в другом случае склонными к динамическим разрушениям оказались уртит среднезернистый массивный и линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда, а несклонным - кальцитовый карбонатит.

Табл. 2. Результаты определения деформационных характеристик и склонности к динамическим разрушениям исследуемых скальных горных пород при одноосном сжатии

Наименование горных пород	№ образца	Модуль упругости, E (МПа*10 ⁻⁴)	Модуль спада, M (МПа*10 ⁻⁴)	Коэффициент удароопасности, K_1	Заключение о склонности к динамическому разрушению
Уртит	6-16	7,36	147,37	0,05	склонен
	6-17	4,66	10,51	0,44	склонен
	6-18	6,05	30,24	0,20	склонен
	7-15	6,46	114,38	0,06	склонен
	7-16	7,62	56,83	0,13	склонен
	8-16	6,72	198,12	0,03	склонен
Апатит-нефелиновая руда	4-1	4,82	20,34	0,24	склонен
	4-2	6,41	92,36	0,07	склонен
	4-6	7,56	159,73	0,05	склонен
	4-10	6,32	94,66	0,07	склонен
	4-11	5,00	14,92	0,34	склонен
	4-13	6,04	68,45	0,09	склонен
Карбонатит	1-2-6	5,03	0,26	19,35	не склонен
	1-3-4	3,96	1,92	2,06	не склонен
	1-3-6	4,00	2,13	1,88	не склонен
	1-5-4	4,80	0,59	8,14	не склонен
	1-8-4	3,27	1,68	1,95	не склонен
	46-7-4	4,12	0,99	4,16	не склонен

Таким образом, подтверждается, что предложенный подход позволяет определять склонность скальных горных пород к разрушениям в динамической форме аналогично подходу, основывающемуся на анализе полного графика деформирования пород и сопоставлении их допредельных и запредельных характеристик.

3. Степень неоднородности тензора действующих в массиве напряжений определяет характер выделения упругой энергии при разрушении скальных горных пород и их склонность к динамическим разрушениям (удароопасности), а именно с возрастанием различий между величинами компонент напряжений скорость выделения накопленной энергии и склонность скальных пород к динамическим разрушениям увеличиваются, а при выравнивании значений компонент действующих напряжений - уменьшаются.

Для изучения процессов накопления и выделения энергии при нагружении скальных горных пород в условиях трехосного сжатия, а также определения их склонности к динамическим разрушениям, отобраны керновые пробы и подготовлены образцы пород Кукисвумчоррского месторождения Хибинского

массива (уртит среднезернистый массивный и линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда) и Ковдорского месторождения (кальцитовый карбонатит).

Испытания проводились в Санкт-Петербургском Горном университете на сервогидравлической установке MTS 815 с повышенной жесткостью в режиме контролируемых деформаций (скорость осевого деформирования - 0,3 мм/с). Подготовленные образцы имели форму цилиндра с отношением высоты к диаметру равным 2, а их количество составляло 6 шт. для каждого литотипа горной породы.

По результатам испытаний строили полные графики зависимости «напряжение - деформация» (Рис. 6) и определяли значения модулей упругости и спада для каждого образца горной породы.

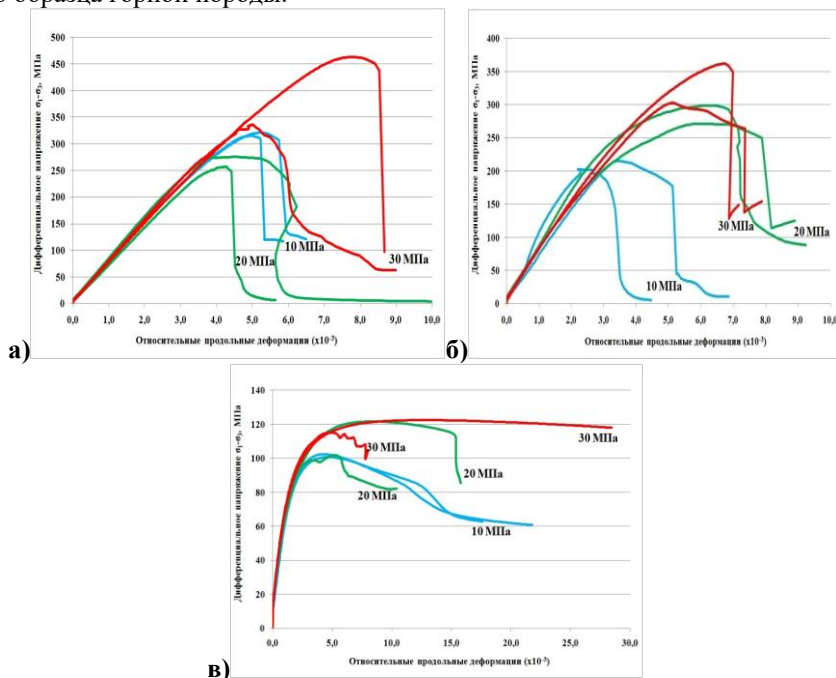


Рис. 6. Графики деформирования образцов в условиях трехосного сжатия: а) уртит; б) апатит-нефелиновая руда; в) карбонатит; голубые линии - боковое давление 10 МПа; зеленые линии - боковое давление 20 МПа; красные линии - боковое давление 30 МПа

Графики деформирования образцов уррита (Рис. 6) до предела прочности имеют практически прямолинейный вид, а за пределом прочности обрываются достаточно круто. Подобный характер деформирования соответствует хрупким породам. Разрушение всех образцов происходило в ярко выраженном динамическом режиме с сильным звуком. При этом образовывалась четко выраженная плоскость разрушения.

Графики деформирования образцов апатит-нефелиновой руды до предела прочности (Рис. 6) имеют выпуклую форму, а на пределе прочности образуется

площадка с постепенным снижением величин дифференциального напряжения и последующим достаточно резким обрывом. По сравнению с уртитом образцы апатит-нефелиновой руды деформировались в менее упругом режиме. Однако их разрушение происходило также в динамическом режиме с сильным звуком и образованием преимущественно одной плоскости разрушения.

Графики деформирования образцов карбонатита до предела прочности (Рис. 6) имеют отчетливый выпуклый вид по сравнению с уртитом и линзовидно-полосчатой рудой. На пределе прочности образуется площадка с постепенным снижением величин дифференциального напряжения. В этом случае резкого обрыва графиков за пределом прочности не наблюдается. Подобный характер деформирования в целом соответствует пластичным породам, что подтверждается и отсутствием динамических проявлений при разрушении образцов. При этом следует отметить, что после снятия нагрузки на всех образцах карбонатита прослеживалась отчетливая плоскость разрушения и заметное увеличение их объема (дилатансия).

Оценку склонности исследуемых скальных горных пород к разрушениям в динамической форме в условиях трехосного сжатия выполняли по критерию А.Н. Ставрогина ($K_1 = E/M$). Результаты определения приведены в таблице 3.

Табл. 3. Результаты определения деформационных характеристик и склонности к динамическим разрушениям исследуемых скальных горных пород при трехосном сжатии

Наименование горных пород	Боковое давление, $\sigma_{бок}$ (МПа)	Модуль упругости, E (МПа* 10^{-4})	Модуль спада, M (МПа* 10^{-4})	K_1	Заключение о склонности к динамическому разрушению
Уртит	10	7,50	58,83	0,13	склонен
	10	7,48	28,86	0,26	склонен
	20	6,96	80,94	0,09	склонен
	20	7,91	13,83	0,57	склонен
	30	7,62	7,68	0,99	склонен
	30	7,29	46,01	0,16	склонен
Апатит-нефелиновая руда	10	7,44	11,69	0,64	склонен
	10	6,76	9,13	0,74	склонен
	20	8,01	9,55	0,84	склонен
	20	7,20	9,94	0,72	склонен
	30	7,42	152,50	0,05	склонен
	30	7,10	7,30	0,97	склонен
Карбонатит	10	5,11	0,25	20,44	не склонен
	10	5,39	0,30	17,97	не склонен
	20	5,12	0,54	9,48	не склонен
	20	6,21	0,40	15,53	не склонен
	30	6,14	0,61	10,07	не склонен
	30	5,79	0,03	193,00	не склонен

Из приведенных в таблице 3 данных следует, что для всех образцов уррита и апатит-нефелиновой руды значения коэффициентов удароопасности меньше единицы, то есть выполняется условия $K_1 \leq 1$. Таким образом, эти горные породы являются склонными к динамическим разрушениям. Для образцов карбонатита

значения коэффициентов удароопасности больше единицы ($K_1 > 1$). Следовательно, данная порода не является склонной к динамическим разрушениям.

При сопоставлении результатов испытаний исследуемых пород при трехосном и одноосном сжатии установлено, что склонность к динамическим разрушениям уртитов и апатит-нефелиновых руд сохраняется при обоих режимах нагружения, а карбонатит в обоих случаях не проявляет склонности к динамическим разрушениям.

Однако характер деформирования пород различен: при трёхосном нагружении допредельные ветви деформирования образцов имеют более выраженную выпуклость, что объясняется затруднением деформирования в горизонтальной плоскости и свидетельствует о большем накоплении энергии.

Эта же затруднённость деформирования в результате действия боковых нагрузок приводит к изменению режима запредельного деформирования, т.е. выделения накопленной энергии. В частности, для карбонатитов процесс выделения энергии идёт очень медленно, величины напряжений с развитием деформаций почти не меняются (запредельная ветвь деформирования почти горизонтальна).

Отсюда следует интересный вывод, что с переходом к трехосному нагружению и при снижении контрастности между компонентами тензора напряжений, уменьшается способность выделения накопленной энергии, что особенно ярко видно на примере образцов карбонатита.

В ходе исследований образцов скальных горных пород в условиях трехосного сжатия установлено два отличающихся режима выделения накопленной в процессе нагружения энергии.

В первом случае для склонных к динамическим разрушениям пород (уртита и апатит-нефелиновой руды) накопленная упругая энергия выделялась очень быстро. Время между максимальным значением дифференциального напряжения и обрывом графика (время выделения накопленной энергии) для образцов уртита при величине бокового давления 10 МПа составило в среднем 6 с, при 20 МПа - 14 с, при 30 МПа - 24 с. Для образцов апатит-нефелиновой руды это время при величине бокового давления 10 МПа составило в среднем 15 с, при 20 МПа - 11 с, при 30 МПа - 12 с. Максимальное время выделения энергии определено для образца уртита – 39 с.

Во втором случае для не склонной к динамическим разрушениям породы (карбонатит) установлено, что накопленная энергия выделялась постепенно в течение длительного времени: время между максимальным значением дифференциального напряжения и величиной остаточной прочности для образцов карбонатита при боковом давлении 10 МПа составило в среднем 275 с, при 20 МПа - 260 с, при 30 МПа - 280 с. Максимальное время выделения энергии – 350 с.

В результате анализа значений остаточной прочности образцов выявлено, что для исследуемых пород величина этого параметра возрастала с увеличением компонентов тензора напряжений (Рис. 6). При этом разница между пределом прочности и остаточной прочностью для образцов карбонатита при боковом давлении равном 30 МПа составляла порядка 5 - 10 МПа (3 - 9%), тогда как для уртита и апатит-нефелиновой руды эти значения отличались в два-три раза (разница порядка 60 - 70 %). Следовательно, при разрушении образцов карбонатита количество выделившейся энергии оказалось значительно меньше, чем для других

двух типов исследуемых пород. Большая часть энергии осталась в образцах, сдерживаемая действием сжимающего бокового давления.

Таким образом, для скальных горных пород, склонных к динамическим разрушениям, характерно быстрое выделение накопленной в условиях трехосного сжатия (при боковом давлении до 30 МПа) упругой энергии (менее 40 с), а критическая удельная энергия деформирования будет в два и более раз превышать остаточную энергию в образцах после их разрушения. Для несклонных к динамическим разрушениям пород время выделения энергии в условиях трехосного сжатия будет более длительным (около 200 с и выше), а разница между величинами критической и остаточной энергии будет близка к нулю.

Для изучения условий накопления и выделения упругой энергии, а также оценки склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям при трехосном сжатии, проведены дополнительные испытания образцов пироксенита Ковдорского месторождения в Санкт-Петербургском Горном университете. Полученные графики деформирования приведены на рисунке 7.

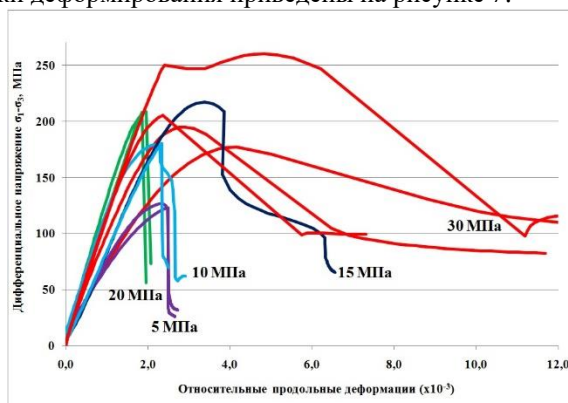


Рис. 7. Графики деформирования образцов пироксенита в условиях трехосного сжатия: фиолетовые линии - боковое давление 5 МПа, голубые линии - боковое давление 10 МПа, черная линия - боковое давление 15 МПа, зеленые линии - боковое давление 20 МПа, красные линии - боковое давление 30 МПа

В ходе анализа результатов испытаний образцов пироксенита установлено, что графики их деформирования при величинах бокового давления от 5 до 20 МПа после достижения предела прочности обрываются круто, как и в случае с уртитом и апатит-нефелиновой рудой. При боковом давлении 30 МПа графики деформирования образцов за пределом прочности начинают выполаживаться, а образцы разрушаются без динамических проявлений (без сильного звука). На основании сопоставления величин модуля спада и модуля упругости (критерий А.Н. Ставрогина) также установлено, что склонными к разрушениям в динамической форме являются образцы, нагружение которых происходило в условиях трехосного сжатия при величинах бокового давления от 5 до 20 МПа, а при $\sigma_{бок} = 30$ МПа образцы пироксенита уже не являются склонными к таким видам разрушения.

По результатам испытаний образцов уртита среднезернистого массивного в условиях трехосного сжатия при боковом давлении до 80 МПа установлено, что при величинах бокового давления свыше 50 МПа на графиках в окрестности пределов прочности (максимальных напряжений) появляются площадки, параллельные горизонтальной оси (Рис. 8), а разрушение образцов происходит с некоторой отсрочкой (порядка 30 - 50 с момента выхода на площадку деформирования). Также при боковом давлении 80 МПа прочность образцов возросла в четыре раза по сравнению с одноосным сжатием, а критическая удельная энергии деформирования – в четырнадцать раз. Следовательно, при высоких значениях горизонтальных составляющих тензора напряжений ($\sigma_2 = \sigma_3 = 80$ МПа) для образцов уртита наблюдается небольшой участок выполаживания графика деформирования на пределе прочности, после чего происходит его обрыв и разрушение образцов в динамическом режиме. В нашем случае создаваемых величин бокового давления недостаточно, чтобы привести к выполаживанию графика деформирования уртита за пределом прочности и, соответственно, уменьшить его склонность к разрушениям в динамической форме. Однако это может быть реализуемо, если значение создаваемого давления в трехосной камере будет свыше 80 МПа, что показано на примерах деформирования хрупких пород в работах Б.Г. Тарасова.

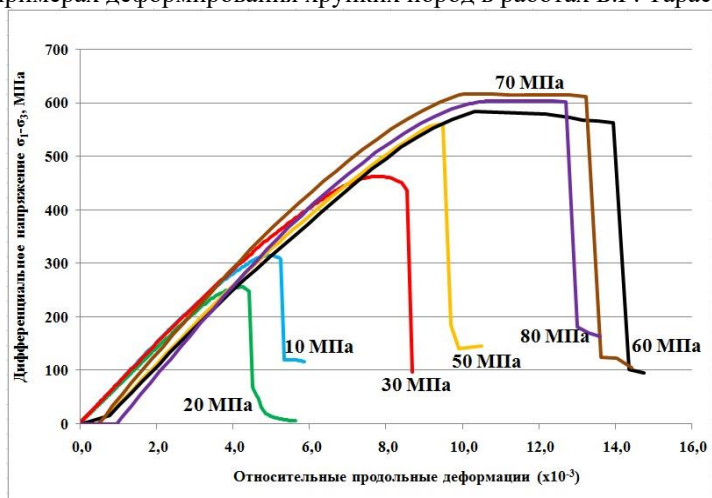


Рис. 8. Графики деформирования уртита среднезернистого массивного в условиях трехосного сжатия: голубая линия - боковое давление 10 МПа, зеленая линия - боковое давление 20 МПа, красная линия - боковое давление 30 МПа, оранжевая линия - боковое давление 50 МПа, черная линия - боковое давление 60 МПа, коричневая линия - боковое давление 70 МПа, фиолетовая линия - боковое давление 80 МПа

Таким образом, по результатам экспериментальных исследований образцов скальных горных пород установлено, что с переходом от условий одноосного сжатия к трехосному и при снижении контрастности между компонентами тензора напряжений уменьшается скорость выделения накопленной в процессе нагружения

энергии, а также снижается склонность пород к разрушениям в динамической форме. Это означает, что для целей экспресс-прогноза динамических разрушений наибольший интерес представляют режимы нагружения (испытания) пород с максимальной контрастностью компонентов тензора напряжений, т.е. одноосное нагружение, при котором неоднородность напряжённого состояния максимальна.

В связи с этим предложен следующий алгоритм выполнения оценки склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям:

1. Выполнить испытания образцов скальных горных пород при одноосном сжатии при соблюдении отечественных и зарубежных стандартов;

2. В ходе испытаний при одноосном сжатии регистрировать величины прикладываемой нагрузки, а также продольных деформаций с использованием тензодатчиков или экстензометров;

3. На основании экспериментальных данных построить графики зависимости «напряжение - деформация» до предела прочности образцов;

4. По графикам деформирования образцов вычислить значения их реальной (W_p) и идеально упругой ($W_{и.у.}$) энергий деформирования;

5. Выполнить оценку склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям по критерию:

- если характер деформирования образцов горных пород близок к пластическому (график деформирования имеет вогнутый вид), а накопленная энергия деформирования меньше расчетной упругой на величину свыше 10%, то порода не склонна к разрушениям в динамической форме.

- во всех остальных случаях, когда образцы деформируются упруго, породы склонны к разрушениям в динамической форме.

Предложенный алгоритм оценки склонности скальных пород к разрушениям в динамической форме целесообразно дополнять испытаниями в условиях трехосного сжатия для того, чтобы установить, при каком соотношении компонентов тензора напряжений породы перестанут быть склонными к таким разрушениям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная задача, связанная с исследованием энергоёмкости разрушения скальных горных пород для оценки их склонности к динамическим разрушениям (на примере месторождений Кольского региона). Основные научные выводы и практические результаты заключаются в следующем:

1. По результатам сопоставления энергоёмкости и характера разрушения исследуемых образцов скальных горных пород в условиях одноосного сжатия установлено, что при величине критической удельной энергии деформирования ниже $0,05 \text{ МДж/м}^3$ породы будут в меньшей степени склонными к динамическим разрушениям или не склонны вовсе. В случае, если критическая энергия горных пород будет превышать величину $0,05 \text{ МДж/м}^3$, то они будут склонны к динамическим видам разрушения. При этом наиболее опасными по таким видам разрушения будут породы со значениями энергии свыше $0,25 \text{ МДж/м}^3$.

2. На основании результатов испытаний образцов скальных горных пород (апатит-нефелиновая руда, уртит, ийолит, гнейс, туфогенно-осадочная порода и карбонатит) в условиях трехосного сжатия установлено, что с увеличением бокового давления будут также возрастать значения пределов прочности и критической удельной энергии деформирования пород. При боковом давлении порядка 20-30 МПа значения прочности по сравнению с одноосным сжатием увеличились в два-три раза, а критической энергии - в пять-десять раз. Для образцов уртита среднезернистого массивного при боковом давлении 80 МПа прочность возросла в четыре раза по сравнению с одноосным сжатием, а критическая энергия – в четырнадцать раз.

3. Разработан упрощенный критерий оценки склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям по результатам испытаний в условиях одноосного сжатия до предела прочности, выполняемых на обычных испытательных машинах по стандартным методикам:

- если характер деформирования образцов горных пород близок к пластическому (график деформирования имеет вогнутый вид), а накопленная энергия деформирования меньше расчетной упругой на величину свыше 10%, то порода не склонна к разрушениям в динамической форме. В этом случае потеря устойчивости горных выработок будет происходить преимущественно в виде образования отдельных вывалов, ограниченных поверхностями структурных неоднородностей различного ранга.

- во всех остальных случаях, когда образцы деформируются упруго, породы склонны к разрушениям в динамической форме, а при проведении горных работ нельзя исключить реализацию разрушений типа горных ударов.

4. В результате исследований установлено, что наиболее склонными к динамическим разрушениям из испытанных пород Хибинских апатит-нефелиновых месторождений являются уртиты, несколько менее склонны ийолиты и апатит-нефелиновые руды; из пород Заимандровского железорудного района - гнейсы; из пород Ковдорского месторождения: склонны - апатит-карбонатно-магнетитовые руды и совершенно не склонны - карбонатиты.

5. По результатам экспериментальных исследований образцов скальных горных пород месторождений Хибинского и Ковдорского массивов в условиях трехосного сжатия установлено, что склонность к динамическим разрушениям апатит-нефелиновой руды и уртита среднезернистого массивного сохраняется при величинах бокового давления от 0 до 30 МПа, а кальцитовый карбонатит в этих условиях не проявляет склонности к таким разрушениям.

6. Анализ условий разрушения скальных горных пород в динамической форме показал, что основными влияющими факторами являются величина накопленной упругой энергии и скорость ее выделения при разрушении образцов:

- критическая удельная энергия деформирования для скальных горных пород, склонных к разрушениям в динамической форме при трехосном сжатии, будет всегда выше значения критической энергии для несклонных к таким разрушениям пород: величина этого параметра для уртита и апатит-нефелиновой руды в среднем больше, чем для карбонатита, в 7 и 5 раз соответственно при боковом давлении 30 МПа;

- для скальных горных пород, склонных к динамическим разрушениям, характерно быстрое выделение накопленной в условиях трехосного сжатия (при боковом давлении до 30 МПа) упругой энергии (менее 40 с), а критическая удельная энергия деформирования в два и более раз превышает остаточную энергию в образцах после их разрушения. Для несклонных к динамическим разрушениям пород время выделения энергии в условиях трехосного сжатия более длительное (около 200 с и выше), а разница между величинами критической и остаточной энергии близка к нулю.

7. На основе экспериментальных исследований разработан алгоритм определения склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям в условиях одноосного и трехосного сжатия.

8. Установлено, что с возрастанием различия между величинами компонент напряжений скорость выделения накопленной в процессе нагружения энергии и склонность скальных пород к динамическим разрушениям увеличиваются, а при выравнивании значений компонент действующих напряжений - уменьшаются. Поэтому горные удары происходят, как правило, на контуре выработок, а техногенные землетрясения - на границах структур.

Основные положения диссертации, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Лодус, Е. В. Анализ прочностных характеристик скальных горных пород в условиях трехосного осесимметричного сжатия / Е. В. Лодус, А. К. Пак, **Н. Н. Кузнецов** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – №6. – С. 233–242.

2. **Кузнецов, Н. Н.** О влиянии отношения размеров образцов скальных горных пород на результаты определения их прочности при одноосном сжатии / Н. Н. Кузнецов, А. К. Пак // Вестник МГТУ. – 2014. – Т. 17. – № 2. – С. 246–253.

3. **Кузнецов, Н. Н.** К вопросу об определении количества опытов, надежности и точности результатов при изучении физико-механических свойств горных пород / Н. Н. Кузнецов // Вестник МГТУ. – 2015. – Т. 18. – № 2. – С. 183–191.

4. Потапов, Д. А. Оценка устойчивости борта карьера «Куркенпахк» АО «ОЛКОН» при помощи программных комплексов «GALENA 6.0» и «SVSLOPE 2D» / Д. А. Потапов, А. С. Калюжный, **Н. Н. Кузнецов** // Глубокие карьеры: Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № S56. – С. 175–182.

5. **Кузнецов, Н. Н.** Исследование характера деформирования и энергоемкости разрушения образцов скальных пород Ковдорского месторождения / Н. Н. Кузнецов, А. К. Пак, Ю. В. Федотова // Глубокие карьеры: Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № S56. – С. 286–292.

6. **Кузнецов, Н. Н.** Применение средств компьютерного моделирования при исследованиях специфики напряженного состояния Хибинского массива с учетом фаз его образования / Н. Н. Кузнецов, Ю. В. Федотова // Информационные технологии в реализации экологической стратегии развития горнодобывающей отрасли: Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – №10. – С. 325–332.

7. Козырев, А. А. Оценка степени удароопасности скальных горных пород на основе результатов лабораторных испытаний / А. А. Козырев, Э. В. Каспарьян, Ю. В. Федотова, **Н. Н. Кузнецов** // Вестник МГТУ. – 2019. – Т. 22. – № 1. – С. 138–148.

8. Козырев, А. А. Определение степени удароопасности скальных горных пород по результатам испытаний при одноосном сжатии / А. А. Козырев, **Н. Н. Кузнецов**, Ю. В. Федотова, А. Н. Шоков // Известия вузов. Горный журнал. – 2019. – № 6. – С. 41–50.

9. Каспарьян, Э. В. Исследование условий динамических разрушений в массивах скальных пород / Э. В. Каспарьян, **Н. Н. Кузнецов**, А. Н. Шоков, А. К. Пак // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – №4. – С. 69–84.

Основные положения диссертации, опубликованные в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus:

1. Kozyrev, A. A. Study of apatite-nepheline ore and urtites properties by using shear test device / A. A. Kozyrev, E. V. Lodus, **N. N. Kuznetsov** // Proceedings of the 23rd International Mining Congress and Exhibition of Turkey IMCET 2013. – Antalya, Turkey. – 2013. – P. 619–625.

2. Fedotova, Iu. Specificity of hard rock failure under uniaxial compression / Iu. Fedotova, **N. N. Kuznetsov** // Proceedings of the 64th Geomechanics Colloquium EUROCK 2015. – Salzburg, Austria. – 2015. – P. 559–564.

3. Fedotova, Iu. V. Specific strain energy assessment of hard rocks under different loading modes / Iu. V. Fedotova, **N. N. Kuznetsov**, A. K. Pak // ISRM European Mechanics Symposium EUROCK 2017, Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 191. – P. 317–323.

4. Fedotova, Iu. V. Influence of different-scale fractures on energy state of hard rock mass / Iu. V. Fedotova, E. V. Kasparyan, **N. N. Kuznetsov** // Proceedings of 17th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM2017. – Albena, Bulgaria. – 2017. – Vol. 17. – Iss. 21. – P. 935–942.

5. **Kuznetsov, N.** Study of physical-mechanical properties of hard rocks under water-saturated conditions / N. Kuznetsov, Iu. Fedotova, A. Pak // Proceedings of the 2018 European rock mechanics Symposium EUROCK 2018 (Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses). – London: Taylor & Francis Group. – 2018. – P. 653–658.

6. **Kuznetsov, N. N.** Influence of different geological structures on stress-strain state of hard rock mass / N. N. Kuznetsov, Yu. V. Fedotova // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2018. – Vol. 134. – URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/134/1/012035/meta>. – Текст: электронный.

7. **Kuznetsov, N. N.** Strain and energy parameters of burst-prone rocks: study and analysis / N. N. Kuznetsov, I. V. Fedotova, A. K. Pak // Proceedings of the 3rd International Conference on Rock Dynamics and Applications RocDyn-3. – London: Taylor & Francis Group. – 2018. – P. 281–284.

8. Zemtcovskii, A. V. Determination of the specific rock failure energy at various structural-scale levels / A. V. Zemtcovskii, **N. N. Kuznetsov**, K. N. Konstantinov //

Proceedings of the 3rd International Conference on Rock Dynamics and Applications RocDyn-3. – London: Taylor & Francis Group. – 2018. – P. 285–290.

9. Kozyrev, A. A. The estimation of rockburst hazard for hard rocks by the test results below and beyond the compressive strength / A. A. Kozyrev, **N. N. Kuznetsov**, Iu. V. Fedotova, A. N. Shokov // Proceedings of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering ISRM 2019. – Foz do Iguassu, Brazil. – 2019. – P. 1792–1798.

10. Fedotova, Iu. Estimating the rockburst hazard of hard rocks based on laboratory test results / Iu. Fedotova, **N. Kuznetsov**, E. Kasparyan // E3S Web of Conference. – 2019. – Vol. 129. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/55/e3sconf_ghcrrm2019_01010/e3sconf_ghcrrm2019_01010.html. – Текст: электронный.

11. Kozyrev, A. The specificities of deformations and failures of highly stressed hard rock massifs / A. Kozyrev, E. Kasparyan, Iu. Fedotova, **N. Kuznetsov** // E3S Web of Conference. – 2019. – Vol. 129. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/55/e3sconf_ghcrrm2019_01008/e3sconf_ghcrrm2019_01008.html. – Текст: электронный.

Патенты на изобретение:

1. Патент № 2499245 Российская Федерация, МПК G01N 3/34 (2006.01). Устройство для испытания образцов материалов при многократном возбуждении затухающих колебаний нагрузки: № 2012115906/28: заявл. 19.04.2012: опубликовано 20.11.2013 / Козырев А. А., **Кузнецов Н. Н.**, Лодус Е. В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук. – 5 с.: ил. – Текст: непосредственный.

2. Патент № 2544871 Российская Федерация, МПК G01N 3/10 (2006.01), МПК G01N 3/24 (2006.01). Стенд для исследования процесса энергообмена в образцах горных пород: № 2013127965/28: заявл. 18.06.2013: опубликовано 20.03.2015 / Козырев А. А., Лодус Е. В., **Кузнецов Н. Н.**, Пак А. К.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук. – 7 с.: ил. – Текст: непосредственный.