

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
"КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК"
(ФИЦ КНЦ РАН)
ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ
(ГоИ КНЦ РАН)

На правах рукописи

Кузнецов Николай Николаевич

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

Специальность 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная
аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Заслуженный деятель науки
Российской Федерации, профессор,
доктор технических наук
Козырев Анатолий Александрович

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	11
1.1. Актуальность проблемы исследования процессов энергообмена в массиве горных пород... 11	11
1.2. Изученность взаимосвязи энергетических процессов и удароопасности участков массива горных пород	15
1.3. Анализ методов исследования энергетических процессов и энергоемкости разрушения горных пород на образцах	25
1.4. Энергетические критерии оценки склонности горных пород к динамическим разрушениям (удароопасности).....	32
1.5. Обоснование цели и задач исследования.....	39
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ЭНЕРГОЕМКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ СКАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОЛЬСКОГО РЕГИОНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ	42
2.1. Объекты исследования	43
2.2. Обобщенная методика определения механических свойств и энергоемкости разрушения скальных горных пород в условиях одноосного и трехосного напряженного состояния	45
2.2.1. Методика определения механических свойств и энергоемкости разрушения скальных горных пород в условиях одноосного напряженного состояния.....	47
2.2.2. Методика определения механических свойств и энергоемкости разрушения скальных горных пород в условиях трехосного напряженного состояния	54
2.2.3. Обработка результатов испытаний образцов скальных горных пород.....	57
2.3. Результаты исследований механических свойств и энергоемкости разрушения скальных горных пород месторождений Кольского региона в условиях одноосного напряженного состояния	58
2.4. Результаты исследований механических свойств и энергоемкости разрушения скальных горных пород месторождений Кольского региона в условиях трехосного напряженного состояния	72
Выводы по главе 2.....	78
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ СКЛОННОСТИ СКАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД К ДИНАМИЧЕСКИМ РАЗРУШЕНИЯМ В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ	81
3.1. Оценка склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям по результатам испытаний при одноосном сжатии (упрощенная методика).....	83
3.2. Оценка склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям по результатам анализа полного графика деформирования (методика А.Н. Ставрогина)	91
3.3. Сопоставление результатов оценки склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям (упрощенная методика и методика А.Н. Ставрогина).....	97
Выводы по главе 3.....	98
ГЛАВА 4. ОЦЕНКА СКЛОННОСТИ СКАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД К ДИНАМИЧЕСКИМ РАЗРУШЕНИЯМ В УСЛОВИЯХ ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ.....	101
4.1. Определение склонности скальных горных пород Хибинского и Ковдорского массивов к динамическим разрушениям в условиях трехосного сжатия.....	102

4.2. Анализ условий динамического разрушения скальных горных пород при трехосном сжатии	110
4.3. Общий алгоритм оценки склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям	120
Выводы по главе 4.....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	125
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ А	145

ВВЕДЕНИЕ

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. Протождяконов, 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.

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

Основная идея 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 исследований:

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 исследований. 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.

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.

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.

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

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, обрабатываемых 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:

- Регламенте 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.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Актуальность проблемы исследования процессов энергообмена в массиве горных пород

Процессы разрушений материалов всегда были в центре внимания исследователей, но при этом большая часть выполненных работ была посвящена непосредственно определению параметров, при которых происходит разрушение. Наиболее широко использовались характеристики - предельные значения напряжений (пределы прочности) или деформаций.

В своё время были предложены различные теории прочности [классические теории - наибольших нормальных напряжений – Галилея (1638 г.), наибольших деформаций – Мариотта (1682 г.), наибольших касательных напряжений – Ш. Кулона (1773 г.)], которые позволяли прогнозировать разрушение материалов и тем самым предрассчитывать устойчивость и долговечность конструкций из используемых материалов.

Существенно позднее были предложены теории прочности, в которых совместно рассматривались напряжения и деформации, т.е. фактически рассматривались комплексные критерии – потенциальная энергия или, численно ей равная, удельная работа деформаций.

Наиболее известная теория прочности этого типа – энергетическая теория Губера-Мизеса (1904-1925 гг.), учитывающая не всю потенциальную энергию деформирования, а только ту её часть, которая пошла на изменение формы элементарных объёмов материала.

Советскими учёными Н.Н. Давиденковым и Я.Б. Фридманом была предложена объединённая теория прочности, обобщающая современные воззрения на природу прочности твёрдых тел в их хрупком или пластичном состоянии [115].

Прогнозированию режима разрушения каких-либо материалов уделялось меньшее внимание, за исключением вопросов в области горного дела, связанных с прогнозом горных ударов – фактически, разрушений горных пород в динамической

форме. Учитывая большую опасность этих явлений, условия их возникновения исследуются уже на протяжении около 200 лет [1].

К настоящему времени установлено, что разрушения в динамических формах, а, следовательно, и горные удары, могут происходить при одновременном выполнении двух условий: достаточной степени напряжённости массива пород и способности пород, слагающих массив, накапливать упругую энергию деформирования. В частности, именно по результатам оценок указанной склонности пород к аккумуляции энергии деформирования и определяется степень удароопасности того или иного массива пород.

В современном мире понятие "энергия" широко распространено почти во всех областях деятельности человека. Она имеет множество форм (механическая, электрическая, термическая и т.д.) и видов (кинетическая, потенциальная, энергия диссипации и т.д.) [39]. Впервые понятие "энергия" было употреблено в работах Аристотеля [9] и обозначало деятельность человека. В дальнейшем оно претерпело ряд смысловых изменений, где было использовано в основном для обозначения некой "живой силы", связывающей массу и скорость [156]. В современном смысле термин "энергия" впервые использовал Томас Юнг в 1807 году, однако только в начале двадцатого века появилась более точная его формулировка [156].

На вопрос, что же такое энергия, можно дать следующий ответ.

Энергия - свойство системы, которое является общей мерой различных форм движения и взаимодействия материи, а также мерой перехода движения материи из одних форм в другие [118]. Следовательно, исходя из данного определения энергии, главным ее аспектом является движение и взаимодействие материи.

В геомеханике основным объектом исследований является иерархично-блочный массив горных пород [12, 33, 35, 36, 45, 91, 93, 95, 110]. Движение и взаимодействие блоков в массиве, обуславливающие энергетические процессы в нем, связаны со многими факторами, как внешними космическими, так и внутренними (Рис. 1.1). К первой группе факторов относятся: неравномерности скорости прохождения орбиты и вращения геоида вокруг наклонной оси, миграция магнитных полюсов и т.д. [2-4, 16, 36, 63, 82, 94, 98]. К внутренним относятся неравномерность структуры Земли, которая обуславливает различные скорости

конвективных потоков, движение плит, миграцию плюмов и т.д. [5, 27, 49, 82, 109, 130, 147].

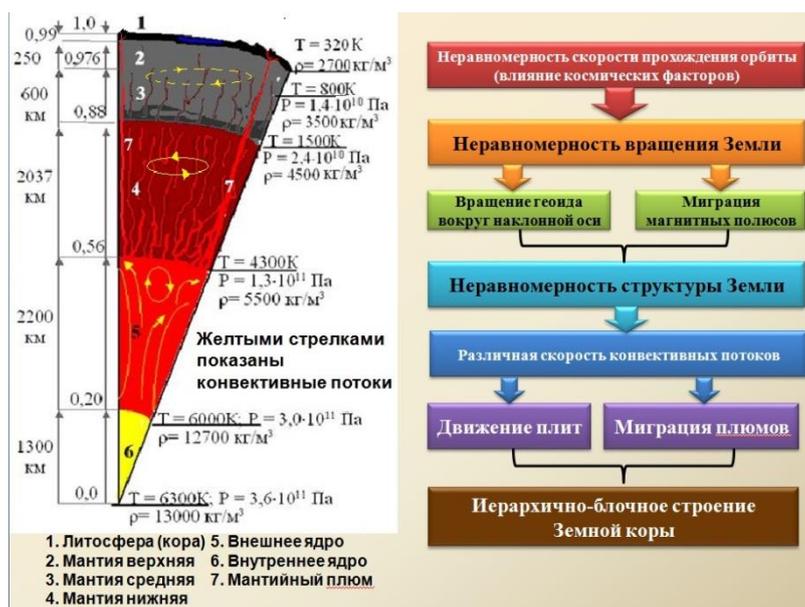


Рис. 1.1. Строение Земли и факторы, влияющие на движение и взаимодействие блоков массива горных пород

Помимо рассмотренных факторов также немаловажным является влияние деятельности человека, способствующей изменению энергетического состояния отдельных участков иерархично-блочных массивов горных пород. Одним из наиболее активных воздействий является интенсивное ведение горных работ, в ходе которых происходят постоянные процессы нагрузки и разгрузки отдельных участков массивов [7, 13, 15, 16, 35, 41, 44, 51, 55, 58, 59, 65, 67, 73, 76, 97, 114, 119, 122, 134, 143].

Движение и взаимодействие блоков массива горных пород обуславливают перераспределение энергетических параметров в них, в результате чего происходит так называемый процесс "энергообмена" между блоками. Собственно, энергообмен, согласно [38], является функцией процесса переноса энергоносителей (тела, молекулы, волны и т.д.) как внутри системы, так и из одной системы в другую. Если рассматривать Земную кору как отдельную большую энергетическую систему, то главными энергоносителями в ней будут блоки массива горных пород. При этом основным видом обмениваемой между блоками энергии является потенциальная. Она характеризует способность некоего тела (или материальной точки) совершать работу за счет своего нахождения в поле действия сил [56].

Применительно к высокоупругим массивам скальных пород часто используют термин упругая энергия, которая является частным случаем потенциальной. То есть, упругая энергия это потенциальная энергия упругой деформации тела, равная работе этой деформации [68].

Таким образом, за счет действия внутренних и внешних факторов в Земной коре происходят процессы обмена потенциальной энергией между блоками массива горных пород. При этом процесс энергообмена на разных масштабных уровнях протекает с различной интенсивностью. В результате возникают ситуации, когда приток энергии из одного блока превышает способность другого блока поглощать эту энергию (когда скорость подвода энергии превышает скорость ее диссипации), возникают процессы различного рода разрушений. Следовательно, накопленная в блоках энергия будет реализовываться в виде образования трещин и систем трещин, что в ряде случаев приводит к формированию разломных структур [11]. При этом накопленная энергия будет преобразовываться в ходе разрушения горных пород в следующие виды энергии: кинетическую, сейсмическую и тепловую [102].

Кинетическая энергия является мерой движения материальных точек, образующих механическую систему, и зависит только от масс и модулей скоростей этих точек [6]. В массиве горных пород, имеющем свободные поверхности, кинетическая энергия реализуется, главным образом, в виде динамических разрушения (стреляние, динамическое заколообразование).

Сейсмическая энергия возникает за счет колебательных процессов, вызванных разрушением участка массива горных пород, и распространяется от этого участка в виде упругих сейсмических волн [103].

Тепловая энергия - одна из форм энергии, возникающая в результате механических колебаний структурных элементов какого-либо вещества [10].

Рассмотренные виды энергии представляют огромный научный интерес и являются основными в уравнениях энергетического баланса [102]. Тем не менее, с практической точки зрения, наиболее важным является изучение предельных накопленных величин энергии, при которых наступает разрушение горных пород в массиве. В связи с этим было введено понятие "энергоемкость".

Энергоемкость - способность потребления энергии при выполнении определенного вида работ [86]. Величину энергоемкости разрушения горных пород, в этом случае, можно охарактеризовать величиной потребляемой энергии при разрушении определенного вида пород тем или иным способом. На данный момент разработано множество подходов, позволяющих определять параметры энергоемкости пород при их взрывании [28, 50, 64, 70, 108], резании [18, 26, 89, 148], дроблении [28, 30, 90, 100], бурении [26, 28, 74, 108, 116] динамическом скалывании [31, 71, 105] и т.д.

Особое место в этих исследованиях занимают испытания образцов горных пород на прессах, позволяющие устанавливать предельные величины энергии при различных режимах нагружения [8, 19, 59, 83, 101, 102]. На основании полученных значений проводят оценку энергетического состояния иерархично-блочной геологической среды. Считается, что геологическая среда находится в энергонасыщенном состоянии тогда, когда плотность упругой энергии этой среды превышает установленные пороговые значения [85]. Само понятие "энергонасыщенное состояние" обозначает сильно неравновесное, метастабильное состояние, близкое к потере устойчивости [85]. В том случае, когда блоки геологической среды находятся в энергонасыщенном состоянии, в них возможна реализация различных видов динамических разрушений.

Таким образом, знание процессов энергообмена в иерархично-блочных массивах горных пород и степени энергонасыщенности участков таких массивов может являться одним из основных способов прогноза разрушений горных пород в динамической форме при разработке удароопасных месторождений.

1.2. Изученность взаимосвязи энергетических процессов и удароопасности участков массива горных пород

В вопросах исследования проявлений горных ударов важное место занимает понятие энергии упругой деформации (упругой энергии). Массив горных пород представляет собой иерархично-блочную среду, блоки которой находятся в постоянном взаимодействии друг с другом и обмениваются упругой энергией. В результате в них происходит ее накопление либо высвобождение за счет

разрушения участков массива, которое, при наличии выработок, проявляется в виде различных динамических проявлений горного давления - от шелушения и стрельяния до горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений.

Одни из первых упоминаний о связи энергии упругого деформирования с процессами разрушения в массиве горных пород были представлены в трудах [1, 78, 124]. Позднее данные по проблеме были систематизированы И.М. Петуховым в работе [80]. В ней автор отмечает, что горный удар является результатом разрядки энергии упругого деформирования. При этом она не полностью расходуется на кинетическую составляющую горного удара. Часть энергии проявляется в виде упругих волн, а часть идет на развитие необратимых процессов деформирования и разрушения. Также И.М. Петуховым была сделана попытка оценить суммарную энергию горного удара, которая записывалась в виде (1.1):

$$W = W_y + W_n, \quad (1.1)$$

где W_y – потенциальная энергия, заключенная в пласте горных пород, W_n – потенциальная энергия в окружающем массиве горных пород.

Величина энергии W_y определялась согласно формуле (1.2), а W_n по формуле (1.3):

$$W_y = \frac{\sigma_{cp}^2}{2E} V_y, \quad (1.2)$$

$$W_n = \frac{1}{2} \sigma_{cp} S l_o, \quad (1.3)$$

где σ_{cp} – среднее напряжение в пласте, E – модуль упругости горной породы, V_y – объем горной породы, разрушившейся при горном ударе, S – площадь разрушенного целика, l_o – расстояние сближения боковых пород при горном ударе.

Исследования И.М. Петухова были продолжены Г.Л. Фисенко. Он отмечал [114], что степень удароопасности массива горных пород и сила горных ударов зависят от потенциальной упругой энергии, накопленной в горных породах. Она расходуется на дробление породы, колебание определенного объема массива, преодоление сил трения по перемещению массива с боковыми породами и воздухом и кинетическую энергию разрушения этого массива. Также Г.Л. Фисенко отмечал, что чем шире будет область предельно напряженного массива горных пород, тем больше потенциальной упругой энергии будет накоплено в нем и тем

больше будет израсходовано ее на кинетическую энергию разрушения этой области.

Один из способов прогнозирования проявлений горного давления в выработках на основании оценки энергетических параметров массива горных пород был предложен В.Т. Глушко и В.В. Виноградовым [19]. Он заключался в сопоставлении количества энергии, необходимой для разрушения некоторой части массива, с количеством энергии, выделившейся при таком разрушении из остального массива. По результатам исследований авторами было установлено, что работа, затраченная на неупругое деформирование горных пород, имеет наибольшее значение для идеально пластических материалов и значительно превышает количество потенциальной энергии, выделяемой при образовании зоны разрушения. При возрастании хрупкости пород величина работы уменьшается и происходит процесс неполного поглощения выделившейся энергии, остаток которой идет на дальнейшее развитие разрушения. В этом случае создаются условия для возникновения самоподдерживающегося разрушения.

Также был установлен критерий перехода энергии упругих деформаций массива в кинетическую [19]: $\Delta W > U$, то есть величина упругой энергии должна быть больше, чем потери, связанные с деформированием горных пород в зоне неупругих деформаций. При этом отмечалось, что переход накопленной в массиве потенциальной энергии в кинетическую во многом зависит от склонности горных пород к хрупкому разрушению - чем более склонны, тем больше будет реализовано энергии в виде кинетической.

В более поздних работах И.М. Петуховым и А.М. Линьковым [83] было уточнено уравнение энергетического баланса при горном ударе для угольных месторождений (1.4).

$$W_g + W_M + (-\Delta \mathcal{E}) = W_p + \Delta K + W_B + W_C + W_B, \quad (1.4)$$

где W_g – энергия, выделяющаяся в результате поступления газа (рассматривается только при газодинамических выбросах); W_M – энергия, заключенная в разрушаемом материале (энергия упругих деформаций); $\Delta \mathcal{E}$ – энергия, поступающая из вмещающих пород; W_p – энергия, затрачиваемая на разрушение материала; ΔK – кинетическая энергия разлетающихся кусков материала; W_B –

энергия, поглощаемая боковыми породами; W_C – энергия сейсмических колебаний; W_B – энергия ударной воздушной волны.

Энергия упругих деформаций W_M , запасенная в некотором объеме разрушаемого материала V_M , вычисляется путем интегрирования по этому объему (1.5). Величина энергии W_M возрастает с увеличением прочности и мощности пласта [83].

$$W_M = \int_{V_M} E_e dV, \quad (1.5)$$

где E_e – энергия упругой деформации единицы объема.

Приток энергии из вмещающих пород $\Delta\mathcal{E}$, происходящий при увеличении размеров выработанного пространства, представляет собой работу, которая совершается силами, действующими на приращении вновь образованной поверхности (S). Его можно представить в виде поверхностного интеграла [83]:

$$-\Delta\mathcal{E} = - \int_S (\int_{u_1}^{u_2} \sigma_n du) dS, \quad (1.6)$$

где σ_n и u – компоненты напряжений и смещений соответственно.

По результатам сравнений величин притока энергии из вмещающих пород с величинами энергии упругих деформаций Петуховым и Линьковым было установлено [83], что для различных реальных ситуаций первый вид энергии оказывался больше второго. При этом для выработок с малыми пролетами значения этих энергий имели один и тот же порядок.

Энергия, затрачиваемая на разрушение материала W_p , может быть оценена при помощи следующей формулы (1.7). В случае горного удара формула (1.7) преобразуется в (1.8).

$$W_p = gS_p, \quad (1.7)$$

$$W_p = 2g_0\Delta S_1, \quad (1.8)$$

где g – эффективная поверхностная энергия, S_p – суммарная поверхность частиц разрушенного материала, g_0 – энергия, поглощаемая на единице сечения разрушаемого материала, ΔS_1 – увеличение поверхности почвы выработки.

Средняя кинетическая энергия разлета кусков материала ΔK при горном ударе определяется следующей формулой (1.9).

$$\Delta K = \rho_1 V_p \frac{v_p^2}{2}, \quad (1.9)$$

где ρ_l - плотность разрушаемого материала, V_p - объем разрушаемого материала, v_p - скорость разлета разрушенного материала.

Энергию, поглощаемую боковыми породами W_B , можно установить из уравнения энергетического баланса (1.4), определив все остальные входящие в него члены.

Иной способ определения ее величины связан с большими трудностями из-за отсутствия данных о распределении кинетической энергии между вмещающими породами и разрушаемым материалом [83].

Необходимое условие для начала процесса разрушения в массиве горных пород, согласно [83], может быть записано следующим образом (1.10).

$$W_g + W_M + (-\Delta E) - W_p > 0 \quad (1.10)$$

В том случае, когда это неравенство не выполняется, то есть сумма энергий в левой части уравнения за вычетом энергии разрушения в результате оказывается меньше нуля, то имеющихся запасов энергии недостаточно для возникновения процессов разрушения в массиве.

В работе [83] выделено, что основными причинами, приводящими к появлению избыточной энергии, являются: неоднородность механических свойств и условий нагружения, возрастание модуля спада с ростом запределных деформаций, убывание жесткости вмещающих пород при их разрушении. Первая причина может обуславливать самопроизвольное разрушение горных пород в динамической форме. Вторая причина играет особую роль при динамических нагрузках, когда дополнительные деформации не успевают охватить всю зону, и приток энергии локализуется у мест разрушения. В этом случае жесткость пласта увеличивается из-за неспособности деформируемого материала поглощать энергию. В результате ее избыток реализуется в виде динамического разрушения горных пород. Третья причина связана с изменением свойств нагружающей системы, когда ее величины модуля упругости и жесткости уменьшаются, а податливость увеличивается (примером является деформирование целиков). В этом случае происходит мягкий режим нагружения, который также приводит к динамическому разрушению горных пород.

В работе Е.В. Лодуса [59] в качестве основного источника формирования запасов энергии упругих деформаций W_M в блоках массива горных пород

выступает их сложное напряженное состояние, за счет которого происходят непрерывные процессы перераспределения энергии в таких блоках (энергообмен). Ведение горных работ приводит к ускорению процессов энергообмена в массиве горных пород, в результате чего реализуются динамические разрушения. Для их возникновения требуется определенное количество энергии (W_p - для разрушения от сжимающих нагрузок, W_c - для взаимного смещения от сдвигающих нагрузок). Согласно Е.В. Лодусу [59] динамическое разрушение горных пород будет происходить в том случае, когда запасенная энергия в массиве W_m будет превышать сумму энергетических затрат на разрушение и смещение (1.11).

$$W_m > W_p + W_c, \quad (1.11)$$

В работе [146] на основании результатов исследований авторов [121, 124, 132, 151] были составлены уравнения баланса упругой и неупругой энергий в массиве горных пород вокруг одиночной выработки. В первом случае уравнение энергетического баланса выглядит следующим образом:

$$W_t + U_m = U_c + W_s + W_r, \quad (1.12)$$

$$W_r = U_m + W_k, \quad (1.13)$$

где W_t - изменение потенциальной энергии вокруг выработки, U_m - накопленная упругая энергия в горной породе, U_c - изменение накопленной упругой энергии вокруг выработки, W_s - накопленная энергия в крепи, W_r - выделившаяся энергия, W_k - кинетическая энергия, представленная в виде сейсмических вибраций в массиве горных пород.

Наглядно компоненты энергетического баланса упругой модели представлены на рисунке 1.2.

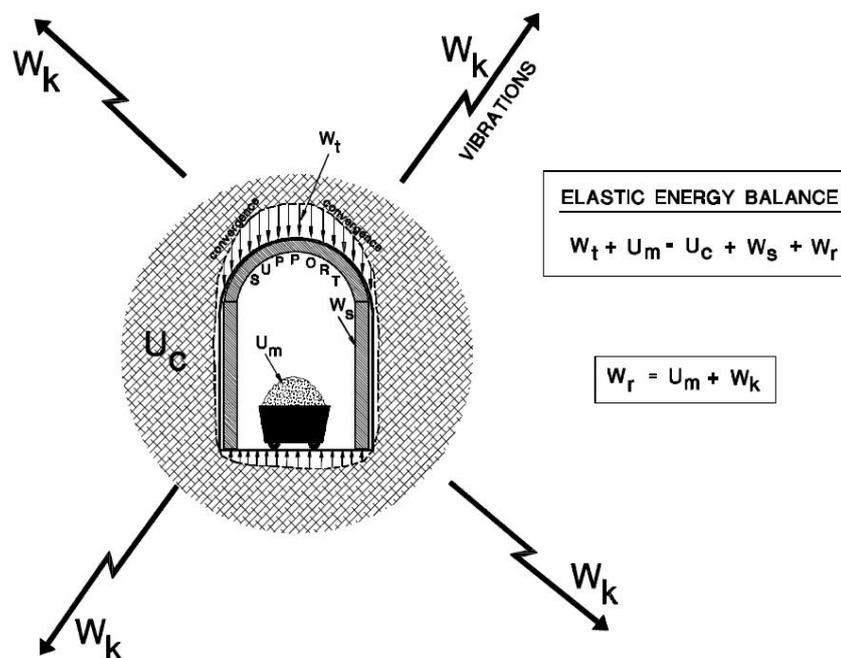


Рис. 1.2. Схема баланса упругой энергии вокруг одиночной выработки
(по [146])

Для схемы на рисунке 1.2, согласно [146], основная часть выделившейся энергии W_r затрачивается на процессы трения и разрушения взорванной горной породы, а также на создание вторичной системы трещин в окружающем породном массиве. При этом количество выделившейся сейсмической энергии составляет малую часть от W_r . Горные удары в этом случае могут произойти при создании и проходке выработки за счет перераспределения напряжений и разрушения окружающего массива горных пород.

Для упруго-пластического поведения массива горных пород было предложено следующее уравнение энергетического баланса [146]:

$$W_t + U_m = U_c + W_s + W_r + W_j + W_p, \quad (1.14)$$

$$W_k = W_{k_1} + W_{k_2}, \quad (1.15)$$

где W_j .- энергия, рассеянная при трении (если в модели присутствуют трещины), W_p .- энергия, рассеянная при пластическом деформировании ненарушенной горной породы, W_{k_1} .- кинетическая энергия в виде вибраций, вызванных проходкой выработки, W_{k_2} .- кинетическая энергия, выделившаяся в результате неустойчивого разрушения пород вокруг выработки.

Компоненты энергетического баланса упруго-пластической модели представлены на рисунке 1.3.

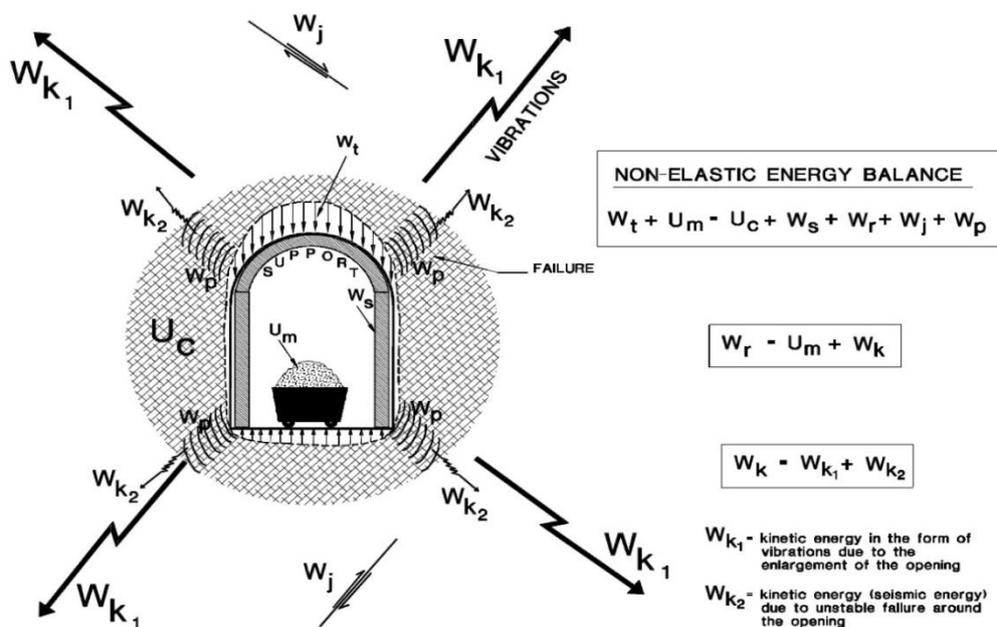


Рис. 1.3. Схема баланса неупругой энергии вокруг одиночной выработки (по [146])

Упруго-пластическая модель поведения горных пород, согласно [146], позволяет уйти от жестких ограничений упругой модели и исследовать проблему горных ударов с учетом масштаба их проявлений. Однако сам процесс анализа усложняется за счет появления новых компонентов энергетического баланса и прочностных свойств, различных до и после разрушения.

В работе [81] была предпринята попытка оценить силу горного удара при помощи коэффициента динамичности K_d (1.16), значение которого принималось из интервала от 0 до 10. При этом полагали, что динамическое разрушение горных пород может произойти в том случае, когда $K_d > 0$.

$$K_d = W_{вн}/W_p, \quad (1.16)$$

где $W_{вн}$ - величина притока энергии из окружающего массива, W_p - энергия, необходимая для разрушения пород в очаге горного удара.

Также в работе [81] было уточнено уравнение для подсчета запаса полной потенциальной энергии, участвующей в горном ударе (1.17).

$$W = W_y/W_n, \quad (1.17)$$

где W_y - потенциальная энергия, накопленная в угольном пласте, W_n - потенциальная энергия в массиве горных пород.

Схема энергетического баланса при горном ударе в работе [81] была представлена в виде графика зависимости "напряжение (P)-деформация (ϵ)" (Рис. 1.4). Полная диаграмма для разрушения участка массива горных пород в условиях обычного энергопоглощения обозначена областью ОАБ, а диаграмма реализации энергии из окружающих пород - линией АС. Нагружающая система при достижении предела прочности разрушаемого участка массива горных пород накапливает энергию, равную по величине площади треугольника АВС на рисунке 1.4. При этом сам участок массива способен поглотить энергию, величина которой равна площади треугольника АБВ. Таким образом, возникает избыток энергии, обозначенный областью АВС, который и реализуется в виде горного удара.

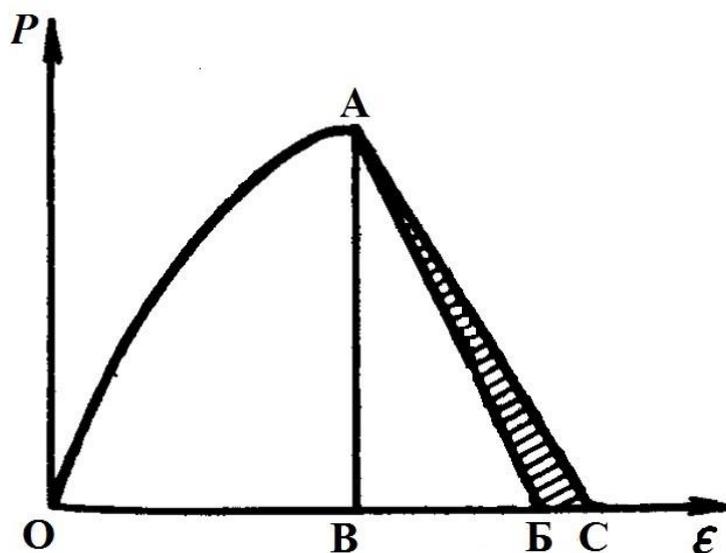


Рис. 1.4. Диаграмма энергетического баланса при горном ударе (по [81])

Согласно классификации в [81], горные удары представляют собой динамические явления, в баланс энергии которых входят энергия, накопленная самим разрушающимся участком массива горных пород и энергия, накопленная окружающими породами. Также отмечается, что горные удары преимущественно возникают на участках массива горных пород, находящихся в предельно напряженном состоянии при условии, что скорость изменения этого состояния превышает скорость релаксации напряжений. Геодинамические явления, в целом,

являются результатом обмена энергией в иерархично-блочном массиве горных пород, деформирующегося в условиях существующего или возникающего предельно напряженного состояния. Классы геодинамических явлений могут быть определены характером и степенью энергетического взаимодействия природной и техногенной систем напряженно-деформированного состояния в местах их проявлений.

В работе [138] выделено три основных источника энергии, приводящих к динамическому разрушению обрабатываемого массива горных пород. В первом случае таким источником являются горные породы вокруг выработки, в которых запасается упругая энергия. При этом основными параметрами, от которых зависит величина упругой энергии, являются прочность породного массива вблизи выработки, модуль спада разрушенной горной массы и жесткость нагружающей системы.

В случае горных ударов, происходящих в целиках, в качестве источника разрушающей энергии выступает вся система "целик - окружающие горные породы" [138]. Упругая энергия здесь зависит от таких параметров, как прочность целика, модуль спада и жесткость нагружающей системы.

В третьем случае, когда динамические виды разрушений происходят за счет подвижки по разлому, источником энергии являются сейсмические волны. Такой вид энергии и связанный с ним процесс изменения напряжений зависят от интенсивности события (магнитуды, сейсмического момента и т.д.), дистанции от источника и упругой энергии, накопленной в горных породах вблизи места разрушения.

Следовательно, согласно [138], главными критериями для возникновения горных ударов являются накопленная в массиве горных пород энергия и жесткость нагружающей системы. На основании этих данных можно судить о силе и возможных масштабах динамических проявлений горного давления.

Таким образом, проведенные исследования позволили выявить основные виды энергии, участвующие при подготовке и реализации горных ударов. На основании этого были разработаны уравнения энергетического баланса для упругой и упруго-пластической моделей поведения породного массива и различных вариантов отработки месторождений полезных ископаемых. Также

установлены основные механизмы формирования удароопасной ситуации в массиве горных пород с позиции происходящих в нем энергетических процессов.

Полученная информация позволила выделить энергию в качестве основного источника динамических форм разрушения массива горных пород. При этом главными проблемами оценки удароопасности массива с позиции энергетических процессов является недостаточно полная изученность этих процессов на различных структурно-масштабных уровнях геологической среды, а потому и малая применимость такого подхода на практике.

1.3. Анализ методов исследования энергетических процессов и энергоемкости разрушения горных пород на образцах

Один из первых подходов к исследованию энергетических процессов в образцах был предложен А.А. Гриффитсом. В своих работах [128, 129] он приводит результаты исследований эквивалентного хрупкого материала (стеклянных стержней) при растяжении, на основании которых им была сформулирована задача о растяжении неограниченной упругой пластины (плоскости) с единичной трещиной (Рис. 1.5). При действии постоянной величины напряжения σ условие развития трещины было задано Гриффитсом в виде уравнения энергетического баланса:

$$\frac{\partial}{\partial l}(W - G) = 0, \quad (1.18)$$

$$W = \frac{\pi}{E} \sigma^2 l^2, \quad (1.19)$$

$$G = 4/\gamma, \quad (1.20)$$

где W - потенциальная энергия деформации пластины, G - поверхностная энергия трещины, l - половина длины трещины, E - модуль упругости, γ - удельная поверхностная энергия разрушения.

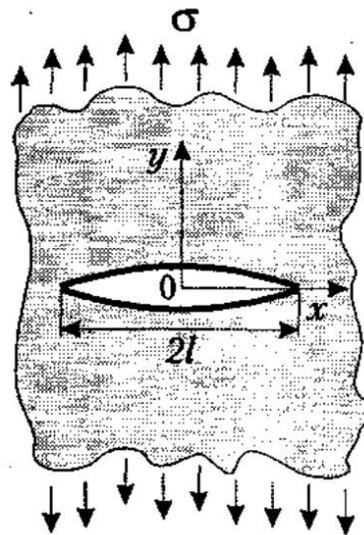


Рис. 1.5. Растяжение пластинки (плоскости) с одиночной трещиной
(по [77])

Также Гриффитсом был установлен характер изменения поверхностной энергии и энергии деформации при увеличении длины трещины в процессе растяжения пластины (Рис. 1.6).

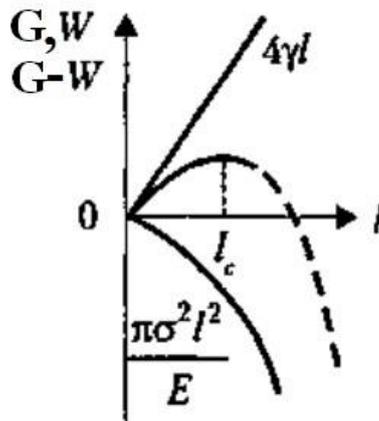


Рис. 1.6. Характер изменения поверхностной энергии (G), энергии деформации (W) и их суммы (l_c) при увеличении длины трещины (по [77])

Основной особенностью подхода Гриффитса является то, что уравнение энергетического баланса применимо для идеально упругих тел в отсутствии действия внешних сил [77].

Г.И. Ирвин и О.Е. Орован использовали подход Гриффитса в своих исследованиях квазихрупкого разрушения материалов [77, 135]. Основная их идея

заклучалась в учете пластических деформаций. Для этого они заменили удельную поверхностную энергию разрушения (γ) в уравнении энергетического баланса (1.18) на сумму действительной поверхностной энергии и энергии пластической деформации. Также ими было показано, что работа, затрачиваемая на развитие пластических деформаций вокруг вершины трещины, может в несколько раз превышать поверхностную энергию хрупкого материала [105].

В работе [144] в качестве стандартного метода разрушения образцов горных пород и определения их удельной энергии деформирования (w_s) был предложен метод испытания при одноосном сжатии. Данный вид испытаний был выбран в связи с тем, что предел прочности на сжатие имеет одну и ту же размерность с удельной энергией деформирования и пропорционален ей. Величину w_s было предложено рассчитывать следующим образом:

$$w_s = \frac{1}{2} \frac{\sigma_f^2}{CE}, \quad (1.21)$$

где σ_f – осевое напряжение, E – модуль упругости, C - константа ($C > 1$).

По результатам испытаний образцов при одноосном сжатии и расчетов их удельной энергии деформирования Меллор [144] проводил оценку эффективности разрушения горных пород.

В.В. Суриков в своей работе [105] приводит следующие формулы для определения удельной энергии хрупкого разрушения грунтов при одноосном (1.22), двухосном (1.23) и трехосном сжатии (1.24):

$$U_1 = \frac{\sigma_1^2}{2E}, \quad (1.22)$$

$$U_2 = \frac{\sigma_2}{2E} (\sigma_2 - 2\nu\sigma_1) + \frac{\sigma_1^2}{2E}, \quad (1.23)$$

$$U_3 = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)}{2E}, \quad (1.24)$$

где σ_1 , σ_2 и σ_3 - главные нормальные напряжения, E - модуль упругости, ν - коэффициент Пуассона.

В работах Б.З. Амусина и В.Т. Глушко [8, 19] приведены результаты изучения процесса накопления потенциальной энергии упругого деформирования в образцах скальных горных пород при нагружении их на испытательных установках с обычной и повышенной жесткостью. В обсуждении полученных результатов авторы отмечали, что при нагружении образцов с невысокой прочностью

разрушение проходило спокойно, а при нагружении прочных образцов – интенсивно. При испытании на жесткой установке наблюдалось спокойное разрушение и для прочных образцов, хотя и в том, и в другом случае количество накопленной энергии полагалось одинаковым. Главной причиной, вызвавшей разницу в характере разрушения образцов, по мнению авторов, была их способность к разупрочнению, которая влекла за собой разгрузку прессы. Так, если на деформирование образца тратится больше энергии, чем ее высвобождается в результате разгрузки прессы, то разрушение происходит спокойно. Если же разгрузка прессы высвобождает больше энергии, чем ее идет на деформирование образца, то разрушение будет носить динамический характер [8]. Аналогичные процессы, как отмечают авторы, протекают и в массиве горных пород.

Также в работе [19] на основании материалов из теории упругости [72, 96, 113] был предложен способ расчета предельной энергии деформирования образцов горных пород при одноосном сжатии (1.25):

$$W_y = \frac{\sigma^2}{2E}, \quad (1.25)$$

где σ – предел прочности на сжатие, E – модуль упругости.

И.М. Петухов и А.М. Линьков в своих более поздних работах [81, 83] продолжили исследование горных ударов, нагружая образцы скальных горных пород в жестком и мягком режиме. По результатам испытаний они установили, что опасными в плане динамических проявлений являются в основном не конкретные горные породы, а вся система «нагружающее устройство-образец горной породы». Так, при мягком режиме нагружения в момент разрушения образца в прессе происходит мгновенная упругая деформация, которая проявляется в виде удара по образцу. В результате он разрушается динамически с сильным разлетом осколков. Аналогом такого режима нагружения в массиве горных пород является ситуация, когда в кровле и почве деформирующегося целика залегают мощные слои упругих пород.

А.Н. Ставрогиным, А.Г. Протосеней и Б.Г. Тарасовым также велись работы в направлении исследования энергии упругого деформирования образцов скальных горных пород при их разрушении на установках с обычной и повышенной жесткостью [101, 102, 106, 107]. Авторами было определено соответствие между этапами нагружения образца и изменением компонент баланса энергии (Рис. 1.7).

На основании полученных данных они установили, что неуправляемое разрушение возникает в том случае, когда величина модуля спада превышает коэффициент жесткости пресса ($M > M_0$). Таким образом, разрушение образца за пределом прочности происходит за счет запасенной в нагружающем устройстве энергии (P_k).

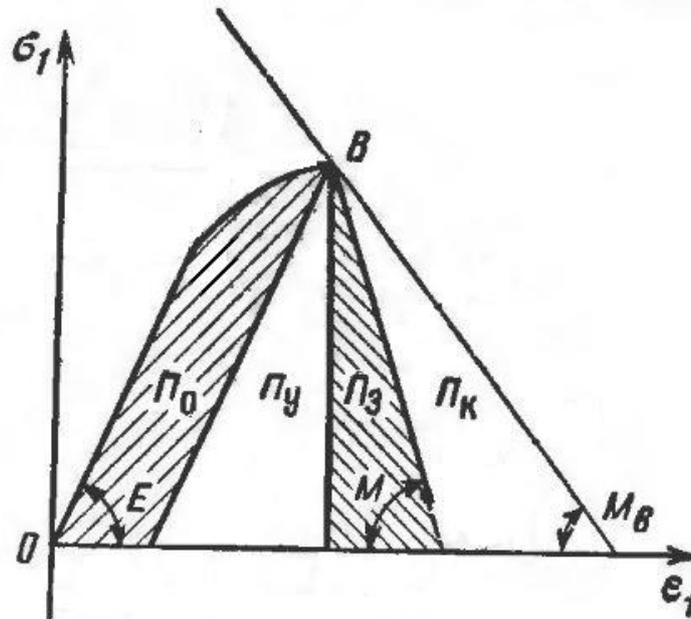


Рис. 1.7. Полная диаграмма «напряжение-деформация»: Π_0 – энергия, затраченная на деформацию образца до точки В; Π_y – энергия, затраченная на необратимую деформацию и разрушение образца; Π_3 – энергия, затраченная на деформацию и разрушение образца за пределом прочности; Π_k – энергия упругого деформирования, запасенная в нагружающей системе (по [101])

В своих работах [101, 102, 106, 107] А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня и Б.Г. Тарасов помимо исследования энергии упругого деформирования образцов скальных горных пород при одноосном сжатии также проводили исследования при трехосном сжатии. По результатам экспериментов ими были установлены основные энергетические параметры, полученные в ходе нагружения образцов (Рис. 1.8), и уравнение энергетического баланса (1.26).

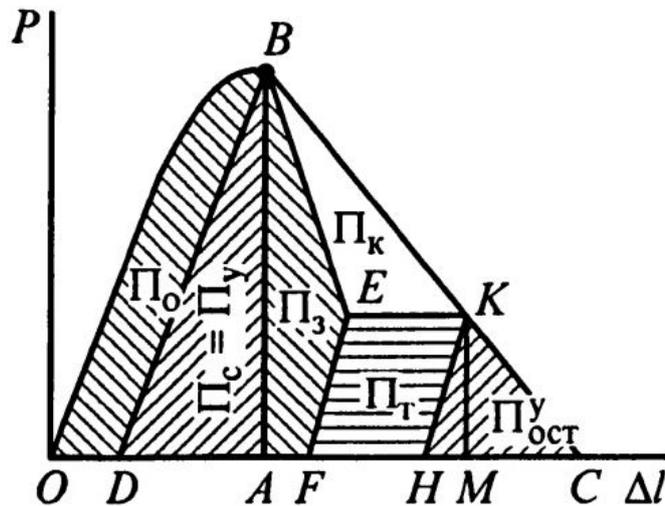


Рис. 1.8. Полная диаграмма «напряжение-деформация» при объемном сжатии:
 P - нагрузка на образец, Δl – продольная деформация образца (по [102])

$$\Pi_k = \Pi_y + \Pi_n - \Pi_c - \Pi_z - \Pi_t - \Pi_{ост}^y, \quad (1.26)$$

где Π_k – энергия упругого деформирования, запасенная в нагружающей системе; Π_y – энергия, запасенная в образце и потраченная на его необратимую деформацию и разрушение; Π_n – энергия, сосредоточенная в площадке НКМ на диаграмме (Рис. 1.8); Π_z – энергия, потраченная на деформацию и разрушение образца за пределом прочности; Π_m – энергия, преобразующаяся в тепло за счет трения при сдвигении по плоскости разрушения; $\Pi_{ост}^y$ – энергия, сохраняющаяся в образце после разрушения.

Полученные исследователями экспериментальные результаты [101, 102, 106, 107] позволили установить, что источником динамических эффектов является энергия, запасенная в нагружающей системе перед разрушением. При этом энергия, запасенная в нагружаемом образце, полностью расходуется на процессы деформирования, трещинообразования, теплообразования и, таким образом, не участвует в процессе динамического разрушения. Также при сравнении результатов испытаний в условиях одноосного и объемного сжатия показано, что в первом случае переходящая в тепло энергия составляет менее 1 %, а во втором случае - может достигать десятков процентов.

Большой вклад в исследование процесса энергообмена и энергоемкости разрушения образцов горных пород внес Е.В. Лодус. Его основная идея, приведенная в [59], заключается в том, что закономерности и процессы

энергообмена носят всеобщий характер и являются подобными как, например, при деформировании больших геологических структур, так и при разрушении образцов горных пород на прессе. Поэтому изучение энергетических процессов в массиве горных пород, что является крайне сложной и трудновыполнимой задачей, следует выполнять путем лабораторных испытаний образцов. В этом случае прессы моделируют поведение массива горных пород и являются источником разрушения и подвижек (запасают избыточную энергию), а образцы горных пород выступают в качестве разрушаемого участка массива (по которым определяют энергозатраты на разрушение и подвижки).

В работе [59] приведены результаты экспериментальных исследований, на основании которых установлено, что на общую, допредельную и запредельную энергоемкость разрушения образцов влияет их состав, плотность, размер зерен как при одноосном, так и при трехосном напряженном состоянии. Также Е.В. Лодусом был рассмотрен процесс релаксации напряжений, который при активизации приводил к увеличению запредельной энергоемкости разрушения. При этом немаловажным фактором, влияющим на энергетические показатели образцов, является скорость нагружения. Однако при испытании на жестком прессе для различных образцов ее увеличение может привести как к интенсификации энергоемкости разрушения, так и к обратному процессу.

В работе Пестрикова В.М. и Морозова Е.М. [77] был выполнен анализ изменения полной энергии системы "образец + нагружающее устройство" до и после продвижения трещины в образце при жестком и мягком нагружении. Согласно их расчетам, потенциальная энергия деформации при распространении трещины будет изменяться следующим образом:

$$\delta W = W_1 - W_2 = \frac{1}{2} \int_{\Sigma} (q_{2i} u_{2i} - q_{1i} u_{1i}) d\Sigma = \begin{cases} \frac{1}{2} \int_{\Sigma} q_{1i} (u_{2i} - u_{1i}) d\Sigma > 0 \\ \frac{1}{2} \int_{\Sigma} u_{1i} (q_{2i} - q_{1i}) d\Sigma < 0 \end{cases}, \quad (1.27)$$

где W_1 и W_2 - потенциальные энергии упругой деформации до и после прорастания трещины, Σ - поверхность тела с заданными компонентами внешней нагрузки q_i , u_i - перемещения.

Верхнее неравенство в (1.27) характеризует мягкое нагружение, при котором внешняя нагрузка не меняется с ростом перемещений точек ее приложения. При жестком нагружении (нижнее уравнение в (1.27)) величины перемещений u_i равны.

Изменение полной энергии системы при распространении трещины, согласно [77], происходит следующим образом:

$$\delta E = \delta W - \delta A = \begin{cases} -\delta W < 0 \\ \delta W < 0 \end{cases} \quad (1.28)$$

На основании построенных зависимостей Пестриковым В.М. и Морозовым Е.М. было установлено, что при мягком нагружении энергия деформации увеличивается, а потенциальная энергия нагружающего устройства уменьшается на удвоенную величину. При жестком нагружении полная потенциальная энергия системы "образец - нагружающее устройство" уменьшается на величину δW . Следовательно, при росте трещины в образце полная энергия системы как при жестком, так и при мягком режиме нагружения, уменьшается на δW .

Таким образом, исследования энергии упругого деформирования и энергоемкости разрушения образцов скальных горных пород помогли ближе подойти к решению проблемы прогноза проявлений горных ударов. Экспериментально удалось установить, какие виды энергии участвуют в подготовке динамических событий и выделяются после их реализации. Были разработаны методы расчетов энергии деформирования образцов скальных горных пород в допредельной и запредельной стадиях, а также установлены основные факторы, влияющие на энергоемкость их разрушения. Тем не менее одной из главных проблем остается перенос результатов, полученных при испытании образцов, на массив горных пород.

1.4. Энергетические критерии оценки склонности горных пород к динамическим разрушениям (удароопасности)

Известно, что вероятность возникновения горных ударов на отработываемых месторождениях полезных ископаемых во многом зависит от типа слагающих эти месторождения горных пород, а именно от их механических свойств [1, 46, 79, 110, 153]. Эта вероятность высока при ведении горных работ в скальных массивах. Однако известны многочисленные случаи проявлений горных ударов на угольных шахтах [1, 79, 80] и калийных рудниках [59, 84, 87]. В связи с этим возникла задача определения склонности горных пород к удароопасности. Поскольку выполнение таких определений в массиве представляется сложным и

трудоемким процессом, наиболее перспективными методами являются испытания образцов горных пород на прессах.

Первые попытки оценить склонность горных пород к динамическим разрушениям (удароопасности) по результатам лабораторных испытаний были предприняты Л.И. Бароном [14]. Основываясь на данных, полученных в ходе исследований М.М. Протодыяконова [88], Л.И. Бароном был введен коэффициент хрупкости горных пород K_{ϕ} . Величину K_{ϕ} определяли как отношение предела прочности при сжатии образцов $\sigma_{сж}$ к пределу прочности при их растяжении σ_p (1.29). В этом случае, чем выше значение коэффициента хрупкости, тем в большей степени горные породы склонны к динамическим разрушениям.

$$K_{\phi} = \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} \quad (1.29)$$

Критерий Л.И. Барона позволил проводить оценку склонности горных пород к динамическим разрушениям по результатам достаточно простых испытаний при одноосном сжатии и растяжении. Однако недостаток этого критерия заключается в том, что не учитываются энергетические процессы в образцах горных пород при их нагружении на прессах. Эти процессы играют ключевую роль в системе "пресс-образец" и, в зависимости от вида нагружения, могут привести как к спокойному, так и к динамическим разрушениям материала.

Разработка критерия по оценке склонности горных пород к динамическим разрушениям на основании результатов испытаний образцов горных пород была продолжена И.М. Петуховым и А.М. Линьковым [83]. Ими были получены полные диаграммы «напряжение-деформация» с запредельными участками при одноосном сжатии (Рис. 1.9). Крутизна запредельной кривой (N) и модуль спада (M) определялись по формулам (1.30) и (1.31).

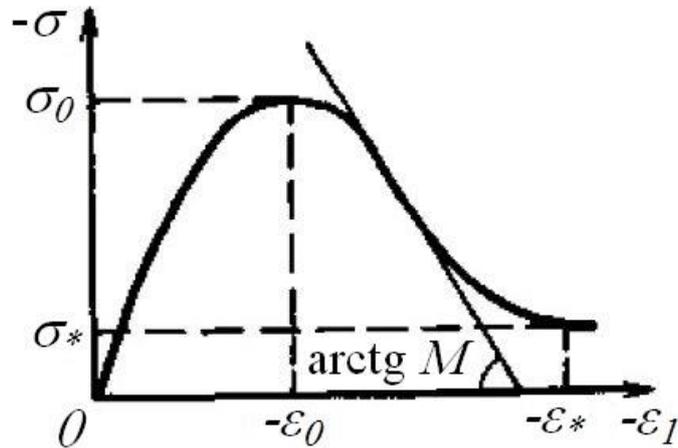


Рис. 1.9. Полная диаграмма «напряжение-деформация» (по [83])

$$N = M \frac{S}{l_0}, \quad (1.30)$$

$$M = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad (1.31)$$

где S – площадь поперечного сечения образца, l_0 – высота образца, $\Delta\sigma$ - изменение напряжений, $\Delta\varepsilon$ - изменение относительных деформаций.

Согласно экспериментальным данным И.М. Петухова и А.М. Линькова [83] опасность проявления динамических разрушений возникает тогда, когда приток энергии превышает или равен его поглощению, т.е. когда отношение модуля спада к модулю упругости (коэффициент λ) образца горной породы больше или равно единице (1.32). Следовательно, для горных пород, склонных к динамическим разрушениям, величина $\lambda \geq 1$, а для несклонных - $\lambda < 1$.

$$\lambda = M/E \geq 1 \quad (1.32)$$

где M - модуль спада, E - модуль упругости.

Разработанный И.М. Петуховым и А.М. Линьковым критерий позволил более надежно определять склонность горных пород к динамическим разрушениям. Однако в явном виде и в этом критерии не были учтены параметры энергетических процессов при нагружении образцов. Также необходимо отметить тот факт, что для проведения подобных исследований требуется специализированное оборудование с повышенной жесткостью, производство которого осуществляется в единичных количествах.

В более поздней работе А.Н. Ставрогина и А.Г. Протосени [101] было предложено наоборот рассматривать отношение модуля упругости к модулю спада

для определения удароопасности горных пород. При этом, когда величина такого отношения (коэффициент удароопасности) меньше или равна единице, порода считается склонной к динамическому неуправляемому разрушению. Если же величина коэффициента удароопасности больше единицы, то порода не склонна к разрушениям в динамической форме.

Б.Г. Тарасовым [157] был модифицирован критерий, разработанный И.М. Петуховым и А.Н. Ставрогиным. По результатам испытаний образцов горных пород в условиях трехосного сжатия ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) Б.Г. Тарасов вывел индекс хрупкости k (1.33), характеризующий способность горных пород к самоподдерживающемуся разрушению за счет накопленной в процессе нагружения упругой энергии.

$$k = \frac{dW_r}{dW_e} = \frac{E-M}{M}, \quad (1.33)$$

$$dW_r = \frac{d\sigma^2(E-M)}{2EM}, \quad (1.34)$$

$$dW_e = \frac{d\sigma^2}{2E}, \quad (1.35)$$

где dW_r - энергия разрушения, dW_e - накопленная упругая энергия, E - модуль упругости, M - модуль спада, σ - дифференциальное напряжение.

Согласно данным Б.Г. Тарасова [157], индекс хрупкости k изменяется в пределах от $-\infty$ до 0 (Рис. 1.10). В том случае, когда значение индекса меньше минус единицы ($k < -1$), разрушение образцов горной породы будет происходить без самоподдерживающегося процесса (энергия разрушения превышает накопленную упругую энергию). Следовательно, такая горная порода будет не склонна к динамическим разрушениям. Если же индекс хрупкости находится в пределах $-1 < k < 0$, то при нагружении возникает процесс самоподдерживающегося разрушения образцов горной породы (упругая энергия, накопленная в образце, превышает энергию разрушения). В этом случае горная порода будет склонна к динамическим разрушениям. При этом интенсивность разрушения будет тем больше, чем больше будет разница между накопленной упругой и выделившейся энергиями.

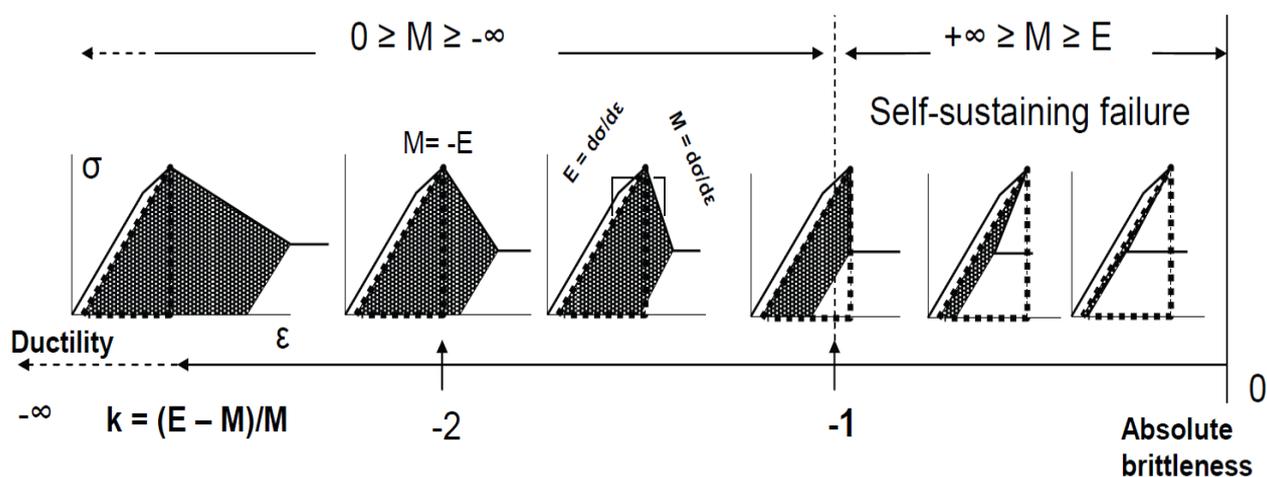


Рис. 1.10. Шкала хрупкости горных пород с полными диаграммами деформирования (по [157])

Критерий, разработанный Б.Г. Тарасовым, позволил определять склонность горных пород к динамическим разрушениям с учетом дифференциальных напряжений (в условиях трехосного сжатия). Однако, как и в случае с предыдущим критерием, подобные определения выполнять крайне трудно, поскольку для них требуется специализированное оборудование с повышенной жесткостью.

Попытка оценить склонность горных пород к динамическим разрушениям по результатам их испытаний при одноосном сжатии также была предпринята Сингхом [153] на основе работ И.М. Петухова и ряда других авторов. Для этого им был введен индекс динамически высвобожденной энергии K_E , который определяется из соотношения энергии, накопленной до предела прочности образца горной породы E_A , к энергии, выделившейся при разрушении этого образца E_R (1.36). Величины энергий E_A и E_R , в свою очередь, устанавливаются по построенным полным диаграммам деформирования образцов горных пород (Рис. 1.11). По результатам экспериментальных исследований Сингхом установлено, что динамическое разрушение горных пород возможно в том случае, когда значение индекса динамически высвобожденной энергии больше единицы ($K_E > 1$). При этом, чем больше будет значение K_E , тем интенсивнее будет происходить процесс разрушения.

$$K_E = \frac{E_A}{E_R} \quad (1.36)$$

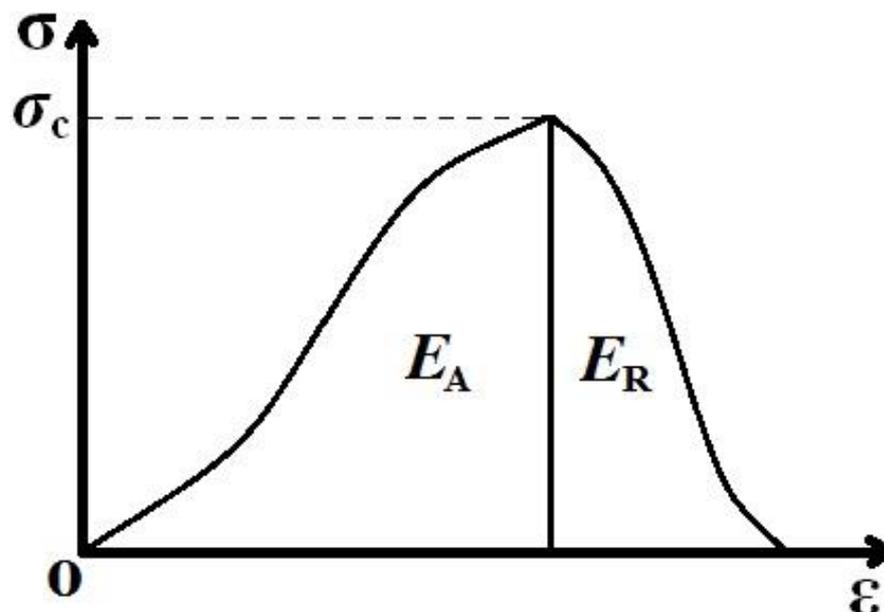


Рис. 1.11. Полная диаграмма «напряжение-деформация» образца горной породы при одноосном сжатии: σ_c - предел прочности при одноосном сжатии

В более поздних работах [123, 149, 160] была показана возможность применения введенного Сингхом индекса динамически высвобожденной энергии [153] для определения склонности к динамическим разрушениям углей и скальных пород. В целом данный подход можно соотнести с подходом И.М. Петухова и А.М. Линькова [83], в котором оценка склонности пород к динамическим разрушениям выполняется по величине отношения модуля упругости к модулю спада. Преимуществом подхода Сингха можно считать то, что дополнительно получают сведения о величинах энергии, накопленной до предела прочности, и энергии, затраченной при разрушении. Тем не менее, и в том, и в другом случае для определения склонности горных пород к динамическим разрушениям требуется специализированное оборудование, разработка которого осуществляется в единичном количестве. К тому же, даже на таком оборудовании не всегда удастся испытать в режиме жесткого нагружения образцы прочных скальных горных пород (например, с пределами прочности при одноосном сжатии свыше 200 МПа).

Еще один энергетический критерий оценки склонности горных пород к динамическим разрушениям был предложен польским ученым А. Кидибиски. В своих исследованиях [139] он нагружал образцы угля до 80% от предела прочности

при сжатии с последующей их разгрузкой и на основании полученных данных строил графики деформирования. На рисунке 1.12 показан типовой график деформирования образцов угля. Область между графиками нагрузки и разгрузки представляет собой энергию W_{sp} (1.39), затраченную на пластические деформации в процессе нагружения. Область САВ - энергия W_{st} (1.37), запасенная в образце угля, а область ОАВ - суммарная энергия W_{tot} (1.38), образованная при нагружении образца.

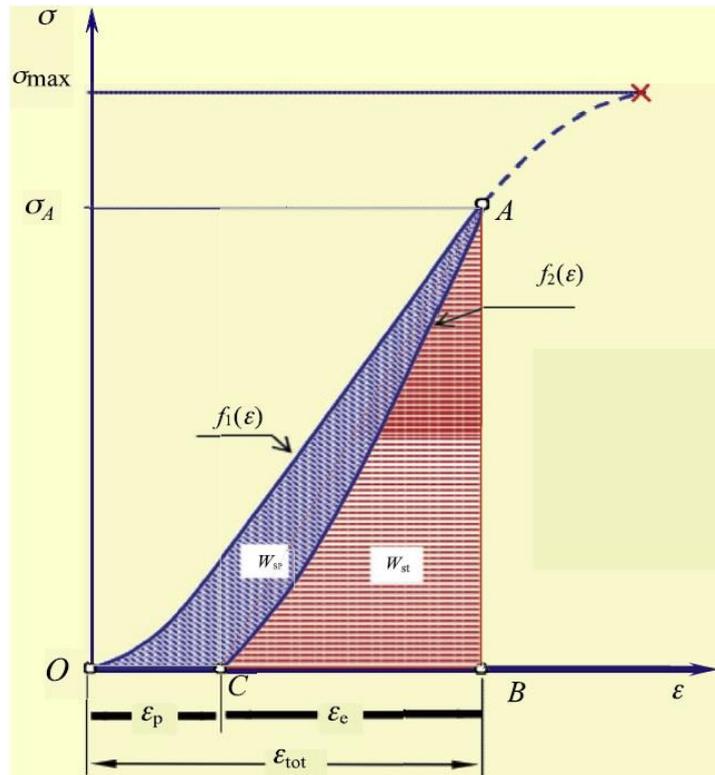


Рис. 1.12. Типовой график деформирования образцов угля при нагрузке до 80 % от предела прочности при сжатии с последующей разгрузкой (по [123])

$$W_{st} = \int_C^B f_2(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (1.37)$$

$$W_{tot} = \int_0^B f_1(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (1.38)$$

$$W_{sp} = W_{tot} - W_{st} \quad (1.39)$$

Согласно А. Кидибиски [139], отношение энергии W_{st} , запасенной в образце угля, к энергии пластических деформаций W_{sp} есть коэффициент запасенной упругой энергии F (1.40).

$$F = \frac{W_{st}}{W_{sp}} \quad (1.40)$$

Если величина коэффициента F больше пяти ($F > 5$), то горная порода склонна к динамическим разрушениям. Если его значение находится в диапазоне от двух до

пяти ($2 < F < 5$), то горная порода в меньшей степени склонна к динамическим разрушениям. Для несклонных к таким видам разрушения горных пород величина коэффициента запасенной упругой энергии меньше двух ($F < 2$).

Разработанный А. Кидибиски критерий позволил определять склонность горных пород к динамическим разрушениям без привлечения специализированного оборудования с повышенной жесткостью, что, безусловно, является его главным достоинством. Однако недостатком такого критерия является условная величина максимальной нагрузки образцов - 80 % от предела прочности при сжатии. Условность этой величины вызвана различием структуры образцов, которое наблюдается даже в пределах одной партии, в связи с чем прочность образцов также будет различаться. Из-за этого становится трудно соблюсти подобие испытаний, поскольку для одного образца максимальная нагрузка будет 80 % от предела прочности при сжатии, а для другого может быть меньше или больше.

Таким образом, разработанные до настоящего времени энергетические критерии позволили в той или иной степени проводить оценку склонности горных пород к динамическим разрушениям. Научная и практическая значимость этих критериев заключается в возможности на стадии разведки месторождений полезных ископаемых выделять блоки горных пород, ведение горных работ в которых может спровоцировать проявление горных и горно-тектонических ударов. В качестве основной проблемы применения энергетических критериев можно выделить необходимость труднодоступного специализированного оборудования - прессов с повышенной жесткостью. Подход А. Кидибиски в какой-то мере позволил уйти от этой проблемы. Тем не менее вопрос о необходимости разработки универсального энергетического критерия оценки склонности горных пород к динамическим разрушениям остается открытым.

1.5. Обоснование цели и задач исследования

Обзор работ, посвященных проблемам исследования процессов энергообмена в массиве горных пород и на образцах, а также взаимосвязи этих процессов с удароопасным состоянием участков месторождений полезных ископаемых, позволил выявить основные решаемые задачи в этих областях:

- 1) определение причин возникновения динамических разрушений пород в массиве и их механизмов;
- 2) установление основных компонентов уравнения энергетического баланса при динамических разрушениях пород;
- 3) определение энергоемкости разрушения скальных горных пород при различных напряженных состояниях;
- 4) поиск критерия оценки склонности горных пород к динамическим разрушениям по результатам испытаний образцов на прессах.

При решении поставленных задач исследователи применяли натурные, лабораторные, численные и аналитические методы. Основной упор был сделан на проведении лабораторных испытаний образцов горных пород при различных режимах нагружения. Следует отметить, что в настоящее время подобные испытания являются достаточно проработанными, но тем не менее остается ряд вопросов, которые необходимо решить, в частности применительно к скальным горным породам.

Для месторождений Кольского региона в настоящее время остается актуальной проблема прогноза горных ударов. Множество разработанных на данный момент методов прогноза горных ударов позволяют только частично решить ее. Один из таких методов заключается в воспроизведении энергетических процессов, подобных тем, что происходят при горном ударе, на образцах горных пород. Применительно к месторождениям Кольского региона, сложенным преимущественно скальными горными породами, такая задача не была решена. В связи с этим основная идея диссертационной работы заключается в использовании механических и энергетических параметров, полученных при испытаниях образцов, для изучения процессов энергообмена, деформирования и разрушения скальных горных пород и определения их склонности к динамическим разрушениям.

При выполнении диссертационной работы были поставлены следующие цель и задачи.

Целью работы является разработка критерия оценки склонности к динамическим разрушениям скальных горных пород с позиции их энергоемкости на примере месторождений Кольского региона.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

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 при испытании на стандартных прессах в условиях одноосного сжатия.
4. Выполнить оценку склонности скальных горных пород месторождений Кольского региона к динамическим разрушениям в условиях трехосного сжатия при различных величинах бокового давления.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ЭНЕРГОЕМКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ СКАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОЛЬСКОГО РЕГИОНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ

Механические свойства горных пород являются одними из важнейших параметров, используемых при решении задач геомеханики, связанных с обеспечением устойчивости выработок, выбором и расчетом рациональных параметров крепи, прогнозом динамических форм проявления горного давления. Определение этих свойств в массиве вызывает трудности, главным образом из-за больших объемов работ и материальных затрат. В связи с этим лабораторные испытания физических моделей массива горных пород (образцов), занимали и занимают лидирующую роль в этом вопросе. Однако для того, чтобы учесть все возможные процессы, происходящие как в нетронутом массиве, так и при ведении горных работ, при исследовании образцов необходимо применять различные режимы нагружения: одноосное сжатие или растяжение, сдвиг, объемное сжатие и т.д.

В настоящее время существует множество экспериментальных установок с возможностью изменения режимов нагружения, позволяющих определять различные механические свойства образцов горных пород [17, 19, 34, 52, 59, 65, 101, 104]. Также разработаны отечественные [20-25] и зарубежные [120, 136] государственные стандарты, регламентирующие методы определения этих свойств.

В силу своей неоднородной структуры и текстуры, а также разнообразия видов и типов горных пород, при их изучении приходится вносить свои корректировки в методы проведения испытаний и конструкционные особенности установок. Так, при определении механических свойств скальных горных пород, приходится использовать экспериментальные установки с жесткой рамой и высокой нагружающей способностью (свыше 1000 кН).

Также немаловажным является изучение энергетических параметров горных пород на прессах при различных режимах нагружения. По результатам таких исследований появляется возможность установить предельные величины

накопленной энергии в образцах при их разрушении. В ряде случаев удается получить полные диаграммы деформирования на прессах с повышенной жесткостью, на основании которых можно проводить оценку выделившейся энергии и определять склонность горных пород к динамическим разрушениям.

Для месторождений Кольского региона проблема комплексного определения механических и энергетических параметров скальных горных пород при различных режимах нагружения изучена не в полной мере. В связи с этим решение этой проблемы является весьма актуальным.

2.1. Объекты исследования

В качестве основных объектов исследования выбраны следующие месторождения Кольского региона (Рис. 2.1):

- 1) Кукисвумчоррское апатит-нефелиновое месторождение (Хибинский массив), отрабатывается Кировским рудником КФ АО "Апатит";
- 2) Юкспорское апатит-нефелиновое месторождение (Хибинский массив), отрабатывается Кировским рудником КФ АО "Апатит";
- 3) апатит-нефелиновое месторождение Апатитовый цирк, отрабатывается Расвумчоррским рудником КФ АО "Апатит";
- 4) Ковдорское магнетит-apatит-бадделеитовое месторождение, отрабатывается карьером "Железный" АО "Ковдорский ГОК";
- 5) железорудное месторождение Куркенпахк, отрабатывается карьером "Куркенпахк" АО "Оленегорский ГОК";
- 6) Ждановское медно-никелевое месторождение, отрабатывается рудником "Северный" АО "Кольская ГМК".

Хибинский массив, расположенный на северо-востоке Балтийского щита, представляет собой одну из крупнейших в мире сложных многофазных интрузий центрального типа. Площадью 1327 км² (36x45 км) массив возвышается на 900–1000 м над окружающей равниной. Возраст его определяется как Герцинский - около 290 млн. лет. Массив характеризуется разнообразием форм тектонических структур различного иерархического уровня, которые по времени связаны с воздействием конических и радиальных разломов [75]. Породы разрабатываемого

ийолит-уртитового комплекса слагают мощную коническую интрузию дугообразной формы, внутреннее строение которой неоднородно. Основным объектом добычи на месторождениях Хибинского массива являются апатит-нефелиновые руды.



Рис. 2.1. Исследуемые месторождения Кольского региона

Ковдорский массив представляет собой сложную многофазную интрузию центрального типа, в образовании которой участвует большое количество различных пород и руд. Её отчётливо кольцевое строение обусловлено последовательным внедрением тяготеющих к единому центру различных по составу интрузивных пород, сопровождающимся их интенсивным метасоматическим изменением. Наибольший промышленный интерес представляют многочисленные карбонатитовые штокверки, так как именно с ними связаны месторождения бадделеит-apatит-магнетитовых, редкометальных, карбонатных и апатит-карбонатных руд.

Месторождение железистых кварцитов Куркенпахк расположено в центральной части Кольского региона и относится к Заимандровскому железорудному району. Месторождение преимущественно сложено метаморфическими горными породами, такими как гнейсы, амфиболиты и

железистые кварциты. Рудное тело имеет сложное строение со средней горизонтальной мощностью 48 м и средним углом падения 70° [117].

Ждановское месторождение медно-никелевых руд располагается в северо-западной части Кольского региона в Печенгском районе и содержит одни из крупнейших запасов медно-никелевых руд в России [154, 155]. Месторождение представлено несколькими рудными телами, имеющими пластообразную форму с раздувами и пережимами. Средняя мощность рудных тел составляет 23 м, а средний угол падения 40° . Руда и вмещающие породы разбиты дизъюнктивными нарушениями и межпластовыми тектоническими зонами.

На месторождениях Хибинского массива горные работы проводятся открытым и подземным способами. При этом на глубинах ниже 300 м от дневной поверхности (для месторождения Апатитовый цирк ниже 200 м) месторождения признаны опасными по горным ударам [112], и горные работы выполняются с обязательным использованием комплекса организационных и технических противоударных мероприятий.

Разработка месторождений Ковдорского и Куркенпахк проводится открытым способом, а Ждановского - подземным. По своим физическим свойствам некоторые породы данных месторождений также могут быть склонны к разрушениям в динамических формах с определенных глубин.

2.2. Обобщенная методика определения механических свойств и энергоемкости разрушения скальных горных пород в условиях одноосного и трехосного напряженного состояния

Первым этапом, необходимым для проведения исследований механических и энергетических параметров скальных горных пород, является отбор и описание керна.

В качестве исследуемых скальных горных пород выбраны руды и вмещающие их породы месторождений Кольского региона.

Керн извлечен и описан при помощи специалистов предприятий КФ АО "Апатит", АО "Ковдорский ГОК", АО "Оленегорский ГОК", АО "Кольская ГМК", а

также с привлечением геологов АО "Мурманская ГРЭ" и ОАО "ЦКЭ". Для бурения использовались алмазные коронки с внутренним диаметром 42 и 45 мм.

Керновый материал отбирали с участка, удаленного от контура выработки на 5 м, поскольку до него скальные горные породы находятся в измененном состоянии, вызванном ведением горных работ.

Главными критериями к формированию пробы горной породы по литотипу были однородность керна, отсутствие насечек от бурения, трещиноватости и видимых разрушений. Длина отдельного куска керна была равна или больше 130 мм (1,5 высоты стандартного по ГОСТу образца [21]). Суммарная длина кернового материала для одного вида скальной горной породы была не менее 700 мм [20].

Извлеченный из массива скальных горных пород керн укладывали в специальные ящики (Рис. 2.2) и маркировали в соответствии с глубиной, на которой его отобрали.



Рис. 2.2. Ящик для хранения керна

После извлечения и описания керна его транспортировали в опытный корпус ГoИ КНЦ РАН.

На втором этапе из отобранного кернового материала изготавливали образцы. Для этого проводили измерения диаметра керна в трех местах (середина и концы керна при его длине порядка 130 мм) штангенциркулем с погрешностью $\pm 0,1$ мм. Затем результаты усредняли и отмечали высоту будущих образцов из расчета, что она должна быть в два раза больше диаметра [21]. В том случае, когда длина керна была больше 130 мм, то измерения диаметров проводили в трех местах для

размеченных образцов. Затем отмеченные образцы нумеровали и выполняли их привязку по глубине скважины.

В процессе подготовки образцов важно учитывать, что отмечаемые на керне участки не должны иметь структурных неоднородностей. Если же было невозможно выполнить это условие, то выбирались участки с наименьшим отклонением от однородности и в большей степени подобные друг другу.

Промаркированные и размеченные керны в дальнейшем подвергали распиловке алмазной пилой. В результате полученные образцы скальных горных пород имели в первом случае диаметр 42 мм и высоту 84 мм, а во втором - 45 и 90 мм соответственно. Обработку поверхностей образцов выполняли в соответствии с [21].

Количество подготовленных образцов по каждой разности скальных горных пород для проведения испытаний в условиях одноосного сжатия было не менее 6 шт. (Рис. 2.3) в соответствии с [21], а для испытаний в условиях трехосного сжатия - 12 шт. [24].



Рис. 2.3. Образцы линзовидно-полосчатой апатит-нефелиновой руды, подготовленные для проведения испытаний при одноосном сжатии

2.2.1. Методика определения механических свойств и энергоемкости разрушения скальных горных пород в условиях одноосного напряженного состояния

Одними из наиболее важных механических параметров для решения ряда геомеханических и технологических задач в горном деле являются пределы прочности при сжатии и растяжении. Знание этих величин позволяет осуществлять

предварительную оценку, при каких значениях напряжений возможны проявления динамических видов разрушений в массиве горных пород.

Также немаловажными являются энергетические параметры, устанавливаемые по результатам испытаний образцов горных пород при одноосном сжатии и растяжении, в частности - критическая удельная энергия деформирования. Этот параметр позволяет оценивать, какие породы будут в большей или меньшей степени накапливать и выделять упругую энергию при разрушении. Однако для того, чтобы определять адекватные значения механических свойств и удельной энергии деформирования горных пород, необходимо качественно отбирать и подготавливать образцы для проведения испытаний, а также руководствоваться актуальными стандартизированными методиками.

Моделирование одноосного напряженного состояния в образцах горных пород осуществляется при помощи испытательных машин или прессов (Рис. 2.4), позволяющих передавать нагрузку на образец либо создавать условия, при которых будет возникать необходимая по направлению и величине нагрузка.



Рис. 2.4. Комплексная испытательная установка MTS 816 Rock Test System

Основными видами одноосного напряженного состояния являются одноосное сжатие и растяжение.

Схема проведения испытаний при одноосном сжатии следующая. Подготовленный образец помещается между стальными плитами пресса (Рис. 2.5), которые имеют толщину не меньше 0,3 диаметра образца, на 3-5 мм превышают его в длину, являются плоскопараллельными с допустимым отклонением 0,02 мм и имеют твердость по Роквеллу HRC 55-60 ед. [21]. Сам пресс должен иметь нагружающую способность порядка 2000 кН. Затем осуществляют центровку образца, совмещая его ось с центром нижней плиты для того, чтобы нагрузка распределялась равномерно.



Рис. 2.5. Образец, подготовленный для проведения испытаний при одноосном сжатии

После размещения образца горной породы в нагрузочной раме пресса осуществляется настройка параметров эксперимента. Скорость нагружения выбирается из интервала 1-5 МПа/с по [21]. Для соблюдения условия подобия во всех экспериментах скорость была выбрана равной 2,5 МПа/с. Поскольку испытания проводили на автоматизированной установке, то также задавали максимальную нагрузку на образец (она должна быть ниже предельно допустимой для установки), максимальное перемещение поршня и другие параметры.

После настройки всех параметров приступали непосредственно к проведению испытаний при одноосном сжатии, в ходе которых образцы скальных горных пород доводили до разрушения и регистрировали величины разрушающей нагрузки.

Значения пределов прочности при одноосном сжатии образцов скальных горных пород определяли согласно [21] по формуле (2.1):

$$\sigma_{сж} = K_{в} \frac{10P}{S}, \quad (2.1)$$

где P – разрушающая образец нагрузка, кН; S – площадь поперечного сечения образца, см²; $K_{в}$ - безразмерный коэффициент высоты образца, равный 1 при отношении высоты к диаметру 2:1.

Определения деформационных свойств образцов скальных горных пород, проводимые при одноосном сжатии, также основываются на представленной выше схеме. Различие заключается в том, что при нагружении дополнительно регистрируют изменение величин продольной и поперечной деформаций при увеличении нагрузки на образец.

Определение значений деформации в образцах производят по показаниям сопротивления тензодатчиков при одноосном сжатии с шагом 5 - 20 кН. Нагружение осуществляется до величины, равной 30 % от разрушающей нагрузки для конкретного типа скальной горной породы (предельную нагрузку для образцов горных пород устанавливают по результатам испытаний при одноосном сжатии). После этого образец разгружают с таким же шагом, регистрируя значения сопротивлений. Полученные результаты измерений переводят в величины относительных деформаций согласно ГОСТу [25].



Рис. 2.6. Расположение тензодатчиков на образце пятнисто-линзовидно-полосчатой апатит-нефелиновой руды для определения величин деформаций при нагружении в условиях одноосного сжатия

На основании полученных данных строят графики зависимости изменения значений относительных продольных и поперечных деформаций от величин задаваемых напряжений в образцах (Рис. 2.7.). На построенном графике по ветви разгрузки выбирают прямолинейный участок и фиксируют его крайние точки, после чего определяют значения модуля упругости (E) и коэффициента Пуассона (ν) согласно [25] по формулам (2.2) и (2.3).



Рис. 2.7. Пример графика зависимости значений напряжения от величин продольных и поперечных деформаций, построенный для образцов скальных горных пород Хибинского массива

После размещения образца горной породы в нагрузочной раме пресса осуществляется настройка параметров эксперимента. Скорость нагружения выбирается из интервала 1-5 МПа/с по [22]. Для соблюдения условия подобия во всех экспериментах скорость была выбрана равной 1,5 МПа/с. Также задают максимально допустимую нагрузку и чувствительность датчика силы.

После настройки всех параметров приступали непосредственно к проведению испытаний при растяжении методом сжатия по образующим, в ходе которых образцы скальных горных пород доводили до разрушения и регистрировали величины разрушающей нагрузки.

Значения пределов прочности при одноосном растяжении образцов скальных горных пород определяли согласно [22] по формуле (2.4):

$$\sigma_p = 10 \frac{P}{S}, \quad (2.4)$$

где P – разрушающая нагрузка, кН; S – площадь разрыва образца, равная произведению его диаметра на длину, см².

Критическая удельная энергия деформирования скальных горных пород является показателем энергоемкости их разрушения. Ее значение используют как пороговое при оценке возможной удароопасности блоковых структур массива.

Определение величин критической удельной энергии деформирования скальных горных пород выполняется на основании полученных данных в ходе испытаний при одноосном сжатии и растяжении.

При одноосном сжатии величину критической удельной энергии рассчитывают по формуле (2.5), при растяжении – по формуле (2.6) [113]:

$$w_{*сж} = \frac{\sigma_{сж}^2}{2E}, \quad (2.5)$$

$$w_{*р} = \frac{\sigma_p^2}{2E}, \quad (2.6)$$

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

2.2.2. Методика определения механических свойств и энергоемкости разрушения скальных горных пород в условиях трехосного напряженного состояния

Исследование механических свойств горных пород при одноосном напряженном состоянии всегда было приоритетной задачей в геомеханике. Однако не менее важным является изучение таких свойств в условиях, соответствующих нетронутому массиву пород. Поскольку измерения, проводимые непосредственно в массиве (*in situ*), являются весьма трудоемкими и дорогостоящими, были предложены методы и разработано специальное оборудование для проведения подобных исследований на образцах горных пород при действии всесторонней нагрузки [17, 19, 34, 52, 59, 61, 102, 111, 121, 133].

Одна из первых установок для проведения испытаний при трехосном сжатии была разработана Т. Карманом [52]. Образец в ней нагружался при помощи поршня, который сдавливал рабочую жидкость (глицерин) и создавал боковое давление. Осевое и боковое давление в этом случае задавались независимо друг от друга, а максимальная величина последнего составляла 300 МПа.

К настоящему времени испытательное оборудование претерпело ряд технических изменений. Возросли нагружающие способности прессов, увеличилось количество контролируемых и определяемых параметров в ходе эксперимента, а также появилась возможность создания трехосной неравнокомпонентной нагрузки [142, 145].

Основными исследуемыми параметрами горных пород в условиях трехосного напряженного состояния являются пределы прочности, сцепления и углы внутреннего трения [19, 29, 34, 52, 61, 110, 133]. В меньшей степени уделяется внимание изучению процессов изменения и накопления упругой энергии в образцах при различных величинах неравнокомпонентной нагрузки [60, 102, 157].

Применительно к условиям месторождений Кольского региона вопросы исследования механических свойств и энергоемкости разрушения скальных горных пород при трехосном напряженном состоянии являются малоизученными, что делает их весьма актуальными.

Испытания образцов скальных горных пород в условиях трехосного напряженного состояния выполнены на комплексной испытательной установке MTS 816 Rock Test System (Рис. 2.9).



Рис. 2.9. Комплексная испытательная установка MTS 816 Rock Test System в конфигурации для проведения испытаний при трехосном сжатии

Для проведения испытаний образцов использовали следующую схему. Образцы подготавливали в соответствии с [24], после чего изолировали их от рабочей жидкости (минеральное масло). Подготовленный образец (Рис. 2.10) помещали в сосуд высокого давления (трехосную ячейку), создавали боковое давление заданной величины и производили нагружение осевым сжатием со скоростью 2,5 МПа/с вплоть до разрушения.

Значения бокового давления в камере трехосного сжатия увеличивали с заданным шагом 5 МПа до величины 20-30 МПа. По результатам таких испытаний устанавливали зависимости изменения величин прочности образцов горных пород от увеличения бокового давления. Значения пределов прочности образцов устанавливали согласно ГОСТ [24] по формуле (2.7):

$$\sigma_{\text{сж}}^0 = \frac{10P}{S}, \quad (2.7)$$

где P – разрушающая образец нагрузка, кН; S – площадь поперечного сечения образца, см².



Рис. 2.10. Образец, подготовленный для проведения испытаний при трехосном сжатии

Для вычисления показателя энергоемкости разрушения образцов скальных горных пород при трехосном сжатии необходимо определить значения их предела прочности при заданном боковом давлении, а также модуля упругости и коэффициента Пуассона при одноосном сжатии. На основании этих данных по формуле (2.8) рассчитывают значения критической удельной энергии деформирования образцов. Полученные величины критической удельной энергии используют как пороговые при оценке удароопасности блоковых структур на удалении от выработанного пространства.

$$w_{*гр} = \frac{1}{2E} (\sigma_{тр}^2 + \sigma_{бок1}^2 + \sigma_{бок2}^2 - 2\nu(\sigma_{тр}\sigma_{бок1} + \sigma_{тр}\sigma_{бок2} + \sigma_{бок1}\sigma_{бок2})), \quad (2.8)$$

где $\sigma_{тр}$ - предел прочности образца в условиях трехосного сжатия при заданном боковом давлении, МПа; $\sigma_{бок1,2}$ - боковые давления на образец, МПа; E - модуль упругости, МПа; ν - коэффициент Пуассона.

2.2.3. Обработка результатов испытаний образцов скальных горных пород

Полученные результаты определений механических и энергетических параметров образцов скальных горных пород необходимо подвергать статистической обработке, чтобы обеспечить их достоверность [21, 53]. Для этого проводят расчет их средних арифметических значений, среднеквадратических отклонений и коэффициентов вариации по формулам (2.9), (2.10) и (2.11) соответственно.

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k, \quad (2.9)$$

$$X = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (k - M)^2}, \quad (2.10)$$

$$V = \frac{X}{M} 100\%, \quad (2.11)$$

где k – определяемая величина ($\sigma_{сж}$, σ_p , σ_{mp} , E , ν , $W^*_{сж}$, W^*_p , W^*_{mp}), n – количество образцов.

По рассчитанным значениям коэффициента вариации определяют разброс полученных результатов. Если он не превышает 30 %, то результат определений считают приемлемым. Если коэффициент вариации больше 30 %, то следует увеличить количество анализируемых образцов. Для этого производят расчеты по формуле (2.12) [92] и увеличивают число образцов до установленного. Если нет возможности увеличить их число, то надежность полученных результатов устанавливают по таблице 2.1 и определяют их погрешность.

$$n = \left(\frac{Vt}{R}\right)^2, \quad (2.12)$$

где R – показатель точности, t – значение достоверности.

Табл. 2.1. Определение надежности результатов исследований механических и энергетических параметров образцов горных пород [21]

ε/V^*	Надежность α (%) при числе образцов:										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,4	33	44	52	58	63	66	70	74	76	79	81
0,6	45	59	68	75	80	84	87	89	91	92	94
0,8	54	71	79	85	90	92	94	96	96	98	98
1,0	61	77	86	91	94	96	97	98	99	99	99
1,2	66	82	90	94	96	98	99	99	100	100	100
1,4	70	86	93	96	98	99	99	100	100	100	100
1,6	73	89	95	98	99	99	100	100	100	100	100

* ε – относительная погрешность оценки средней прочности по пробе;
 V – коэффициент вариации.

Надежность результатов определения механических и энергетических параметров образцов скальных горных пород, как и для большинства технических расчетов, следует задавать равной 0,95 [62], а точность устанавливать по критерию Стьюдента (2.13).

$$k = M \pm \frac{t_{\alpha} X}{\sqrt{f}}, \quad (2.13)$$

где t_{α} – критерий Стьюдента, f – степень свободы, равная $n-1$.

После того, как точность и надежность результатов установлена, необходимо провести их округление. Если точность измерительного оборудования высокая (погрешность до 1,5 %) и значения исследуемых параметров изменяются в узких диапазонах, то их следует округлять до десятых и сотых. Если точность оборудования невысокая (погрешность больше 2 %) и значения исследуемых параметров варьируются в широком диапазоне, то их следует округлять до целых. Однако в этом случае нужно в большей степени руководствоваться условиями поставленной задачи и личным опытом исследователя.

2.3. Результаты исследований механических свойств и энергоемкости разрушения скальных горных пород месторождений Кольского региона в условиях одноосного напряженного состояния

Исследование механических и энергетических параметров в условиях одноосного напряженного состояния было проведено для 15 литологических разновидностей скальных горных пород месторождений Кольского региона (Рис. 2.11) в Горном институте КНЦ РАН [32, 54, 61, 126, 127, 140, 141]. Из них 7 разновидностей, отобранные с апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива, представлены 4 разновидностями руд и 16 разновидностями вмещающих пород: уртитам, ювитами, пегматитами, ийолитами, а также дайкой мончикита и лампрофиллит-эгирин-полевошпатовой жилой. С Ковдорского месторождения отобрано две литологические разновидности - апатит-карбонатно-магнетитовая руда и кальцитовый карбонатит, а с месторождения Куркенпахк - две разновидности гнейса. Со Ждановского медно-никелевого месторождения отобраны и

подготовлены образцы руды и 4 разновидностей вмещающих пород: туфогенно-осадочная порода, диабаз, габбро, серпентинизированный перидотит.

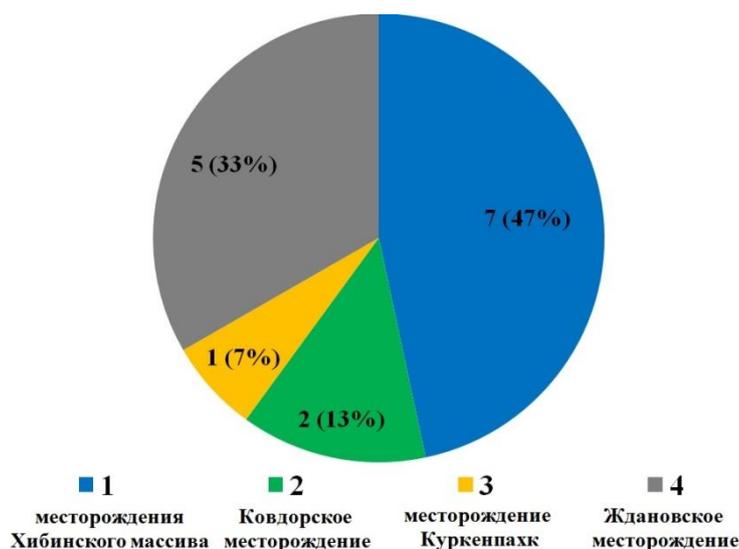


Рис. 2.11. Количество литологических разновидностей скальных горных пород, выбранных для проведения исследований в условиях одноосного напряженного состояния

Основными изучаемыми параметрами скальных горных пород выбраны пределы прочности при сжатии и растяжении, модуль упругости, коэффициент Пуассона, критические удельные энергии деформирования образцов при сжатии и растяжении. Результаты определения их средних значений и коэффициентов вариации для всего ряда анализируемых горных пород представлены в таблице 2.2 (коэффициенты вариации не приведены для критической энергии деформирования, поскольку ее определяли на основании средних значений предела прочности и модуля упругости).

Таблица 2.2. Механические и энергетические параметры скальных горных пород Хибинского массива

№ п/п	Горная порода	Предел прочности при сжатии, $\sigma_{сжк}$ (МПа) / V, %	Предел прочности при растяжении, σ_p (МПа) / V, %	Модуль упругости, E (10^{-4} МПа) / V, %	Коэффициент Пуассона, ν / V, %	Критическая удельная энергия деформирования, W_* (МДж/м ³)	
						при сжатии	при растяжении
Апатит-нефелиновые месторождения Хибинского массива							

№ п/п	Горная порода	Предел прочности при сжатии, $\sigma_{сж}$ (МПа) / V, %	Предел прочности при растяжении, σ_p (МПа) / V, %	Модуль упругости, E (10^{-4} МПа) / V, %	Коэффициент Пуассона, ν / V, %	Критическая удельная энергия деформирования, W_* (МДж/м ³)	
						при сжатии	при растяжении
1. Уртиты							
1.1	Уртит среднезернистый массивный	$\frac{174}{14}$	$\frac{9,3}{20}$	$\frac{7,22}{8}$	$\frac{0,28}{14}$	0,2097	0,0006
1.2	Уртит неравномерно-зернистый	$\frac{202}{10}$	$\frac{9,5}{26}$	$\frac{7,87}{11}$	$\frac{0,26}{2}$	0,2592	0,0006
1.3	Уртит пегматоидный	$\frac{156}{27}$	$\frac{9,1}{25}$	$\frac{7,56}{13}$	$\frac{0,25}{28}$	0,1610	0,0006
1.4	Уртит среднезернистый массивный с полевым шпатом	$\frac{159}{7}$	$\frac{6,5}{9}$	$\frac{6,00}{20}$	$\frac{0,16}{15}$	0,2107	0,0004
1.5	Уртит полевошпатовый со сфеном среднезернистый массивный	$\frac{126}{8}$	$\frac{8,7}{14}$	$\frac{7,62}{13}$	$\frac{0,24}{17}$	0,1042	0,0005
1.6	Уртит мелко-среднезернистый, среднезернистый массивный	$\frac{155}{3}$	$\frac{9,2}{15}$	$\frac{6,29}{2}$	$\frac{0,20}{18}$	0,1910	0,0007
1.7	Уртит мелко-среднезернистый массивный с полевым шпатом и со сфеном	$\frac{98}{22}$	$\frac{7,3}{19}$	$\frac{5,31}{7}$	$\frac{0,16}{27}$	0,0904	0,0005
1.8	Уртит среднезернистый массивный полевошпатовый (до ювитов)	$\frac{196}{11}$	$\frac{9,6}{10}$	$\frac{6,08}{3}$	$\frac{0,19}{7}$	0,3159	0,0008
1.9	Уртит среднезернистый массивный с многочисленными эгириновыми прожилками	$\frac{130}{15}$	$\frac{8,2}{15}$	$\frac{4,80}{2}$	$\frac{0,15}{5}$	0,1760	0,0007
1.10	Уртит массивный полевошпатовый с линзовидно-полосчатой апатит-нефелиновой рудой	$\frac{93}{9}$	$\frac{4,7}{16}$	$\frac{3,95}{22}$	$\frac{0,27}{8}$	0,1095	0,0003
1.11	Уртит среднезернистый массивный полевошпатовый со сфеном, титаномагнетитом	$\frac{122}{5}$	$\frac{8,7}{14}$	$\frac{7,65}{7}$	$\frac{0,23}{15}$	0,0973	0,0005
1.12	Уртит-ийолит среднезернистый массивный	$\frac{166}{18}$	$\frac{9,7}{20}$	$\frac{8,27}{4}$	$\frac{0,22}{29}$	0,1666	0,0006
2. Апатит-нефелиновые руды							
2.1	Линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда	$\frac{147}{14}$	$\frac{5,2}{20}$	$\frac{6,56}{12}$	$\frac{0,20}{19}$	0,1647	0,0002
2.2	Пятнисто-линзовидно-полосчатая	$\frac{136}{14}$	$\frac{6,4}{20}$	$\frac{6,30}{12}$	$\frac{0,25}{19}$	0,1468	0,0003

№ п/п	Горная порода	Предел прочности при сжатии, $\sigma_{сж}$ (МПа) / V, %	Предел прочности при растяжении, σ_p (МПа) / V, %	Модуль упругости, E (10^{-4} МПа) / V, %	Коэффициент Пуассона, ν / V, %	Критическая удельная энергия деформирования, W^* (МДж/м ³)	
						при сжатии	при растяжении
	апатит-нефелиновая руда	23	25	18	2		
2.3	Пятнисто-линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда с вкраплениями титаномагнетита	$\frac{91}{20}$	$\frac{6,7}{15}$	$\frac{6,49}{5}$	$\frac{0,20}{4}$	0,0638	0,0003
2.4	Брекчия линзовидно-полосчатой апатит-нефелиновой руды на уртитовом цементе	$\frac{93}{22}$	$\frac{5,3}{13}$	$\frac{5,03}{10}$	$\frac{0,19}{8}$	0,0860	0,0003
3. Ювиты							
3.1	Ювит неравномерно-зернистый массивный	$\frac{131}{29}$	$\frac{5,5}{18}$	$\frac{3,57}{23}$	$\frac{0,11}{16}$	0,2404	0,0004
3.2	Ювит мелко-среднезернистый массивный с эвдиалитом и содовым налетом	$\frac{53}{25}$	$\frac{6,0}{11}$	$\frac{3,33}{20}$	$\frac{0,20}{20}$	0,0422	0,0005
3.3	Ювит мелко-среднезернистые массивный со сфеном, с вкраплениями эвдиалита, лампрофиллита	$\frac{76}{28}$	$\frac{8,7}{18}$	$\frac{6,54}{3}$	$\frac{0,13}{17}$	0,0442	0,0006
4. Пегматиты							
4.1	Пегматит крупнозернистый с эвдиалитом и лампрофиллитом	$\frac{145}{10}$	$\frac{6,5}{14}$	$\frac{5,71}{13}$	$\frac{0,16}{4}$	0,1841	0,0004
4.2	Пегматиты с участками ийолитов, многочисленные миколитизации	$\frac{106}{32}$	$\frac{8,3}{37}$	$\frac{8,83}{17}$	$\frac{0,28}{7}$	0,0636	0,0004
5	Ийолит трахитоидный	$\frac{227}{13}$	$\frac{13,1}{24}$	$\frac{8,89}{6}$	$\frac{0,22}{6}$	0,2898	0,0010
6	Мончикитовая дайка	$\frac{185}{16}$	$\frac{12,7}{17}$	$\frac{7,16}{7}$	$\frac{0,17}{17}$	0,2390	0,0011
7	Лампрофиллит-эгирин-полевошпатовая жила	$\frac{182}{15}$	$\frac{14,6}{28}$	$\frac{8,20}{13}$	$\frac{0,22}{21}$	0,2020	0,0013
Ковдорское магнетит-апатит-бадделитовое месторождение							
8	Апатит-карбонатно-магнетитовая руда	$\frac{130}{9}$	$\frac{9,3}{20}$	$\frac{13,03}{7}$	$\frac{0,26}{10}$	0,0649	0,0003
9	Кальцитовый карбонатит	$\frac{50}{16}$	$\frac{4,6}{20}$	$\frac{4,88}{8}$	$\frac{0,22}{13}$	0,0256	0,0002
Железородное месторождение Куркенпахк							
10. Гнейсы							
10.1	Гнейс серый	$\frac{160}{16}$	$\frac{10,7}{20}$	$\frac{6,86}{8}$	$\frac{0,20}{13}$	0,1866	0,0008

№ п/п	Горная порода	Предел прочности при сжатии, $\sigma_{сж}$ (МПа) / V, %	Предел прочности при растяжении, σ_p (МПа) / V, %	Модуль упругости, E (10^{-4} МПа) / V, %	Коэффициент Пуассона, ν / V, %	Критическая удельная энергия деформирования, W^* (МДж/м ³)	
						при сжатии	при растяжении
		22	10	12	5		
10.2	Гнейс серый лейкократовый	$\frac{192}{14}$	$\frac{11,6}{23}$	$\frac{7,56}{2}$	$\frac{0,17}{8}$	0,2438	0,0009
Ждановское медно-никелевое месторождение							
11	Туфогенно-осадочная порода	$\frac{140}{19}$	$\frac{12,7}{40}$	$\frac{8,29}{10}$	$\frac{0,24}{11}$	0,1182	0,0010
12	Габбро	$\frac{100}{36}$	$\frac{18,0}{29}$	$\frac{6,47}{11}$	$\frac{0,28}{7}$	0,0773	0,0025
13	Диабаз	$\frac{76}{20}$	$\frac{15,3}{29}$	$\frac{6,66}{13}$	$\frac{0,27}{13}$	0,0434	0,0018
14	Сплошная медно-никелевая руда	$\frac{186}{5}$	$\frac{12,8}{29}$	$\frac{8,42}{10}$	$\frac{0,26}{18}$	0,2054	0,0010
15	Серпентинизированный перидотит	$\frac{94}{22}$	$\frac{14,0}{23}$	$\frac{8,28}{13}$	$\frac{0,28}{14}$	0,0534	0,0012

Как следует из таблицы 2.2 и рисунка 2.12, наибольшие значения пределов прочности при сжатии соответствуют таким горным породам, как уртит неравномерно-зернистый (202 МПа), уртит среднезернистый массивный (полевошпатовый до ювитов) (196 МПа), ийолит трахитоидный (227 МПа), гнейс серый лейкократовый (192 МПа). Разрушение образцов этих пород на прессе происходило интенсивно с сильным разлетом осколков и взрывоподобным звуком. Наименьшие значения прочности установлены для ювита массивного мелко-среднезернистого со сфеном (76 МПа), ювита массивного мелко-среднезернистого с эвдиалитом и содовым налетом (53 МПа), кальцитового карбонатита (50 МПа). В этом случае разрушение образцов происходило в спокойном режиме в виде проседания под приложенной нагрузкой и без разлета осколков.

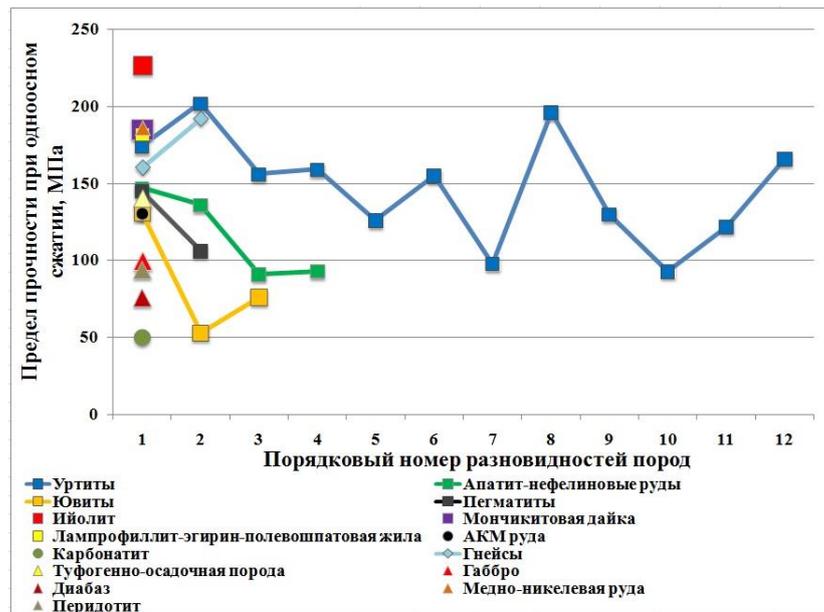


Рис. 2.12. Распределение средних величин пределов прочности при сжатии исследуемых литологических разновидностей скальных горных пород

Наибольшие значения пределов прочности при растяжении (Таблица 2.2 и Рис. 2.13) соответствуют лампрофиллит-эгирин-полевошпатовой жиле (14,6 МПа), габбро (18,0 МПа), диабазу (15,3 МПа) и серпентинизированному перидотиту (14,0 МПа). Наименьшие значения установлены для ювита неравномерно-зернистого массивного (5,5 МПа), линзовидно-полосчатых апатит-нефелиновых руд (5,2 МПа и 5,3 МПа) и кальцитового карбонатита (4,6 МПа).

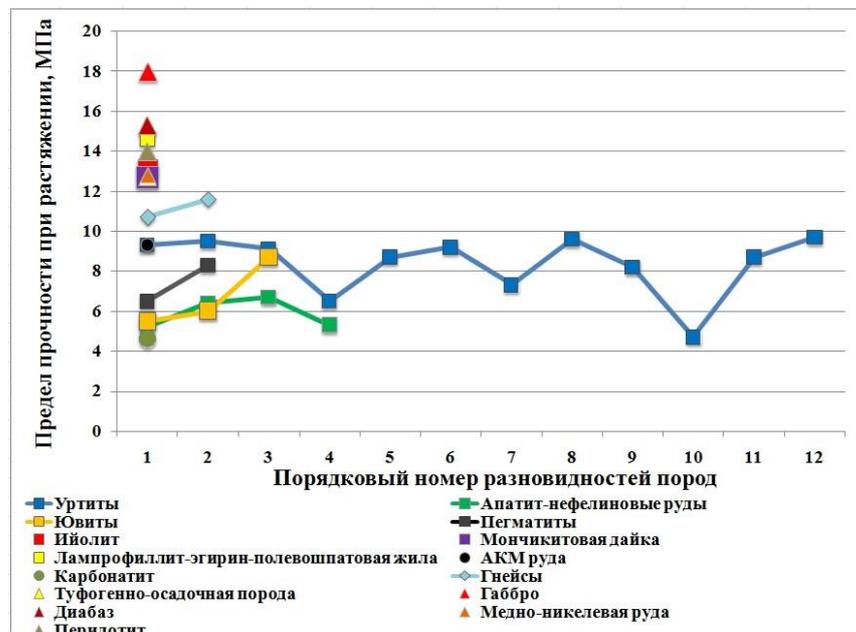


Рис. 2.13. Распределение средних величин пределов прочности при растяжении исследуемых литологических разновидностей скальных горных пород

При сопоставлении рисунков 2.12 и 2.13 видно, что образцы уртитов с наибольшими значениями пределов прочности при сжатии также имеют высокие значения пределов прочности при растяжении и, соответственно, наоборот. Следует выделить ийолит трахитоидный, мончикитовую дайку, лампрофиллит-эгирин-полевошпатовую жилу и гнейс серый лейкократовый, величины пределов прочности которых одни из самых высоких. Для этих горных пород характерна мелкозернистая, мелко-среднезернистая и среднезернистая структура. Для остальных пород, структура которых среднезернистая и крупнозернистая, а также имеются структурные неоднородности в виде включений минералов, слоистости и микротрещиноватости, тенденции одновременного увеличения прочности при сжатии и растяжении выявлено не было. Следовательно, подобное увеличение прочностных характеристик возможно в большей степени для монолитных горных пород с мелко- и среднезернистой структурой.

Наибольшие значения модулей упругости (Таблица 2.2 и Рис. 2.14) установлены для ийолита трахитоидного ($8,89 \cdot 10^{-4}$ МПа), пегматита с участками ийолитов ($8,83 \cdot 10^{-4}$ МПа) и апатит-карбонатно-магнетитовой руды ($13,03 \cdot 10^{-4}$ МПа). В данном случае интересной особенностью является то, что породы Хибинского массива из этого списка включают в себя в том или ином количестве ийолит. Следовательно, высокие значения модуля упругости для них могут быть связаны с содержанием таких же минералов, как и в образцах ийолита трахитоидного. В случае с апатит-карбонатно-магнетитовой рудой установленные величины этого параметра вызваны большим содержанием железа.

Наименьшие значения модулей упругости соответствуют уртиту массивному полевошпатовому с линзовидно-полосчатой апатит-нефелиновой рудой ($3,95 \cdot 10^{-4}$ МПа), ювиту массивному неравномерно-зернистому ($3,57 \cdot 10^{-4}$ МПа) и ювиту массивному мелко-среднезернистому с эвдиалитом и содовым налетом ($3,33 \cdot 10^{-4}$ МПа).

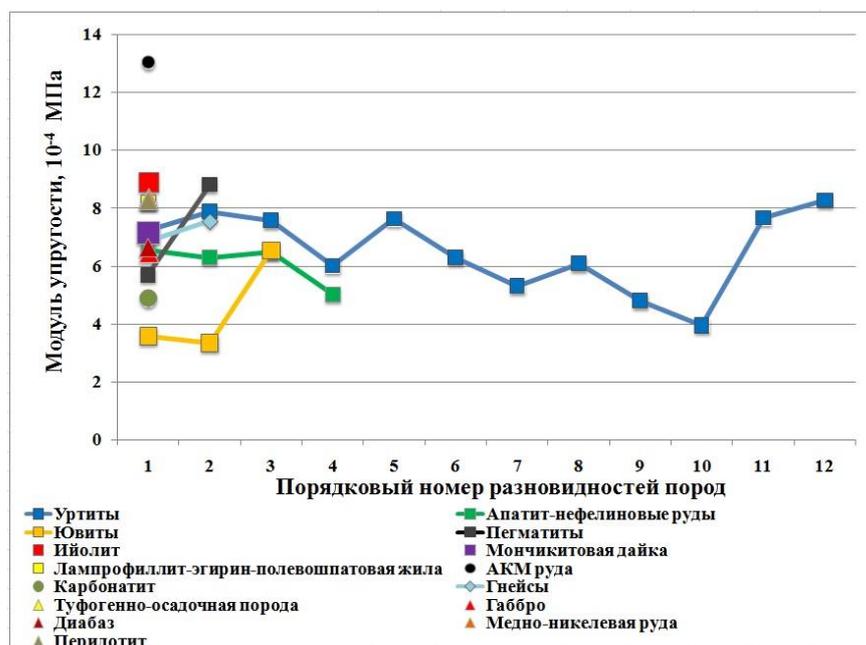


Рис. 2.14. Распределение средних величин модулей упругости исследуемых литологических разновидностей скальных горных пород

При сопоставлении рисунков 2.14 и 2.12, а также данных из таблицы 2.2, можно увидеть, что исследуемые скальные горные породы с наибольшими величинами модулей упругости (свыше $8,00 \cdot 10^4$ МПа) имеют высокие значения пределов прочности при сжатии (свыше 150 МПа). Породы с наименьшими значениями модулей упругости (ниже $4,00 \cdot 10^4$ МПа), в свою очередь, в основном имеют не столь высокие значения прочности (ниже 100 МПа). Однако эта тенденция свойственна не всем исследуемым литологическим разновидностям, что связано, главным образом, с их структурными особенностями и минералогическим составом.

Наибольшие значения коэффициентов Пуассона (Таблица 2.2 и Рис. 2.15) установлены для уррита среднезернистого массивного (0,28), пегматита с участками ийолитов (0,28), габбро (0,28) и серпентинизированного перидотита (0,28). Наименьшие значения коэффициентов Пуассона определены для ювита массивного неравномерно-зернистого (0,11) и ювита массивного мелко-среднезернистого со сфеном (0,13).

По результатам сравнительного анализа полученных данных (Табл. 2.2, Рис. 2.12-2.15) не было выявлено общей взаимосвязи между изменением величин коэффициентов Пуассона и других определяемых механических параметров

исследуемых горных пород (пределы прочности при сжатии и растяжении, модуль упругости).

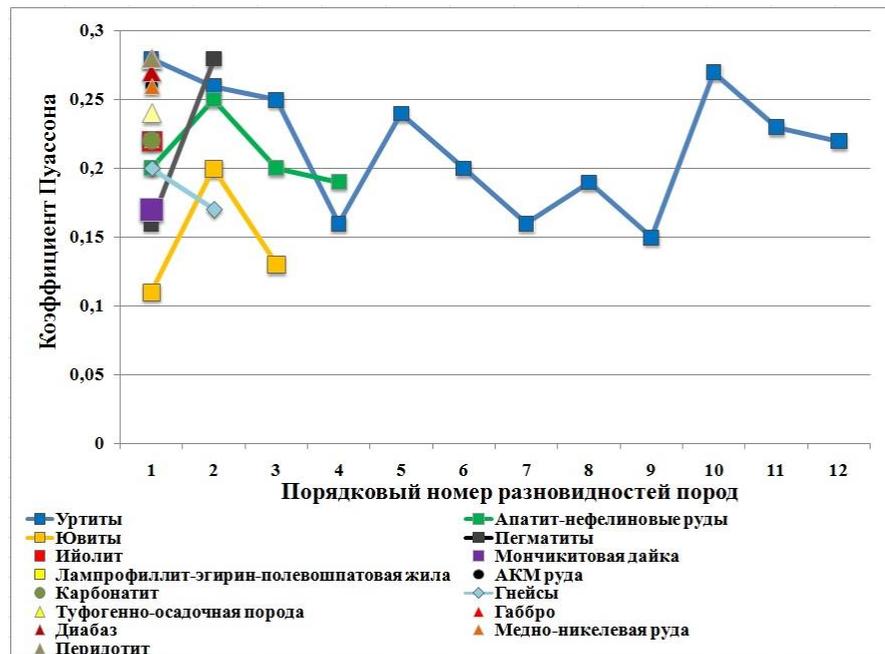


Рис. 2.15. Распределение средних величин коэффициентов Пуассона исследуемых литологических разновидностей скальных горных пород

Как видно из таблицы 2.2 и рисунка 2.16, наибольшие значения критической удельной энергии деформирования при сжатии соответствуют уртуру среднезернистому массивному (полевошпатовому до ювитов) ($0,3159 \text{ МДж/м}^3$), уртуру неравномерно-зернистому ($0,2592 \text{ МДж/м}^3$) и ийолиту трахитоидному ($0,2898 \text{ МДж/м}^3$), величины пределов прочности при сжатии которых (а для ийолита и модуля упругости) также максимальны. Это означает, что для разрушения таких пород при одноосном сжатии требуется передать наибольшее количество упругой энергии, чем для всех остальных исследуемых горных пород, следовательно, они будут обладать наибольшей энергоемкостью. Как результат, уртур среднезернистый массивный (полевошпатовый до ювитов), уртур неравномерно-зернистый и ийолит трахитоидный будут способны выдерживать большие нагрузки и будут более устойчивы к разрушению при ведении горных работ. Однако обратной стороной высокого порога критической удельной энергии деформирования является тот факт, что при разрушении таких пород будет выделяться больше энергии (сейсмической, кинетической, тепловой и т.д.). Наиболее вероятными последствиями повышенного выделения энергии в

окружающую среду будут различного рода динамические проявления горного давления.

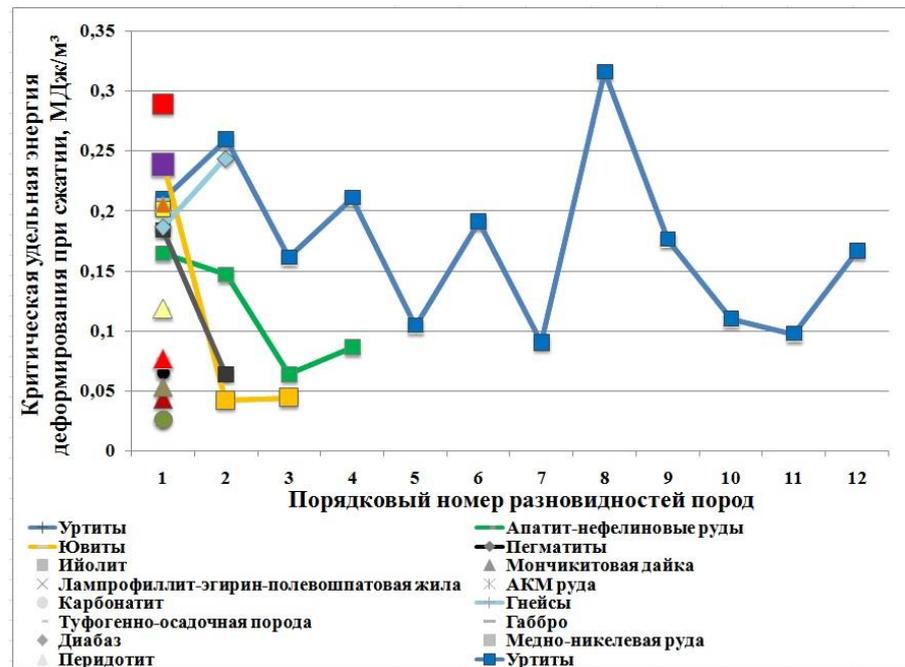


Рис. 2.16. Распределение средних величин критической удельной энергии деформирования при сжатии исследуемых литологических разновидностей скальных горных пород

Наименьшие значения критической удельной энергии деформирования при сжатии (Табл. 2.2, Рис. 2.16) установлены для ювита массивного мелко-среднезернистого со сфеном ($0,0442 \text{ МДж/м}^3$), ювита массивного мелко-среднезернистого с эвдиалитом и содовым налетом ($0,0422 \text{ МДж/м}^3$), карбонатита ($0,0256 \text{ МДж/м}^3$) и диабаза ($0,0434 \text{ МДж/м}^3$), величины пределов прочности при сжатии которых (а для ювита с содовым налетом и модуля упругости) также минимальны. Такие породы, в свою очередь, будут разрушаться при меньших значениях подаваемой из окружающей среды энергии деформирования и, следовательно, их энергоемкость будет минимальна. Выделяемая при этом энергия (сейсмическая, кинетическая, тепловая и т.д.) также будет меньше, что, в результате, будет способствовать уменьшению вероятности динамического проявления горного давления.

Согласно полученным данным (Табл. 2.2, Рис. 2.17), наибольшие значения критической удельной энергии деформирования при растяжении соответствуют породам Ждановского месторождения (свыше $0,0010 \text{ МДж/м}^3$). Из скальных пород

апатит-нефелиновых месторождений можно выделить ийолит трахитоидный (0,0010 МДж/м³), мончикитовую дайку (0,0011 МДж/м³) и лампрофиллит-эгириноплевошпатовую жилу (0,0013 МДж/м³). Наименьшие величины критической удельной энергии деформирования при растяжении установлены для всех исследуемых разновидностей апатит-нефелиновых руд (0,0002-0,0003 МДж/м³), а также кальцитового карбоната (0,0002 МДж/м³). Как и в случае с одноосным сжатием, породы с высокими критическими значениями будут иметь большую способность накапливать энергию упругого деформирования, по сравнению с породами, у которых критические значения невелики, но при этом вероятность возникновения динамических проявлений горного давления будет выше.

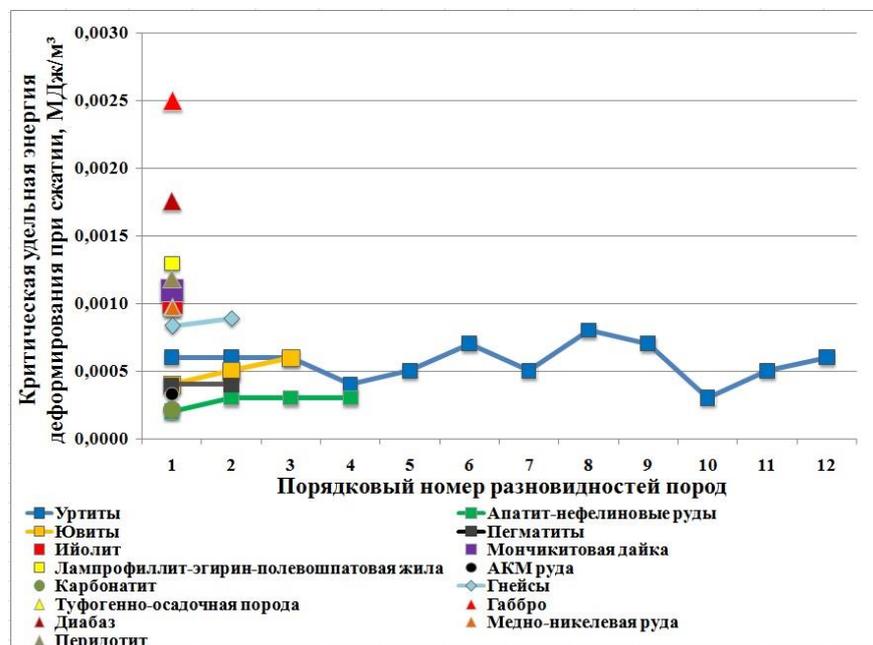


Рис. 2.17. Распределение средних величин критической удельной энергии деформирования при растяжении исследуемых литологических разновидностей скальных горных пород

На основе полученных данных выполнен сравнительный анализ энергоемкости и характера разрушения исследуемых скальных горных пород при одноосном сжатии (Табл. 2.3). По результатам такого анализа установлено, что породы с величиной критической удельной энергией деформирования свыше 0,0500 МДж/м³ разрушались в динамической форме с разлетом осколков и взрывоподобным звуком (Рис. 2.18). При этом наиболее интенсивное разрушение выявлено для образцов уртита неравномерно-зернистого, уртита среднезернистого

массивного (полевошпатового до ювитов) и ийолита трахитоидного. Величины критической удельной энергии деформирования таких пород являются самыми высоким (свыше 0,2500 МДж/м³).

Таблица 2.3. Энергоемкость и характер разрушения скальных горных пород Хибинского массива при одноосном сжатии

№ п/п	Горная порода	Критическая удельная энергия деформирования при сжатии, W^* (МДж/м ³)	Характер разрушения при одноосном сжатии
Апатит-нефелиновые месторождения Хибинского массива			
1. Уртиты			
1.1	Уртит среднезернистый массивный	0,2097	динамический
1.2	Уртит неравномерно-зернистый	0,2592	интенсивно динамический
1.3	Уртит пегматоидный	0,1610	динамический
1.4	Уртит массивный среднезернистый с полевым шпатом	0,2107	динамический
1.5	Уртит полевошпатовый со сфеном среднезернистый массивный	0,1042	слабо динамический
1.6	Уртит мелко-среднезернистый, среднезернистый массивный	0,1910	динамический
1.7	Уртит массивный, мелко-среднезернистый, с полевым шпатом и со сфеном	0,0904	слабо динамический
1.8	Уртит массивный, среднезернистый, полевошпатовый (до ювитов)	0,3159	интенсивно динамический
1.9	Уртит массивный среднезернистый с многочисленными эгириновыми прожилками	0,1760	динамический
1.10	Уртит массивный полевошпатовый с линзовидно-полосчатой апатит-нефелиновой рудой	0,1095	слабо динамический
1.11	Уртит полевошпатовый со сфеном, титаномагнетитом, среднезернистый массивный	0,0973	слабо динамический
1.12	Массивный уртит-ийолит среднезернистый	0,1666	динамический
2. Апатит-нефелиновые руды			
2.1	Линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда	0,1647	динамический

№ п/п	Горная порода	Критическая удельная энергия деформирования при сжатии, W^* (МДж/м ³)	Характер разрушения при одноосном сжатии
2.2	Пятнисто-линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда	0,1468	динамический
2.3	Пятнисто-линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда с вкраплениями титаномагнетита	0,0638	слабо динамический
2.4	Брекчия линзовидно-полосчатой апатит-нефелиновой руды на уртитовом цементе	0,0860	слабо динамический
3. Ювиты			
3.1	Ювит массивный, неравномерно-зернистый	0,2404	динамический
3.2	Ювит массивный мелко-среднезернистые с эвдиалитом и содовым налетом	0,0422	статический
3.3	Ювит массивный мелко-среднезернистые со сфеном, с вкраплениями эвдиалита, лампрофиллита	0,0442	статический
4. Пегматиты			
4.1	Пегматит крупнозернистый с эвдиалитом и лампрофиллитом	0,1841	динамический
4.2	Пегматиты с участками ийолитов, многочисленные миколитизации	0,0636	слабо динамический
5	Ийолит трахитоидный	0,2898	интенсивно динамический
6	Мончикитовая дайка	0,2390	динамический
7	Лампрофиллит-эгирин-полевошпатовая жила	0,2020	динамический
Ковдорское магнетит-apatит-бадделитовое месторождение			
8	Апатит-карбонатно-магнетитовая руда	0,0649	слабо динамический
9	Кальцитовый карбонатит	0,0256	статический
Железорудное месторождение Куркенпахк			
10. Гнейсы			
10.1	Гнейс серый	0,1866	динамический
10.2	Гнейс серый лейкократовый	0,2438	динамический
Ждановское медно-никелевое месторождение			
11	Туфогенно-осадочная порода	0,1182	слабо

№ п/п	Горная порода	Критическая удельная энергия деформирования при сжатии, W^* (МДж/м ³)	Характер разрушения при одноосном сжатии
			динамический
12	Габбро	0,0773	слабо динамический
13	Диабаз	0,0434	слабо динамический / статический
14	Сплошная медно-никелевая руда	0,2054	динамический
15	Серпентинизированный перидотит	0,0534	слабо динамический

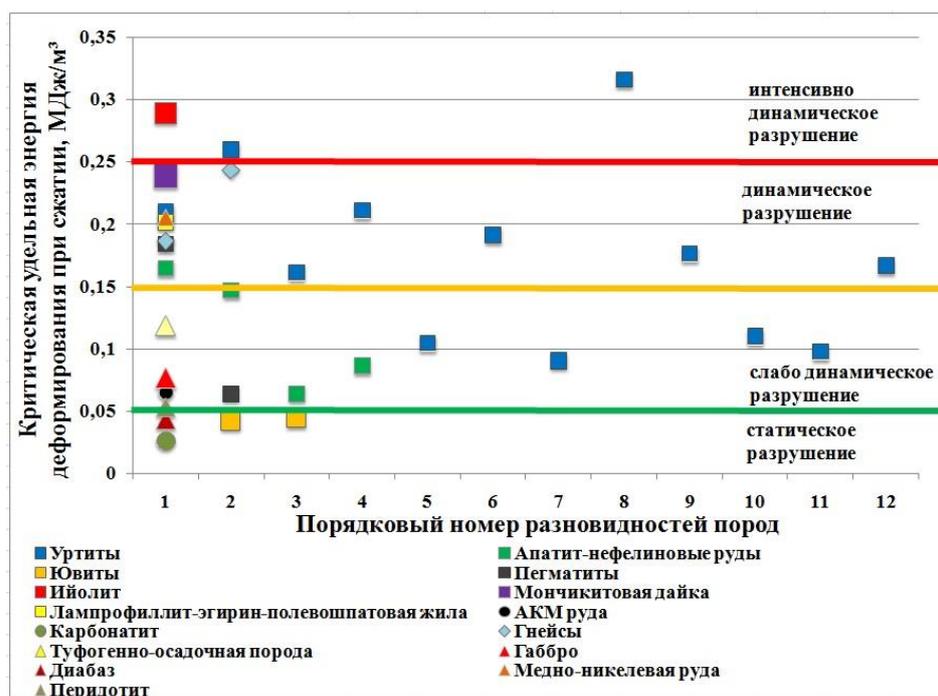


Рис. 2.18. Характер разрушения образцов исследуемых литологических разновидностей скальных горных пород при одноосном сжатии

Статический характер разрушения установлен для двух литологических разновидностей (Табл. 2.3, Рис. 2.18) - ювит мелко-среднезернистый массивный с эвдиалитом и содовым налетом, ювит мелко-среднезернистый массивный со сфеном и кальцитовый карбонатит, критическая удельная энергия деформирования

которых ниже $0,0500 \text{ МДж/м}^3$. Также часть образцов диабаза Ждановского месторождения разрушалась без динамических проявлений (средняя величина критической энергии $0,0434 \text{ МДж/м}^3$).

Таким образом, можно сделать следующий вывод о том, что скальные горные породы, величина критической удельной энергии деформирования которых ниже $0,0500 \text{ МДж/м}^3$, не склонны к динамическим разрушениям. В случае, если критическая энергия горных пород будет превышать величину $0,0500 \text{ МДж/м}^3$, то они будут склонны к динамическим видам разрушения. При этом наиболее опасными по таким видам разрушения будут породы со значениями энергии свыше $0,2500 \text{ МДж/м}^3$.

2.4. Результаты исследований механических свойств и энергоемкости разрушения скальных горных пород месторождений Кольского региона в условиях трехосного напряженного состояния

Исследование механических и энергетических параметров в условиях трехосного напряженного состояния было проведено для пяти разновидностей скальных горных пород месторождений Кольского региона (Рис. 2.19): линзовидно-полосчатой апатит-нефелиновой руды, уртита среднезернистого массивного, ийолита трахитоидного (месторождения Хибинского массива), гнейса серого лейкократового (месторождение Куркенпахк) и туфогенно-осадочной породы (Ждановское месторождение) [32, 60, 127].

Основная задача исследований 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), а также оценить характер разрушения таких пород.

Результаты выполненных испытаний для анализируемых литологических разновидностей представлены в таблице 2.4.



Рис. 2.19. Образцы исследуемых скальных горных пород: а) линзовидно-полосчатой апатит-нефелиновой руды, б) уррита среднезернистого массивного, в) ийолита трахитоидного, г) гнейса серого лейкократового; д) туфогенно-осадочной породы

Как следует из таблицы 2.4, значения пределов прочности образцов при трехосном сжатии увеличиваются с возрастанием величины бокового давления. Так, при $\sigma_{бок1,2} = 20$ МПа, прочность образцов уррита 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 2.20.

Табл. 2.4. Средние значения пределов прочности и критической удельной энергии деформирования образцов скальных горных пород месторождений Хибинского массива в условиях трехосного напряженного состояния

Порода	Боковое давление, $\sigma_{бок1,2}$ (МПа)	Предел прочности при трехосном сжатии, $\sigma_{тр}$ (МПа)	Модуль упругости, E (10^{-4} МПа)	Коэффициент Пуассона, ν	Критическая удельная энергия деформирования, $W_{*тр}$ (МДж/м ³)
Уртит среднезернистый	0	174	7,22	0,28	0,21
	5	310			0,65
	10	324			0,70

массивный	15	398			1,05
	20	470			1,46
Ийолит трахитоидный	0	227	8,89	0,22	0,29
	5	321			0,57
	10	381			0,80
	15	442			1,07
	20	500			1,36
Линзовидно- полосчатая апатит- нефелиновая руда	0	147	6,56	0,20	0,16
	5	278			0,58
	10	316			0,74
	15	470			1,64
Гнейс серый лейкократовый	0	192	7,56	0,17	0,24
	10	276			0,49
	20	343			0,75
	30	386			0,94
Туфогенно- осадочная порода	0	140	8,29	0,24	0,12
	10	155			0,14
	20	216			0,26
	30	242			0,32

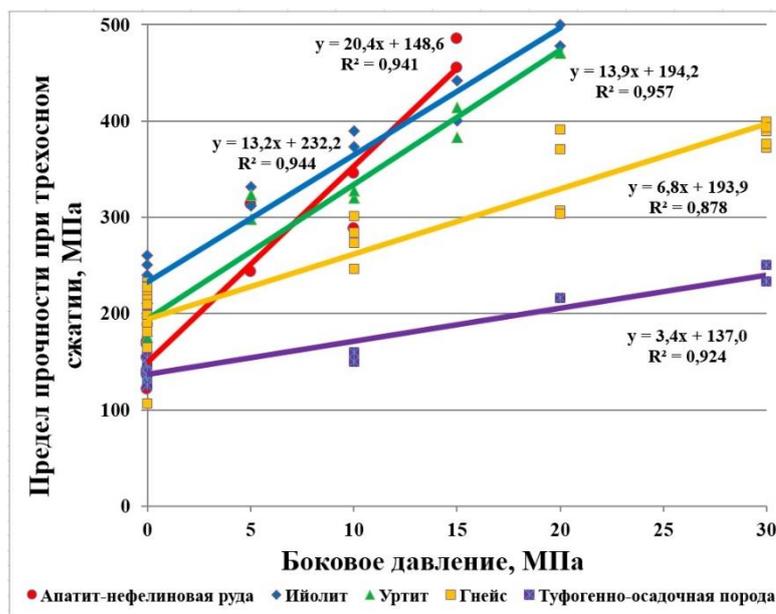


Рис. 2.20. Зависимость значений пределов прочности при трехосном сжатии образцов исследуемых скальных горных пород от величин бокового давления

Из рисунка 2.20 следует, что характер изменения величин прочности с увеличением бокового давления при трехосном сжатии образцов ийолита и уррита является схожим. Для образцов апатит-нефелиновой руды установлена иная тенденция, а именно - резкое возрастание прочности при небольшом увеличении боковой нагрузки.

Для исследуемых скальных горных пород установлены следующие корреляционные зависимости изменения величин пределов прочности при трехосном сжатии от бокового давления (для апатит-нефелиновой руды (2.14), для ийолита (2.15), для уртита (2.16), для гнейса (2.17) и для туфогенно-осадочной породы (2.18):

$$\sigma_{mp}=20,4\sigma_{бок}+148,6, R^2=0,941, F_{табл}=4,84 < F_{факт}=175, \quad (2.14)$$

$$\sigma_{mp}=13,2\sigma_{бок}+232,2, R^2=0,944, F_{табл}=4,75 < F_{факт}=202, \quad (2.15)$$

$$\sigma_{mp}=13,9\sigma_{бок}+194,2, R^2=0,957, F_{табл}=4,75 < F_{факт}=267, \quad (2.16)$$

$$\sigma_{mp}=6,8\sigma_{бок}+193,9, R^2=0,878, F_{табл}=4,07 < F_{факт}=302, \quad (2.17)$$

$$\sigma_{mp}=3,4\sigma_{бок}+137,0, R^2=0,924, F_{табл}=4,96 < F_{факт}=122, \quad (2.18)$$

где σ_{mp} – предел прочности при трехосном сжатии, МПа; $\sigma_{бок}$ – боковое давление, МПа, R^2 – достоверность аппроксимации, $F_{факт}$ – фактическое значение F-критерия Фишера, $F_{табл}$ – максимально возможное значение критерия Фишера под влиянием случайных факторов.

По F-критерию Фишера определено, что при уровне значимости α равном 0,05 корреляционные зависимости (2.14-2.18) являются статистически значимыми и надежными ($F_{табл} < F_{факт}$).

Если провести горизонтальную прямую (Рис. 2.21, 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.

Таким образом, можно сделать предположение, что угол α характеризует 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:

$$\sigma_{тр} = \sigma_{сж} + \sigma_{бок} \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.19)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности при одноосном сжатии.

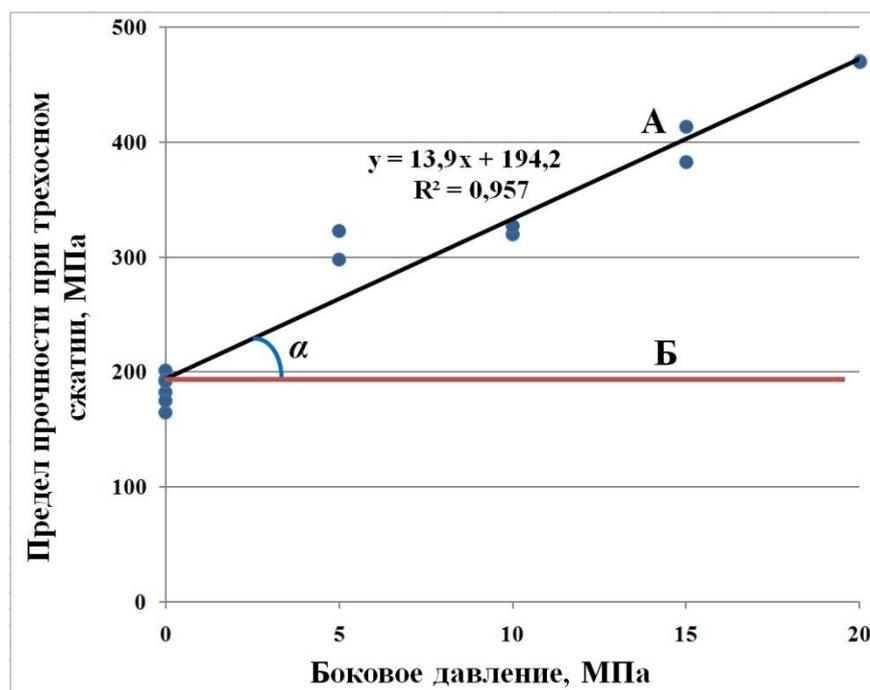


Рис. 2.21. Зависимость значений пределов прочности при трехосном сжатии от величин бокового давления (на примере образцов уртита среднезернистого массивного); А - линия тренда; Б - условная горизонтальная линия, проведенная из точки пересечения прямой А с осью ординат; α - угол между прямыми А и Б

Результаты определений средних значений критической удельной энергии деформирования исследуемых скальных горных пород при трехосном сжатии представлены в таблице 2.4. Как и в случае с прочностными характеристиками, величины критической удельной энергии возрастают с увеличением бокового давления. При $\sigma_{бок1,2} = 20$ 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. Графически полученные результаты испытаний представлены на рисунке 2.22.

Как следует из рисунка 2.22, изменение значений критической удельной энергии деформирования уртита и ийолита с увеличением бокового давления

происходит почти одинаково. Другая ситуация наблюдается для образцов линзовидно-полосчатой апатит-нефелиновой руды: до значения бокового давления равного 10 МПа характер изменения их величин критической энергии деформирования сопоставим с образцами ийолита и уррита, однако при значении бокового давления равном 15 МПа наблюдается резкий скачок этих величин. Такое поведение объясняется интенсификацией процесса упрочнения горной породы, прочность которой была изначально невысока, с увеличением бокового давления. В связи с этим скачкообразно увеличивается и ее значение критической удельной энергии деформирования. Более прочные породы в этом случае показывают постепенный рост таких значений при боковом давлении до 20-30 МПа.

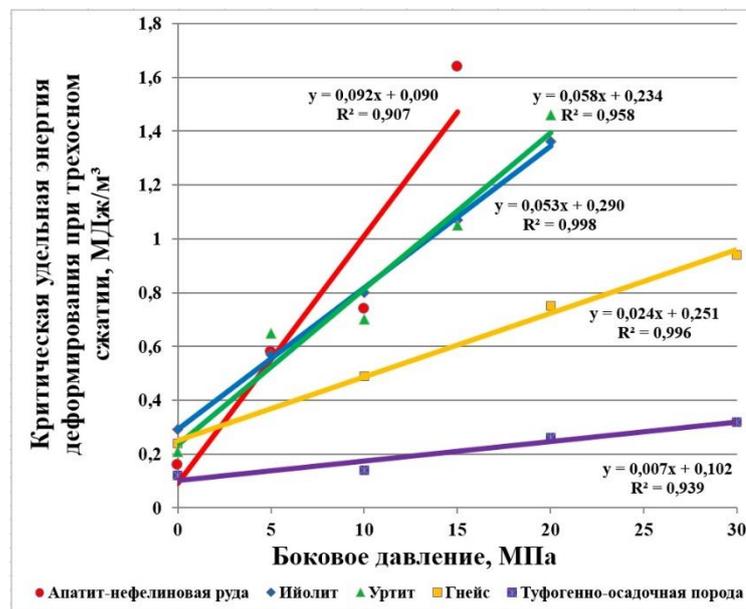


Рис. 2.22. Зависимость значений критической удельной энергии деформирования при трехосном сжатии образцов исследуемых скальных горных пород от величин бокового давления

На основании полученных данных установлены корреляционные зависимости изменения значений критической удельной энергии деформирования образцов пород при трехосном сжатии от бокового давления для апатит-нефелиновой руды (2.20), для ийолита (2.21), для уррита (2.22), для гнейса (2.23) и для туфогенно-осадочной породы (2.24):

$$w_{*гр} = 0,092\sigma_{бок} + 0,090, R^2 = 0,907, F_{табл} = 18,5 < F_{факт} = 20, \quad (2.20)$$

$$w_{*гр} = 0,053\sigma_{бок} + 0,290, R^2 = 0,998, F_{табл} = 10,1 < F_{факт} = 1497, \quad (2.21)$$

$$w_{*гр} = 0,058\sigma_{бок} + 0,234, R^2 = 0,958, F_{табл} = 10,1 < F_{факт} = 68, \quad (2.22)$$

$$w_{*гр} = 0,024\sigma_{бок} + 0,251, R^2 = 0,996, F_{табл} = 18,5 < F_{факт} = 398, \quad (2.23)$$

$$w_{*гр} = 0,007\sigma_{бок} + 0,102, R^2 = 0,939, F_{табл} = 18,5 < F_{факт} = 31, \quad (2.24)$$

где $W_{*сж}$ – критическая удельная энергия деформирования горных пород при трехосном сжатии.

По F-критерию Фишера определено, что при уровне значимости α равном 0,05 корреляционные зависимости (2.20-2.24) являются статистически значимыми и надежными ($F_{табл} < F_{факт}$).

Наименьший рост значений критической удельной энергии деформирования в условиях трехосного сжатия установлен для туфогенно-осадочной породы. Прочность и величина энергии при одноосном сжатии этой породы сопоставимы со значениями этих параметров для апатит-нефелиновой руды, однако в условиях трехосного сжатия их изменение различно. Главным образом это связано с внутренним строением пород. Апатит-нефелиновая руда является преимущественно среднезернистой, а туфогенно-осадочная порода имеет монолитную мелкозернистую структуру. В связи с этим процесс их упрочнения при увеличении бокового давления происходит также по разному.

Таким образом, в условиях трехосного сжатия величины критической удельной энергии деформирования образцов скальных горных пород увеличиваются с повышением значений бокового давления. Это, в свою очередь, дает возможность более интенсивно воздействовать на такие породы при ведении горных работ. Однако, при достижении удельной энергии деформирования своих критических величин, высвобожденная энергия в окружающий массив может превосходить на порядок ту, что была бы высвобождена в условиях одноосного сжатия. Как результат, вероятность динамического проявления горного давления будет выше, а последствия такого проявления будут гораздо более серьезными.

Выводы по главе 2.

Проведенные экспериментальные исследования механических свойств и энергоемкости разрушения образцов скальных горных пород позволили установить ряд важных закономерностей, связанных с условиями нагружения образцов.

При одноосном сжатии наибольшие величины критической удельной энергии деформирования установлены для скальных горных пород, значения прочности и модуля упругости которых также являются одними из самых высоких. Такие породы будут более устойчивы к нагрузкам, однако при их разрушении будет выделяться больше энергии (сейсмической, кинетической, тепловой и т.д.), что может привести к увеличению вероятности возникновения динамических разрушений. И наоборот, наименьшие величины критической удельной энергии деформирования имеют те породы, значения прочности и модуля упругости которых низкие. В этом случае при их разрушении будет выделяться меньшее количество энергии (сейсмической, кинетической, тепловой и т.д.), что уменьшит вероятность возникновения динамических разрушений.

По результатам сопоставления энергоемкости 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 $0,25 \text{ МДж/м}^3$.

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 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.

На основании результатов проведенных исследований сформулировано первое научное положение:

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.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ СКЛОННОСТИ СКАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД К ДИНАМИЧЕСКИМ РАЗРУШЕНИЯМ В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ

При отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах и в скальных массивах с преобладающим действием тектонических напряжений все чаще сталкиваются с проблемой динамических проявлений горного давления [44, 48, 57, 123, 137, 150]. В ряде случаев такие проявления происходят в виде горных ударов и техногенных землетрясений, последствия которых иногда носят катастрофический характер. В связи с этим возникает необходимость предварительно проводить оценку удароопасности массива пород отрабатываемых месторождений.

Главными факторами, влияющими на динамические разрушения в массиве являются способность горных пород к хрупкому разрушению и высокая напряженность массивов пород [44, 82, 110]. Изучение этих факторов позволяет выявлять потенциально удароопасные участки массива. В первом случае проводят лабораторные испытания, по результатам которых определяют деформационные и энергетические параметры горных пород и их склонность к динамическим разрушениям. Во втором случае необходимо проведение специальных измерений *in situ*, позволяющих установить величины действующих напряжений в массиве.

На данный момент большинство методов оценки степени удароопасности породных массивов основываются на результатах определения свойств слагающих пород с использованием различных критериев. На практике в большей степени применяют критерии И.М. Петухова [83] и А.Н. Ставрогина [101], которые заключаются в построении полных диаграмм деформирования горных пород (Рис. 3.1) и сопоставлении их деформационных параметров до и за пределом прочности. Такой подход регламентируется действующими на территории Российской Федерации методическими рекомендациями по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам [69].

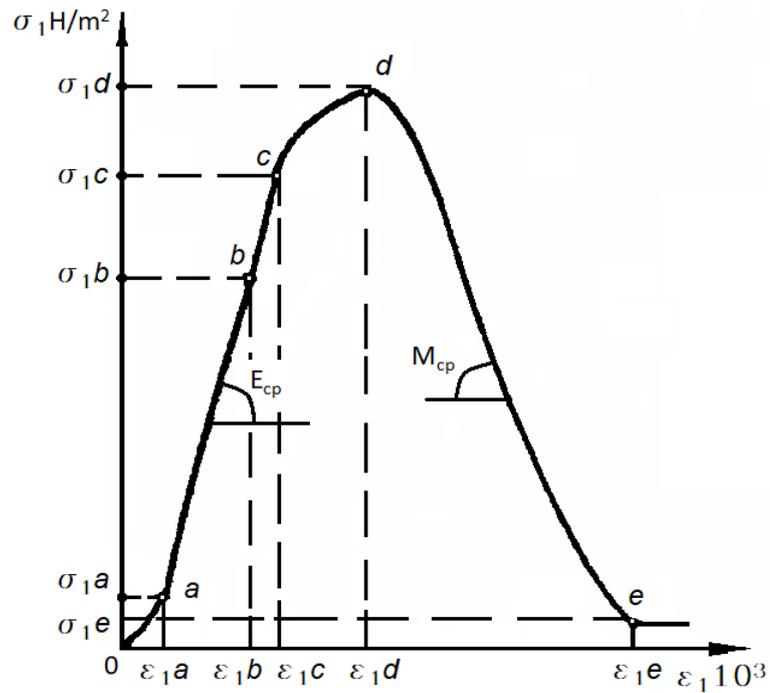


Рис. 3.1. Типовая схема деформирования твёрдых горных пород (полная диаграмма) в условиях одноосного напряжённого состояния: σ_1 – нормальное напряжение; ε_1 – линейная (продольная) деформация. Характерные участки диаграммы: 0-a – участок изменения контактных условий испытываемого объёма пород; a-b – участок идеально упругого деформирования, σ_{1a} – максимальное значение напряжений, при которых стабилизируются контактные условия испытываемого объёма пород, σ_{1b} – предел идеальной упругости; b-c – участок неидеально упругого деформирования, σ_{1c} – предел упругости; c-d – участок пластического деформирования, σ_{1d} – предел прочности; d-e – участок запредельного деформирования, σ_{1e} – остаточная прочность; $E_{ср}$ и $M_{ср}$ – соответственно средние значения модуля упругости и модуля спада.

По соотношению модуля спада M (на запредельной стадии деформирования) и модуля деформации E (на допредельной стадии) $\xi = M/E$ можно судить о склонности пород к тому или иному режиму разрушения. Чем больше показатель ξ , тем больше вероятность разрушений с интенсивным выделением энергии, т.е. динамических проявлений горного давления (горных ударов, техногенных землетрясений и др.). В принципе, горные породы, для которых $\xi \rightarrow 0$, следует классифицировать как идеально пластичные, а при $\xi \rightarrow \infty$ как идеально хрупкие.

В результате появляется возможность оценивать склонность горных пород к динамическим разрушениям на основании сопоставления указанных модулей. Однако выполнение этих оценок в настоящее время сдерживается отсутствием промышленного изготовления испытательных установок с повышенной жёсткостью, что необходимо для получения запредельных характеристик. В связи с этим возникла потребность в разработке метода, позволяющего определять склонность к динамическим разрушениям горных пород по результатам испытаний на стандартных прессах по стандартным методикам без получения полного графика деформирования.

Данная задача является актуальной как для условий отработываемых месторождений Кольского региона, преимущественно сложенных хрупкими скальными горными породами, так и для других месторождений, в отношении которых ставится вопрос об отнесении их к склонным и опасным по горным ударам.

3.1. Оценка склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям по результатам испытаний при одноосном сжатии (упрощенная методика)

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 [42, 43, 140]. Для решения поставленной задачи проведены испытания скальных горных пород Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений (Хибинский массив) - апатит-нефелиновой руды, ийолита и уртитов (Рис. 3.1). Также с целью увеличения степени достоверности получаемых результатов проведены испытания апатит-карбонатно-магнетитовой руды и карбонатита Ковдорского месторождения (Ковдорский массив) и гнейсов железорудного месторождения Куркенпахк (Заимандровский железорудный район) (Рис. 3.1).

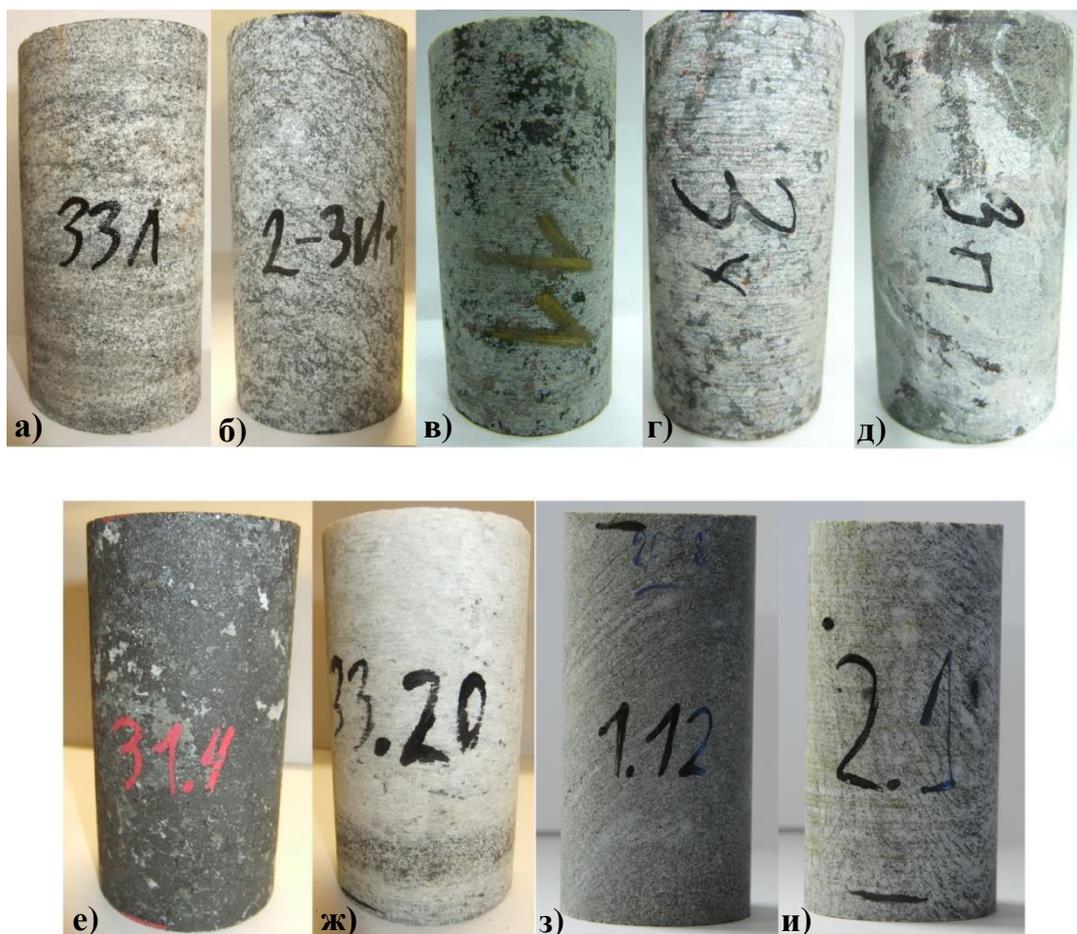


Рис. 3.2. Образцы исследуемых скальных горных пород:

а) линзовидно-полосчатой апатит-нефелиновой руды; б) ийолита трахитоидного; в) уррита среднезернистого массивного; г) уррита неравномерно-зернистого; д) уррита пегматойдного; е) апатит-карбонатно-магнетитовой руды; ж) кальцитового карбонатита; з) гнейса серого; и) гнейса серого лейкократового

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, установленных в центральной части образцов, что позволяет избежать влияния сил

трения на опорных торцах образцов и соответствует требованиям стандартных методик испытания при одноосном сжатии. 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 3.3. 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.

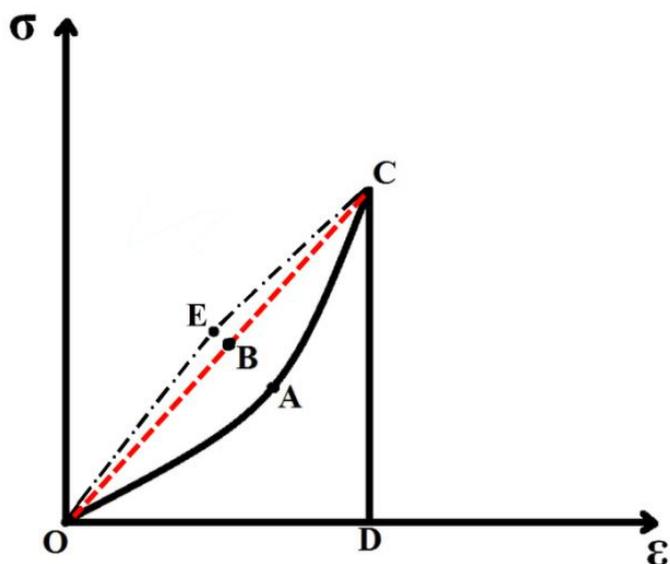


Рис. 3.3. Графики деформирования скальных горных пород, установленные по результатам испытаний: σ - нормальное напряжение, ε - относительная продольная деформация

Как следует из рисунка 3.3, графики деформирования изучаемых скальных горных пород могут иметь вогнутую и выпуклую форму относительно идеальной

прямой линии (показана пунктиром), которая характеризует идеально упругое деформирование материала.

Величина энергии деформирования пород до предела прочности ($W_{п}$) определяется как значение определённого интеграла:

$$W_{п} = \int_0^D \sigma(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (3.1)$$

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

Величина энергии при идеально упругом деформировании ($W_{и.у.}$) определяется как площадь треугольника OBCD в координатах σ - ε (Рис. 3.3):

$$W_{и.у.} = S_{OBCD} = \frac{OD \cdot DC}{2} \quad (3.2)$$

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.

На рисунках 3.4 и 3.5 приведены графики деформирования образца трахитоидного ийолита и уртита неравномерно-зернистого - одних из самых прочных исследуемых горных пород.

Из рисунков 3.4 и 3.5 следует, что график деформирования образца уртита (№ 18) имеет слабо выпуклый вид, а образца ийолита (№ 2Ит-3) - слабо вогнутый вид. Оба графика аппроксимируются полиномом третьей степени. При этом после нагрузки-разгрузки до 30% от предела прочности на сжатие деформация вернулась в ноль, что говорит о, практически, идеально упругом характере деформирования. Образцы разрушались в ярко выраженном динамическом режиме с интенсивным выделением энергии, сильным звуком и разлётом фрагментов.

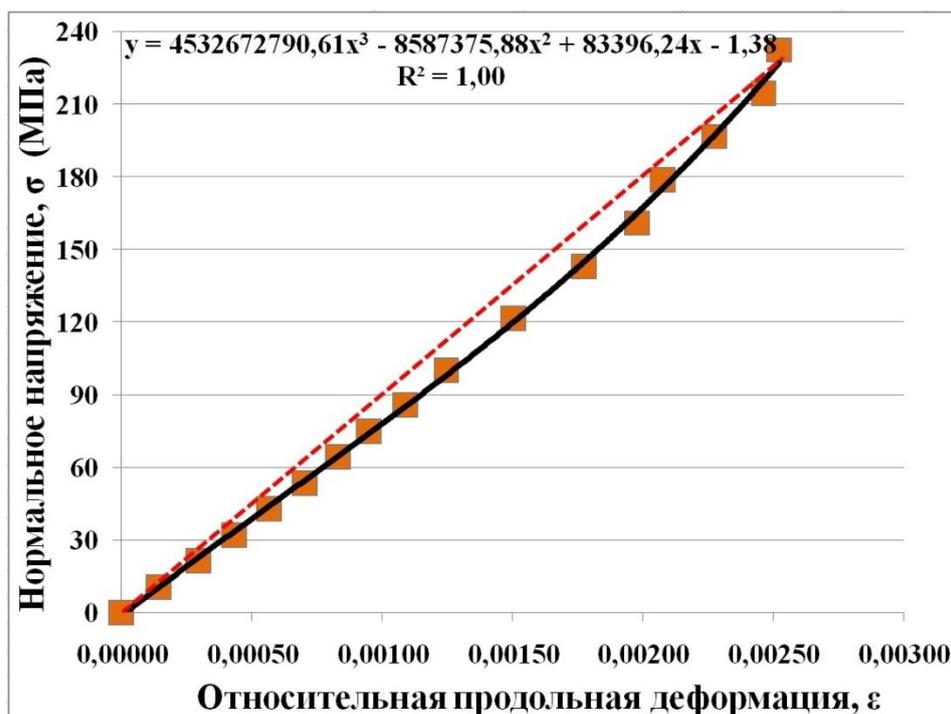


Рис. 3.4. График деформирования образца ийолита трахитоидного (образец № 2Ит-3); пунктир - условная линия идеально упругого деформирования

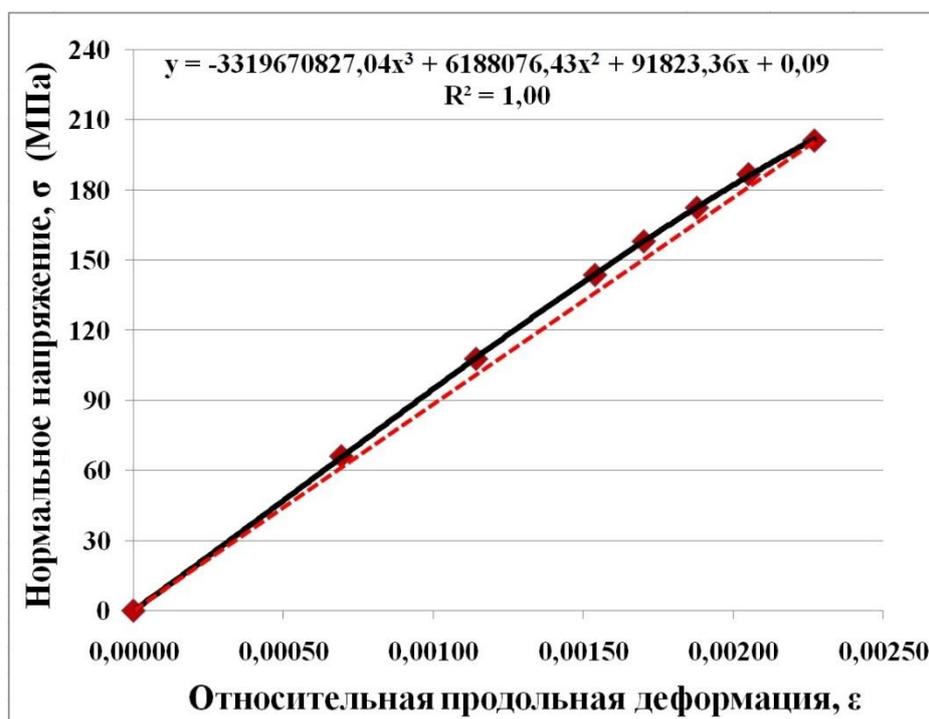


Рис. 3.5. График деформирования образца уррита неравномерно-зернистого (образец № 18); пунктир - условная линия идеально упругого деформирования

Вычисленная величина энергии для образцов ийолита в среднем равна $W_{п}=0,1856$ МДж/м³, что на 0,0160 МДж/м³ (8%) меньше величины $W_{и.у.}$, а образцов

уртита неравномерно-зернистого - $0,2376 \text{ МДж/м}^3$, что на $0,0022 \text{ МДж/м}^3$ (1%) меньше $W_{и.у.}$.

Для сравнения на рисунке 3.6 приведены результаты испытаний одного из образцов (№ 33.43) самой слабой из исследуемых скальных горных пород - кальцитового карбонатита Ковдорского массива.

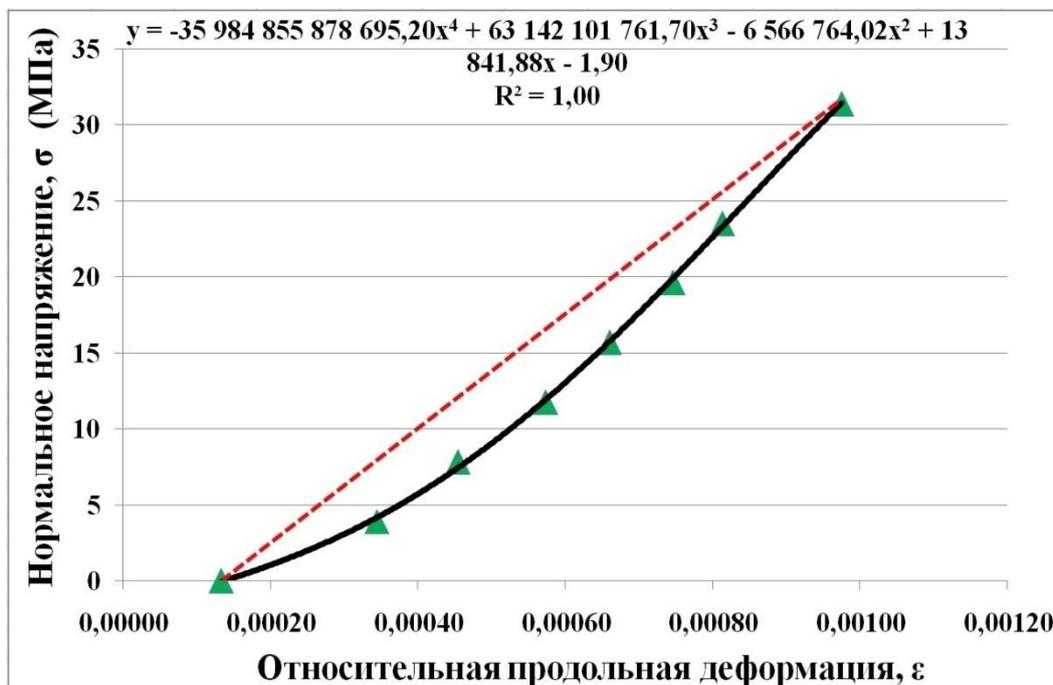


Рис. 3.6. График деформирования образца кальцитового карбонатита (образец № 33.43); пунктир - условная линия идеально упругого деформирования

График деформирования на рисунке 3.6 имеет вогнутый вид и аппроксимируется полиномом четвертой степени с высокой степенью достоверности. При этом график деформирования начинается не с нуля из-за того, что в ходе цикла нагрузки-разгрузки до 30% от предела прочности на сжатие в образце произошли необратимые деформации. Разница между величинами реальной и расчетной идеально упругой энергиями в среднем для образцов карбонатита составляет 28 %. Разрушения происходили без разлёта осколков в явно статическом режиме. Подобный характер деформирования был установлен для всех остальных исследуемых образцов карбонатита.

Что касается других типов испытанных пород, то их деформирование происходило в некотором промежуточном режиме по сравнению с деформированием уртита 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 $W_{\text{п}}$ и условно расчётной энергией $W_{\text{и.у.}}$ колебалось в относительно небольших пределах (0-10%). Образцы этих пород разрушались менее интенсивно, но разлёт осколков имел место.

В таблице 3.1 приведены результаты определения энергетических параметров исследуемых скальных горных пород месторождений Кольского региона [140].

Табл. 3.1. Результаты определения энергетических параметров исследуемых скальных горных пород при одноосном сжатии до разрушения

№ п/п	Наименование горных пород	Удельная энергия идеально упругого деформирования, $W_{\text{и.у.}}$ (МДж/м ³)	Удельная энергия деформирования при разрушении (реальная), $W_{\text{п}}$ (МДж/м ³)	Разница между $W_{\text{и.у.}}$ и $W_{\text{п}}$		Заключение о склонности к динамическому разрушению
				МДж/м ³	%	
1	Ийолит трахитоидный	0,1401	0,1298	0,0103	7	склонен
		0,2923	0,2619	0,0304	10	
		0,1723	0,1650	0,0072	4	
		0,2016	0,1856	0,0160	8	
2	Уртит неравномерно-зернистый с эгирином	0,2543	0,2430	0,0112	4	склонен
		0,2281	0,2389	-0,0107	-5	
		0,2422	0,2316	0,0105	4	
		0,2347	0,2370	-0,0024	-1	
3	Уртит среднезернистый массивный	0,2398	0,2376	0,0022	1	склонен
		0,1426	0,1426	0,0000	0	
		0,1591	0,1580	0,0011	1	
		0,2015	0,1996	0,0019	1	
		0,2010	0,2030	-0,0020	-1	
4	Уртит пегматоидный	0,1760	0,1758	0,0002	0	склонен
		0,1073	0,0960	0,0113	11	
		0,1922	0,1872	0,0051	3	
		0,1260	0,1249	0,0011	1	
		0,1191	0,1215	-0,0025	-2	
5	Линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда	0,1361	0,1324	0,0037	3	склонен
		0,1430	0,1197	0,0233	16	
		0,1554	0,1507	0,0047	3	
		0,1122	0,1120	0,0003	0	
		0,1746	0,1642	0,0104	6	
		0,0860	0,0763	0,0097	11	
		0,1343	0,1246	0,0097	7	

№ п/п	Наименование горных пород	Удельная энергия идеально упругого деформирования, $W_{и.у.}$ (МДж/м ³)	Удельная энергия деформирования при разрушении (реальная),	Разница между $W_{и.у.}$ и $W_{п}$		Заключение о склонности к динамическому разрушению
6	Гнейс серый	0,1451	0,1415	0,0036	2	склонен
		0,0946	0,0927	0,0019	2	
		0,1795	0,1826	-0,0032	-2	
		0,0840	0,0769	0,0071	8	
		0,1258	0,1234	0,0024	2	
7	Гнейс серый лейкократовый	0,1366	0,1275	0,0090	7	склонен
		0,1832	0,1642	0,0189	10	
		0,0845	0,0770	0,0076	9	
		0,0877	0,0741	0,0137	16	
		0,1230	0,1107	0,0123	10	
8	Кальцитовый карбонатит	0,0066	0,0054	0,0012	18	не склонен
		0,0113	0,0079	0,0033	30	
		0,0171	0,0129	0,0042	25	
		0,0169	0,0125	0,0044	26	
		0,0169	0,0109	0,0060	35	
		0,0137	0,0099	0,0038	28	
9	Апатит- карбонатно- магнетитовая руда	0,0502	0,0409	0,0012	2	склонен
		0,0470	0,0469	0,0001	0	
		0,0412	0,0408	0,0004	1	
		0,0405	0,0396	0,0009	2	
		0,0432	0,0404	0,0028	6	
		0,0444	0,0433	0,0011	2	

Из таблицы 3.2 следует, что наибольшие величины реальной удельной энергии деформирования ($W_{п}$) соответствуют образцам уррита среднезернистого массивного, ийолита трахитоидного и уррита неравномерно-зернистого, прочностные и деформационные свойства которых самые высокие (Табл. 3.1). Наименьшее значение реальной энергии деформирования установлено для кальцитового карбонатита - самой слабой из исследуемых скальных горных пород (Табл. 3.1). Остальные породы занимают промежуточное положение по этому показателю.

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.

3.2. Оценка склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям по результатам анализа полного графика деформирования (методика А.Н. Ставрогина)

С целью увеличения степени достоверности проводимой по предложенной методике оценки выполнены испытания образцов на жестком прессе при одноосном сжатии. Для этого были выбраны два типа скальных горных пород Хибинского массива - линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда и уртит среднезернистый массивный (Рис. 3.2 а, в), и один тип пород Ковдорского массива - кальцитовый карбонатит (Рис. 3.2 ж). 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 (Рис. 3.7) с повышенной жесткостью (коэффициент жесткости нагрузочной рамы 3 ГН/м) в режиме контролируемых деформаций [43]. Подготовленные образцы имели форму цилиндра с отношением

высоты к диаметру равным 2, а их количество составляло 6 шт. для каждого типа горной породы.



Рис. 3.7. Сервогидравлическая испытательная установка MTS 816 с повышенной жесткостью в конфигурации на одноосное сжатие

В ходе исследования образцы нагружали до 30% от предела прочности при сжатии и разгружали. Затем их нагружали до разрушения в контролируемом режиме, чтобы получить запредельную ветвь деформирования. Величины продольных деформаций образцов регистрировали при помощи экстензометров фирмы MTS. Схема и пример расположения экстензометров на образце представлены на рисунке 3.8.

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

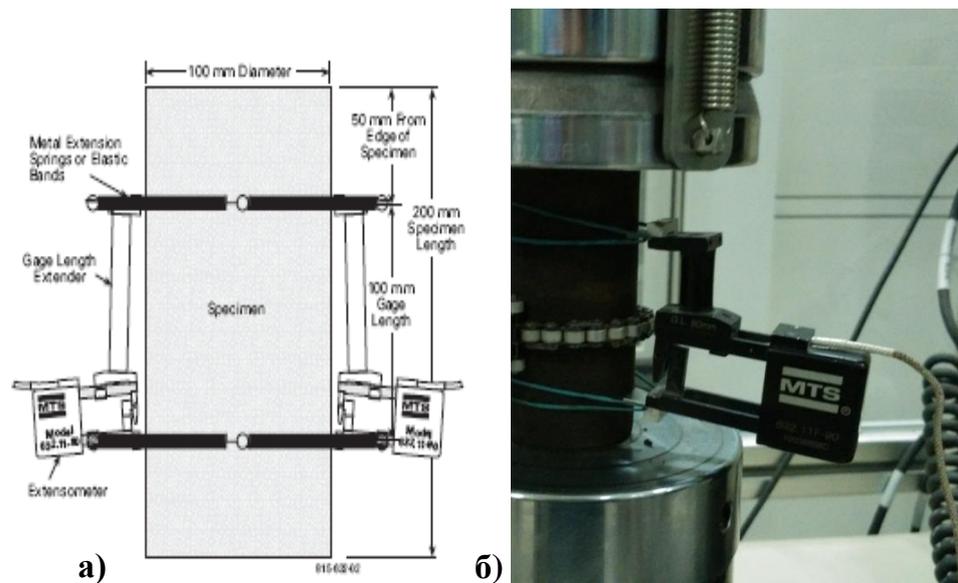


Рис. 3.8. Расположение экстензометров на образце: а) схема; б) пример

Оценку склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям выполняли по критерию А.Н. Ставрогина и А.Г. Протосени [101] на основании сопоставления величин модуля упругости и модуля спада (3.3). 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.

$$K_1 = E/M, \quad (3.3)$$

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

Полные графики деформирования образцов исследуемых скальных горных пород, полученные по результатам выполненных в Санкт-Петербургском Горном университете испытаний, представлены на рисунках 3.9-3.11.

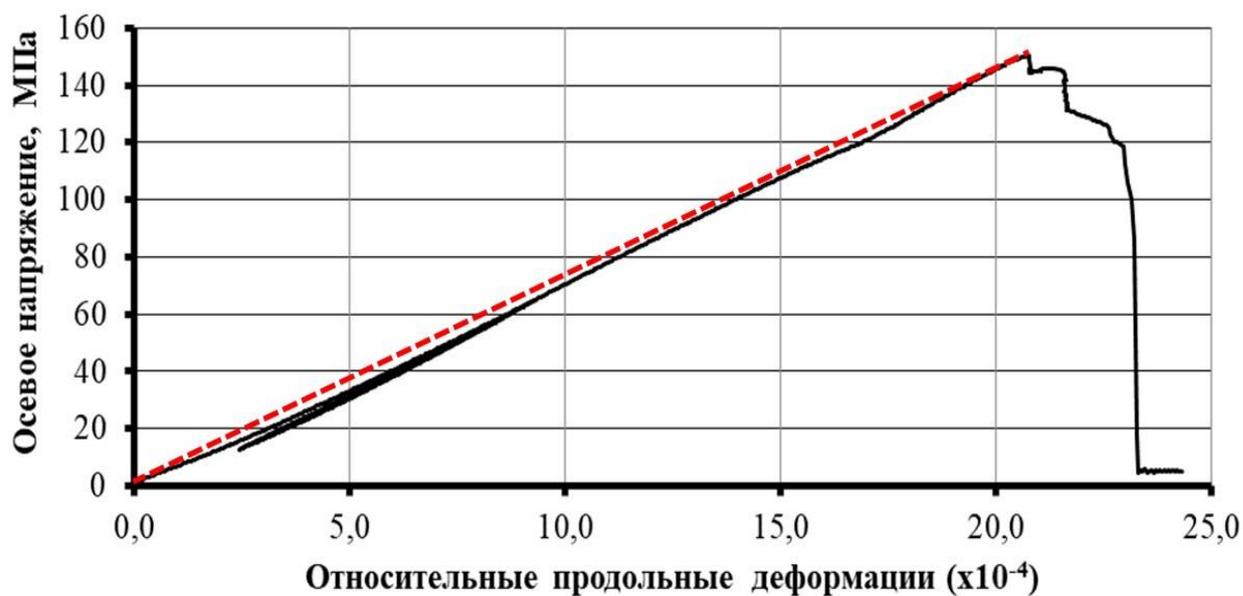


Рис. 3.9. График деформирования образца уррита среднезернистого массивного № 7-16

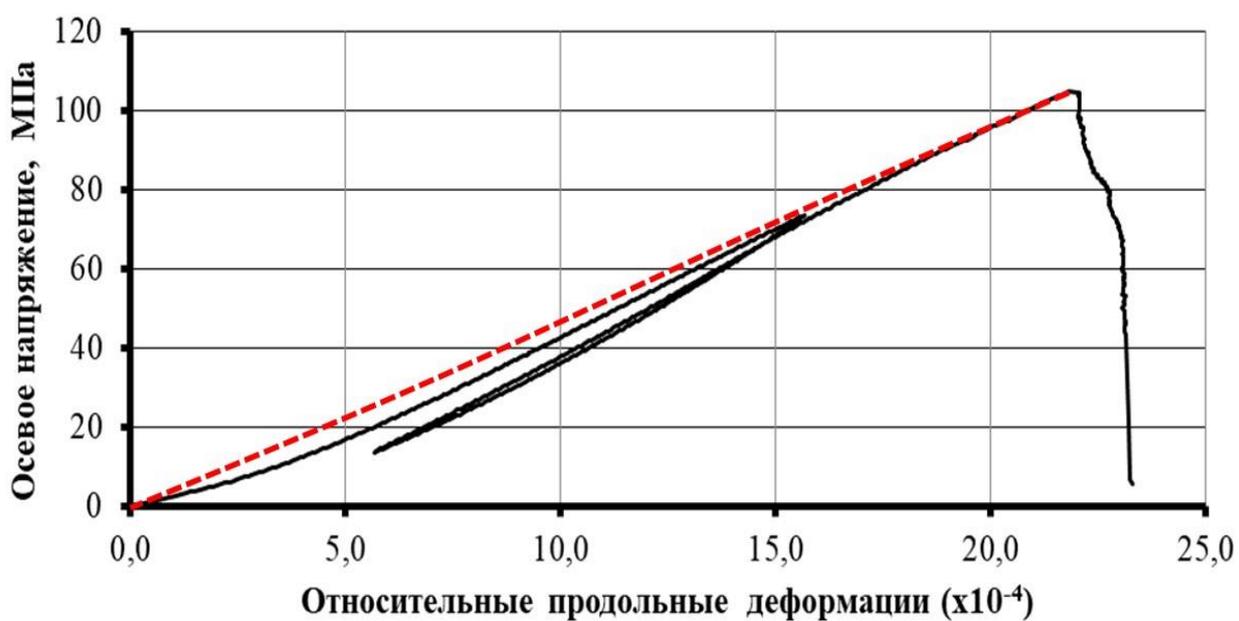


Рис. 3.10. График деформирования образца линзовидно-полосчатой апатит-нефелиновой руды № 4-13

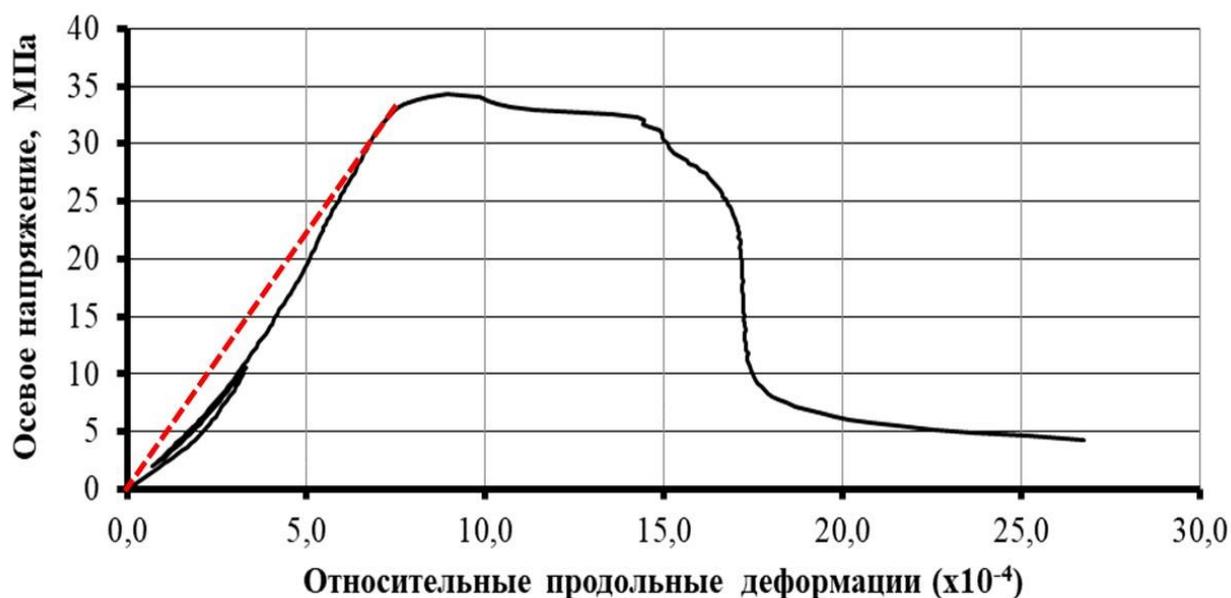


Рис. 3.11. График деформирования образца кальцитового карбонатита № 1-8-4

Из рисунка 3.9 следует, что для образца уррита № 7-16 запредельная ветвь деформирования обрывается достаточно круто, как и для всех остальных образцов данной породы. При этом график до предела прочности почти полностью совпадает с условной линией идеально упругого деформирования. Подобное поведение характерно для склонных к динамическим разрушениям пород.

Графики деформирования образцов апатит-нефелиновой руды (Рис. 3.10) в большинстве случаев похожи на графики, полученные для урритов, однако расхождение с условной линией идеально упругого деформирования больше.

Для образцов карбонатита график деформирования за пределом прочности имеет форму плавной ниспадающей кривой (Рис. 3.11). Участок графика до предела прочности, в свою очередь, имеет отчетливо вогнутый вид. Такой характер деформирования в большей степени соответствует горным породам, не склонным к динамическим разрушениям.

Результаты определений деформационных характеристик и коэффициентов удароопасности исследуемых скальных горных пород представлены в таблице 3.2.

Табл. 3.2. 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 среднезернистый массивный	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
Линзовидно-полосчатая 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
Кальцитовый 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

Как следует из данных таблицы 3.3, наибольшие значения модулей упругости и спада установлены для уррита и апатит-нефелиновой руды. Образцы этих пород разрушались интенсивно с сильным разлетом осколков и взрывоподобным звуком. В свою очередь, наименьшие значения модулей упругости и спада определены для карбонатита. В этом случае разрушение образцов происходило в спокойном режиме в виде проседания под приложенной нагрузкой и без разлета осколков.

По результатам испытаний (Табл. 3.3) установлено, что для всех образцов уррита 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.

3.3. Сопоставление результатов оценки склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям (упрощенная методика и методика А.Н. Ставрогина)

По результатам оценки склонности к динамическим разрушениям скальных горных пород Хибинского и Ковдорского массивов, выполненной на основании данных о характере деформирования и накопления энергии в образцах до предела прочности при одноосном сжатии, установлено, что наиболее склонным к таким видам разрушения является уртит среднезернистый массивный. Разница между величинами реальной удельной энергией деформирования (W_p) и расчетной идеально упругой энергией ($W_{и.у.}$) для образцов данной породы составляет в среднем 0 %, а графики зависимости "напряжение-деформация" почти совпадают или полностью совпадают с линией идеально упругого деформирования.

В меньшей степени склонными к динамическим разрушениям являются линзовидно-полосчатые апатит-нефелиновые руды. Для них разница между величинами W_p и $W_{и.у.}$ в среднем составляет 7 %, а графики деформирования имеют слегка вогнутый вид.

Несклонным к динамическим разрушениям является кальцитовый карбонатит. Для образцов данной породы разница между величинами реальной и расчетной идеально упругой энергиями составляет в среднем 28 %, а график деформирования имеет сильно вогнутый вид.

Таким образом, согласно предложенному подходу оценки склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям установлено, что склонными к таким видам разрушения являются уртит среднезернистый массивный и линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда, а несклонным - кальцитовый карбонатит.

По результатам испытаний образцов скальных горных пород Хибинского и Ковдорского массивов на испытательной установке с повышенной жесткостью и сопоставления их допредельных и запредельных характеристик определено, что склонными к динамическим разрушениям являются среднезернистый массивный и линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда. Для этих пород значения коэффициентов удароопасности меньше единицы, графики деформирования за

пределом прочности обрываются достаточно круто, а графики деформирования до предела прочности близки к условной линии идеально упругого деформирования.

Для образцов кальцитового карбонатита установленные величины коэффициентов удароопасности в несколько раз превышают пороговое значение - единицу, графики деформирования за пределом прочности имеет форму плавной ниспадающей кривой, а графики деформирования до предела прочности имеет отчетливо вогнутый вид. Следовательно, данная порода является несклонной 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. Также представленные графики подтверждают идею о том, что характер деформирования склонных к динамическому разрушению пород близок к идеально упругому, тогда как несклонных - к пластическому.

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

Выводы по главе 3.

В ходе лабораторных исследований образцов скальных горных пород месторождений Кольского региона установлен характер их деформирования и накопления упругой энергии в условиях одноосного сжатия до предела прочности. Полученные результаты позволили сформулировать упрощенный критерий оценки склонности скальных пород к динамическому разрушению:

- 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.

Выполненный сопоставительный анализ результатов оценки склонности к динамическим разрушениям трех типов скальных горных пород Хибинского и Ковдорского массивов показал возможность использования предлагаемой методики без привлечения специализированных прессов с повышенной жесткостью.

Таким образом, определение склонности к разрушениям в динамической форме можно проводить на основании анализа допредельного графика деформирования образцов и величин их реальной и расчетной идеально упругой энергии.

Полученные результаты исследований также позволили установить, 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.

На основании результатов проведенных исследований сформулировано второе научное положение:

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.

ГЛАВА 4. ОЦЕНКА СКЛОННОСТИ СКАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД К ДИНАМИЧЕСКИМ РАЗРУШЕНИЯМ В УСЛОВИЯХ ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ

По современным представлениям напряжённо-деформированное состояние массивов скальных горных пород в самом общем случае обусловлено действием гравитационно-тектонических полей напряжений [40, 47, 49, 66, 99, 131]. При этом весьма высока вероятность разрушения хрупких пород в динамической форме, с выделением значительной энергии, накопленной в процессе деформирования, т.е. возникновение сейсмических явлений, вплоть до горных ударов и техногенных землетрясений.

На основании результатов экспериментальных исследований процессов деформирования и разрушения образцов горных пород предлагаются различные критерии отнесения их к склонным по горным ударам [83, 101, 123, 139, 149, 153, 157]. Необходимая информация для оценки склонности горных пород к динамическим формам разрушений может быть также получена из анализа графика их деформирования на допредельном участке при испытаниях на обычных прессах по стандартным методикам. Однако результаты испытаний при одноосном режиме нагружения характеризуют наихудшие (предельные) случаи разрушений, когда имеются свободные поверхности и отсутствуют боковые нагрузки.

Если процессы деформирования горных пород и накопления энергии в них исследовать в режиме трехосного нагружения, то могут быть установлены параметры возможных динамических разрушений пород в массиве. Это, в свою очередь, позволит выявить условия таких разрушений в исследуемых породах для конкретной горнотехнической ситуации и, таким образом, прийти к научно обоснованному прогнозу склонности пород к динамическим проявлениям горного давления.

На данный момент процессы накопления и выделения энергии породами в условиях трехосного сжатия, не смотря на длительную историю исследований, нуждаются в дальнейшем изучении с применением современного оборудования и испытательных установок. Также немаловажным является определение склонности горных пород к динамическим разрушениям при переходе от одноосного напряженного состояния к трехосному. Применительно к условиям

обрабатываемых месторождений Кольского региона данные задачи являются весьма актуальными.

4.1. Определение склонности скальных горных пород Хибинского и Ковдорского массивов к динамическим разрушениям в условиях трехосного сжатия

С целью изучения процессов накопления и выделения энергии при нагружении скальных горных пород в условиях трехосного сжатия, а также определения их склонности к динамическим разрушениям, были 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) (Рис. 4.1).



Рис. 4.1. Образцы исследуемых скальных горных пород: а) уррита среднезернистого массивного, б) кальцитового карбонатита, в) линзовидно-полосчатой апатит-нефелиновой руды

Испытания проводили в Санкт-Петербургском Горном университете на сервогидравлической установке MTS 815 (Рис. 4.2) с повышенной жесткостью в режиме контролируемых деформаций (скорость осевого деформирования - 0,3 мм/с) [37]. Подготовленные образцы имели форму цилиндра с отношением

высоты к диаметру равным 2, а их количество составляло 6 шт. для каждого литотипа горной породы.



Рис. 4.2. Сервогидравлическая испытательная установка MTS 815

В ходе исследований по два образца каждой разновидности пород нагружали до разрушения при боковых давлениях 10, 20 и 30 МПа. Величины продольных и поперечных деформаций образцов регистрировали при помощи экстензометров фирмы MTS, приспособленных для работы в условиях трехосного сжатия (при высоких давлениях, создаваемых рабочей жидкостью - минеральным маслом). Экстензометры устанавливали в центральной части образцов (Рис. 4.3), чтобы уйти от влияния сил трения на опорных торцах образцов.



Рис. 4.3. Образец, подготовленный для испытаний в условиях трехосного сжатия

Последовательность выполнения экспериментальных работ в целом соответствует схеме, описанной в разделе 2.4.1. Основные отличия заключались в способе изоляции образцов от рабочей жидкости.

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

Графики деформирования образцов уррита среднезернистого массивного представлены на рисунке 4.4.

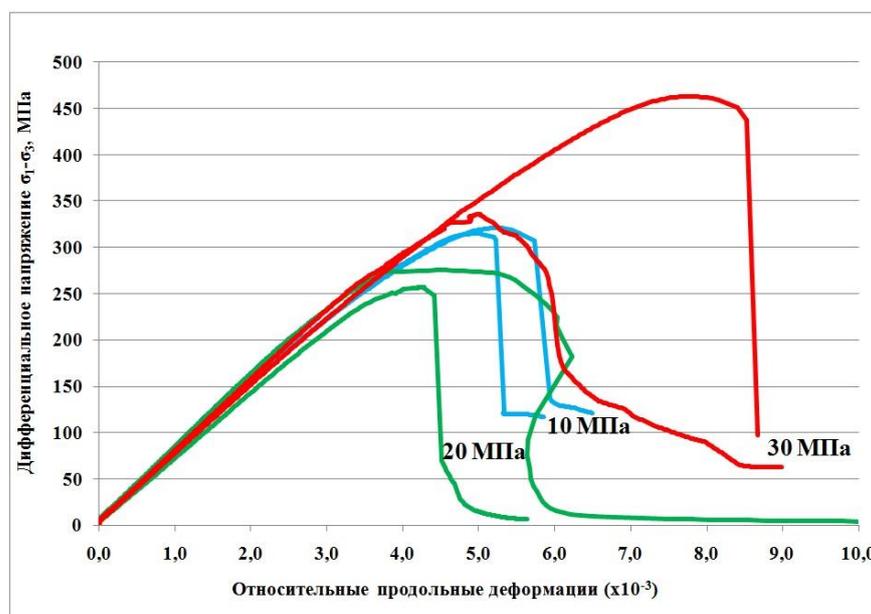


Рис. 4.4. Графики деформирования образцов уррита среднезернистого массивного в условиях трехосного сжатия (голубые линии - боковое давление 10 МПа, зеленые линии - боковое давление 20 МПа, красные линии - боковое давление 30 МПа)

Как следует из рисунка 4.4, графики деформирования образцов уррита 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 (Рис. 4.5), формирующаяся в результате слияния микротрещин в образце. В данном случае развитие и образование новых микротрещин ограничено действием сжимающего бокового давления, вследствие чего разрушение происходит по пути наименьшего сопротивления, а именно по

одной плоскости, расположенной преимущественно субпараллельно (под острым углом) по отношению к действию максимального напряжения (осевого). Отклонение этой плоскости от прямой линии в основном связано со структурными особенностями образцов, такими как наличие жестких включений и прожилков.

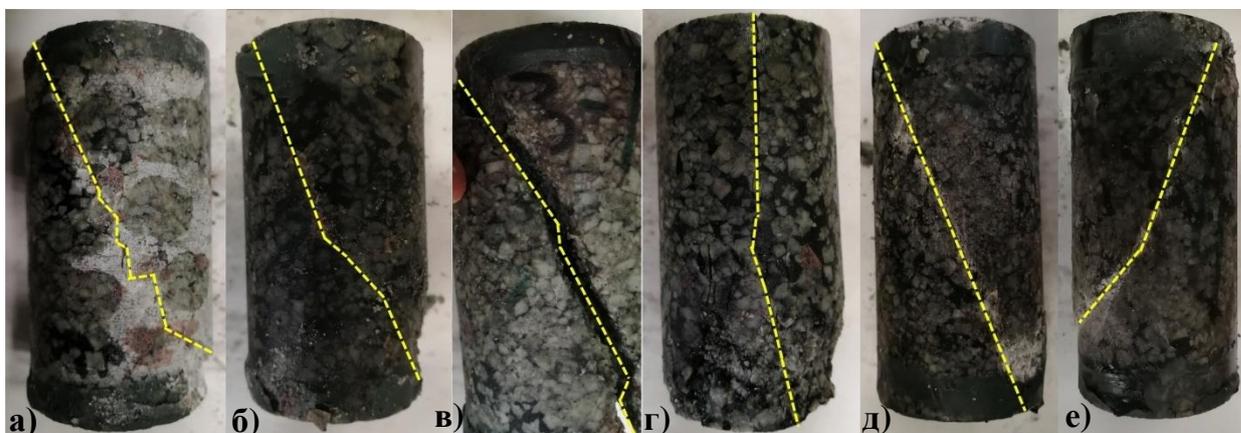


Рис. 4.5. Образцы уррита среднезернистого массивного после разрушения при трехосном сжатии: а), б) боковое давление 10 МПа; в), г) боковое давление 20 МПа; д), е) боковое давление 30 МПа

На рисунке 4.6 представлены графики деформирования образцов линзовидно-полосчатой апатит-нефелиновой руды.

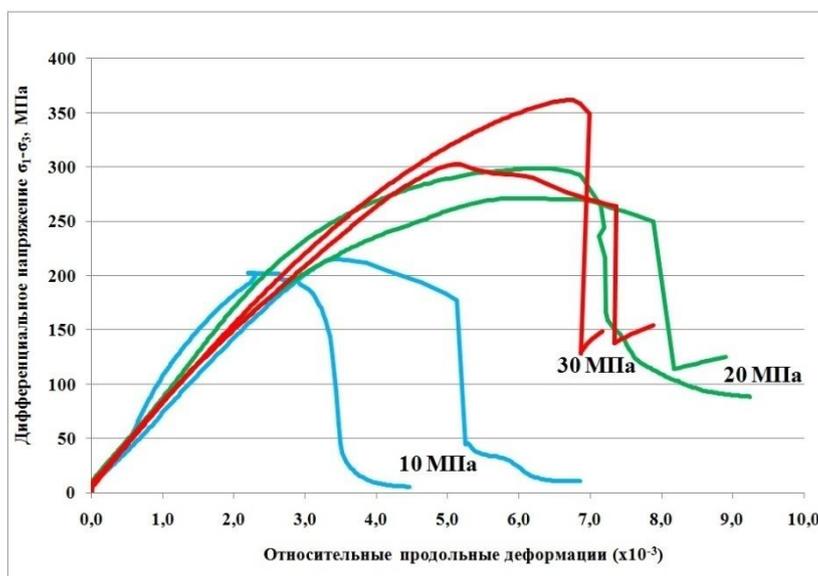


Рис. 4.6. Графики деформирования образцов линзовидно-полосчатой апатит-нефелиновой руды в условиях трехосного сжатия (голубые линии - боковое давление 10 МПа, зеленые линии - боковое давление 20 МПа, красные линии - боковое давление 30 МПа)

Из данных рисунка 4.6 следует, что графики деформирования образцов апатит-нефелиновой руды до предела прочности имеют выпуклую форму, а на пределе прочности образуется площадка с постепенным снижением величин дифференциального напряжения и последующим достаточно резким обрывом. В процессе нагружения эти образцы накапливали меньшее количество энергии по сравнению с уртитам (Табл. 4.1) и деформировались в менее упругом режиме. Однако разрушение образцов апатит-нефелиновой руды происходило также в динамическом режиме с сильным звуком и образованием преимущественно одной плоскости разрушения (Рис. 4.7).

Табл. 4.1. Значения пределов прочности и критической удельной энергии деформирования образцов скальных горных пород месторождений Хибинского и Ковдорского массивов в условиях трехосного сжатия

Порода	Боковое давление, $\sigma_{бок1,2}$ (МПа)	Предел прочности при трехосном сжатии, $\sigma_{тр}$ (МПа)	Модуль упругости, E (10^{-4} МПа)	Коэффициент Пуассона, ν	Критическая удельная энергия деформирования, $W_{*тр}$ (МДж/м ³)
Уртит среднезернистый массивный	10	325	7,50	0,12	0,6949
	10	331	7,48	0,10	0,7239
	20	277	6,96	0,09	0,5411
	20	296	7,91	0,17	0,5314
	30	366	7,62	0,09	0,8625
	30	493	7,29	0,15	1,6171
Линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда	10	212	7,44	0,12	0,2973
	10	225	6,76	0,30	0,3553
	20	319	8,01	0,14	0,6163
	20	291	7,20	0,20	0,5605
	30	392	7,42	0,13	1,0024
	30	333	7,10	0,23	0,7248
Кальцитовый карбонатит	10	112	5,11	0,09	0,1215
	10	111	5,39	0,09	0,1114
	20	142	5,12	0,11	0,1908
	20	122	6,21	0,17	0,1113
	30	145	6,14	0,13	0,1655
	30	152	5,79	0,12	0,1954

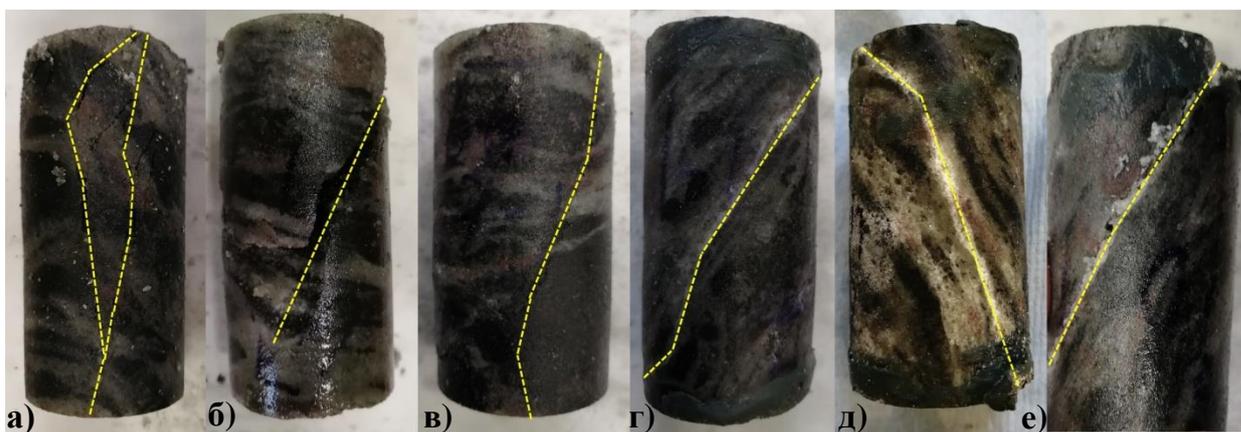


Рис. 4.7. Образцы линзовидно-полосчатой апатит-нефелиновой руды после разрушения при трехосном сжатии: а), б) боковое давление 10 МПа; в), г) боковое давление 20 МПа; д), е) боковое давление 30 МПа

На рисунке 4.8 приведены графики деформирования образцов кальцитового карбонатита.

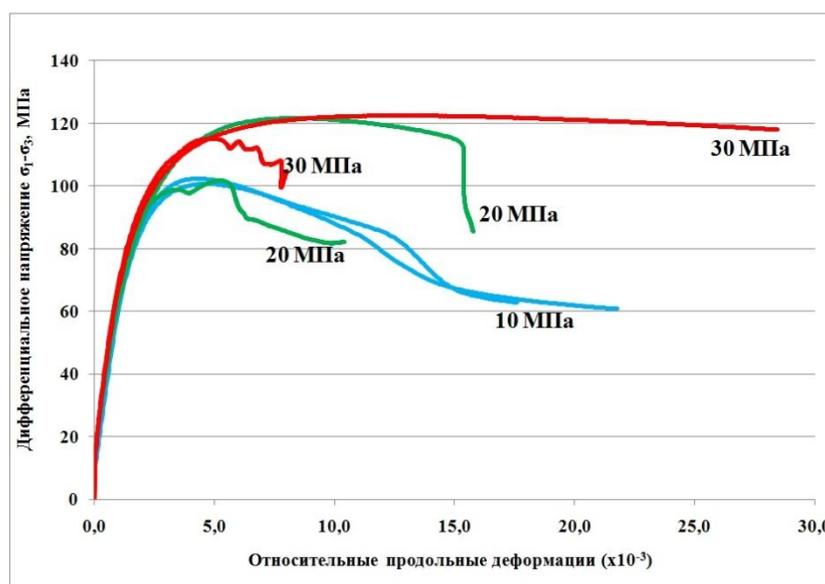


Рис. 4.8. Графики деформирования образцов кальцитового карбонатита в условиях трехосного сжатия (голубые линии - боковое давление 10 МПа, зеленые линии - боковое давление 20 МПа, красные линии - боковое давление 30 МПа)

Из данных рисунка 4.8 следует, что графики деформирования образцов карбонатита до предела прочности имеют отчетливый выпуклый вид, величины накопленной энергии много меньше по сравнению с уртитам и линзовидно-полосчатой рудой (Табл. 4.1). 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 (Рис. 4.9) и заметное увеличение их объема (дилатансия).

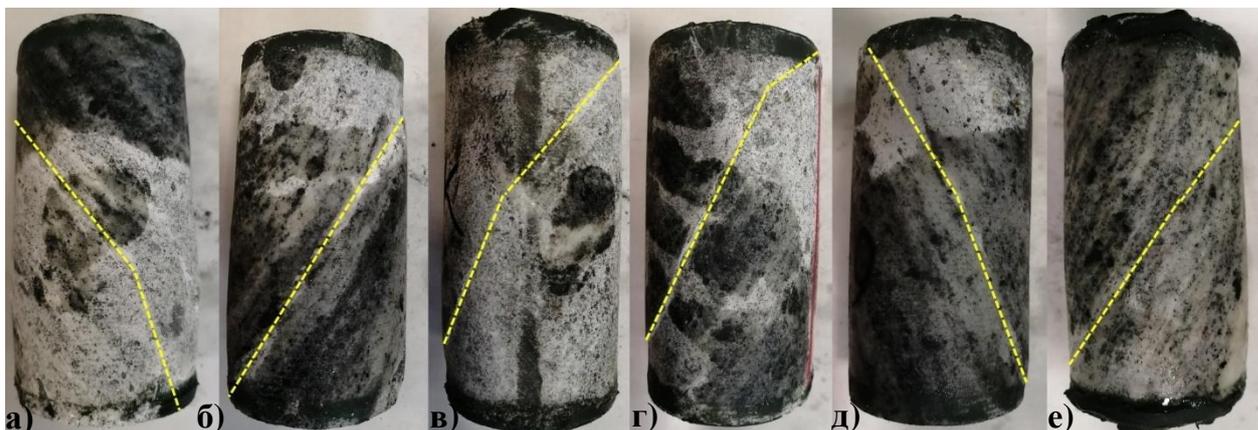


Рис. 4.9. Образцы кальцитового карбонатита после разрушения при трехосном сжатии: а), б) боковое давление 10 МПа; в), г) боковое давление 20 МПа; д), е) боковое давление 30 МПа

Оценку склонности исследуемых скальных горных пород к разрушениям в динамической форме в условиях трехосного сжатия выполняли по критерию А.Н. Ставрогина ($K_1 = E/M$) [101]. Результаты определения величин модулей упругости и спада скальных пород, а также выполненной оценки их склонности к динамическим разрушениям представлены в таблице 4.2.

Из приведенных в таблице 4.2 данных следует, что для всех образцов уррита и апатит-нефелиновой руды значения коэффициентов 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 коэффициентов удароопасности больше единицы ($K_1 > 1$). Следовательно, данная порода не является склонной к динамическим разрушениям.

В разделах 2.7 и 3.2 получены данные о деформационных свойствах уррита, апатит-нефелиновой руды и карбонатита при одноосном сжатии, а также выполнена оценка их склонности к разрушениям в динамической форме по критерию А.Н. Ставрогина [101]. При сопоставлении результатов испытаний

исследуемых пород при трехосном (Табл. 4.2) и одноосном (Табл. 3.2) 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.

Табл. 4.2. Результаты определения деформационных характеристик и склонности к динамическим разрушениям исследуемых скальных горных пород в условиях трехосного сжатия

Литотип	Номер образца	Боковое давление, $\sigma_{бок}$ (МПа)	Модуль упругости, E (МПа* 10^{-4})	Модуль спада, M (МПа* 10^{-4})	Коэффициент удароопасности, K_1	Заключение о склонности к динамическому разрушению
Уртит среднезернистый массивный	3-15	10	7,50	58,83	0,13	склонен
	4-15	10	7,48	28,86	0,26	склонен
	3-17	20	6,96	80,94	0,09	склонен
	3-18	20	7,91	13,83	0,57	склонен
	4-17	30	7,62	7,68	0,99	склонен
	4-18	30	7,29	46,01	0,16	склонен
Апатит-нефелиновая руда (л-п)	2-2-2	10	7,44	11,69	0,64	склонен
	3-1-1	10	6,76	9,13	0,74	склонен
	3-7-1	20	8,01	9,55	0,84	склонен
	4-7-1	20	7,20	9,94	0,72	склонен
	4-8-1	30	7,42	152,50	0,05	склонен
	4-10-1	30	7,10	7,30	0,97	склонен
Кальцитовый карбонатит	1к	10	5,11	0,25	20,44	не склонен
	2к	10	5,39	0,30	17,97	не склонен
	4к	20	5,12	0,54	9,48	не склонен
	5к	20	6,21	0,40	15,53	не склонен
	6к	30	6,14	0,61	10,07	не склонен
	7к	30	5,79	0,03	193,00	не склонен

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 затруднённая 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.

4.2. Анализ условий динамического разрушения скальных горных пород при трехосном сжатии

Результаты анализа литературных источников [59, 83, 101, 107, 123, 139, 149, 153, 160] и выполненных экспериментальных исследований образцов скальных горных пород указывают на то, что для оценки склонности пород к разрушениям в динамической форме необходимо изучать условия накопления и выделения энергии в образцах при нагружении.

Полученные нами данные (Табл. 2.4, 4.1) свидетельствуют о том, что при переходе от условий одноосного сжатия к трехосному величина накапливаемой энергии в образцах возрастает. При этом, чем больше будут величины компонентов тензора напряжений, тем больше будет значение накопленной энергии.

Для образцов уррита среднезернистого массивного установлено, что в условиях трехосного сжатия при величине бокового давления 30 МПа ($\sigma_2 = \sigma_3 = 30$ МПа) значение критической удельной энергии деформирования увеличилось в среднем в 6 раз по сравнению с критической энергией при одноосном сжатии (Табл. 2.2, 4.1). Для апатит-нефелиновой руды при такой же величине бокового давления критическая удельная энергия увеличилась в среднем в 5 раз по сравнению с одноосным сжатием (Табл. 2.2, 4.1). Наибольшее возрастание энергии установлено для образцов карбонатита - в 7 раз (Табл. 2.2, 4.1).

При анализе значений критической удельной энергии деформирования образцов исследуемых пород (Табл. 4.1) выявлено, что наибольшие величины этого параметра при боковом давлении 30 МПа соответствуют урритам и апатит-нефелиновой руде - в среднем 1,2398 и 0,8636 МДж/м³ соответственно. Наименьшее значение критической удельной энергии установлено для

кальцитового карбонатита - в среднем $0,1805 \text{ МДж/м}^3$. В первом случае обе породы являются склонными к динамическим разрушениям в условиях трехосного сжатия при боковом давлении до 30 МПа. Карбонатит, в противоположность этому, не является склонным к подобным разрушениям при заданных условиях.

Таким образом, величина критической удельной энергии 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. В нашем случае величина данного параметра для уртита и апатит-нефелиновой руды в среднем больше, чем для карбонатита, в 7 и 5 раз соответственно при боковом давлении 30 МПа.

Что касается вопроса выделения энергии, то в ходе проведенных экспериментальных исследований выявлено два отличающихся режима.

В первом случае для уртита и апатит-нефелиновой руды установлено, что разрушение образцов за пределом прочности происходило в ярко выраженном динамическом режиме с сильным звуком, график деформирования круто обрывался (Рис. 4.5), а накопленная упругая энергия выделялась очень быстро. На рисунках 4.10 и 4.11 представлены графики изменения величин дифференциального напряжения во времени для образцов этих пород.

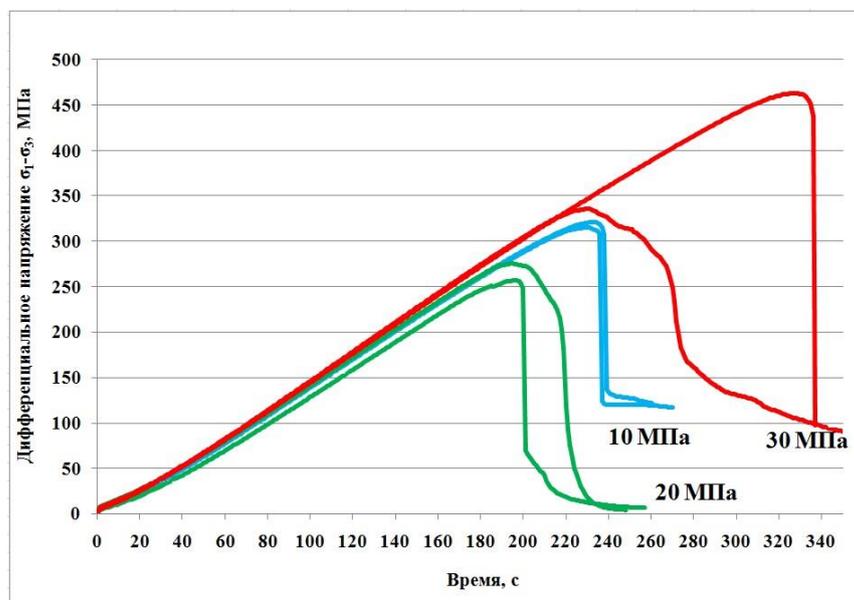


Рис. 4.10. Изменение величин дифференциального напряжения во времени для образцов уртита среднезернистого массивного в условиях трехосного сжатия (голубые линии - боковое давление 10 МПа, зеленые линии - боковое давление 20 МПа, красные линии - боковое давление 30 МПа)

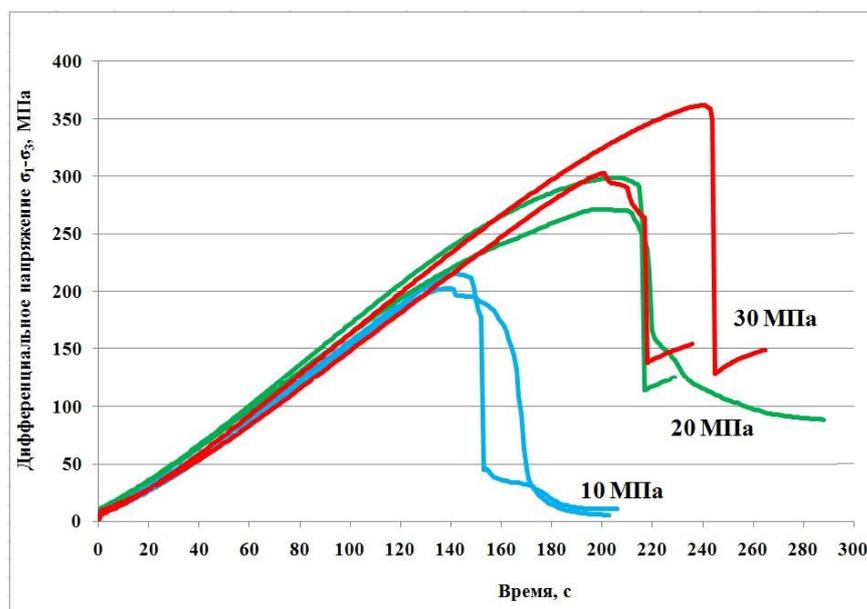


Рис. 4.11. Изменение величин дифференциального напряжения во времени для образцов линзовидно-полосчатой апатит-нефелиновой руды в условиях трехосного сжатия (голубые линии - боковое давление 10 МПа, зеленые линии - боковое давление 20 МПа, красные линии - боковое давление 30 МПа)

Как следует из рисунка 4.10, время между максимальным значением дифференциального напряжения и обрывом графика (время выделения накопленной энергии) для образцов уртита при величине бокового давления 10 МПа составляет 5 и 6 с (в среднем 6 с), при 20 МПа - 4 и 23 с (в среднем 14 с), при 30 МПа - 39 и 8 с (в среднем 24 с). Для образцов апатит-нефелиновой руды (Рис. 4.11) это время при величине бокового давления 10 МПа составляет 23 и 7 с (в среднем 15 с), при 20 МПа - 13 и 9 с (в среднем 11 с), при 30 МПа - 5 и 18 с (в среднем 12 с). Таким образом, для образцов уртита время выделения накопленной в процессе нагружения энергии увеличивалось с возрастанием величин компонентов тензора напряжений. Для апатит-нефелиновой руды подобной тенденции не было установлено. В целом, время выделения упругой энергии при разрушении образцов этих пород не превышало 40 с.

Также следует отметить, что с увеличением значений бокового давления возрастали величины остаточной прочности образцов, что отчетливо видно на примере апатит-нефелиновой руды (Рис. 4.11). В этом случае накопленная энергия не полностью расходовалась при разрушении. Часть ее оставалась в образцах за счет действия сжимающего бокового давления.

Во втором случае для карбонатита установлено, что разрушение образцов происходило без динамических проявлений, график деформирования имел плавный ниспадающий вид без обрыва (Рис. 4.8), а накопленная энергия выделялась постепенно в течении длительного времени. На рисунке 4.12 представлены графики изменения величин дифференциального напряжения во времени для образцов карбонатита.

На рисунке 4.12 видно, что время между максимальным значением дифференциального напряжения и величиной остаточной прочности для образцов карбонатита при боковом давлении 10 МПа составляет 350 и 200 с (в среднем 275 с), при 20 МПа - 220 и 300 с (в среднем 260 с), при 30 МПа - 290 и 270 с (в среднем 280 с). В этом случае наибольшее время выделения (350 с) накопленной в процессе нагружения энергии превышает максимальное время выделения для уртитов (39 с) почти на порядок.

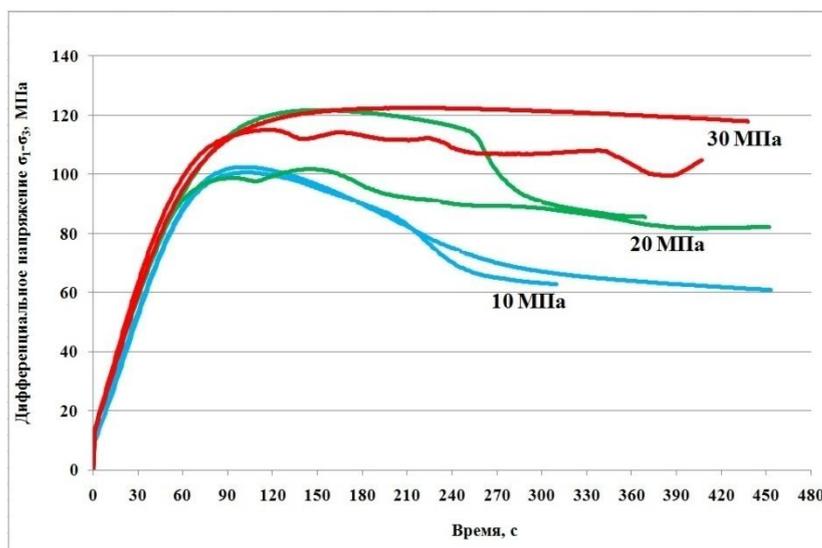


Рис. 4.12. Изменение величин дифференциального напряжения во времени для образцов кальцитового карбонатита в условиях трехосного сжатия (голубые линии - боковое давление 10 МПа, зеленые линии - боковое давление 20 МПа, красные линии - боковое давление 30 МПа)

Величины остаточной прочности образцов карбонатита, как и в случае с апатит-нефелиновой рудой, возрастали с увеличением компонентов тензора напряжений (Рис. 4.12). При этом разница между пределом прочности и остаточной прочностью при величине бокового давления 30 МПа составляла порядка 5 - 10 МПа (3 - 9%), тогда как для уртыта и 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.

Исследования образцов скальных горных пород при трехосном сжатии с целью анализа условий накопления и выделения упругой энергии, а также оценки их склонности к динамическим разрушениям, были проведены совместно с сотрудниками лаборатории "Физико-механических свойств и разрушения горных пород" Санкт-Петербургского Горного университета. В качестве изучаемого материала были выбраны пироксениты Ковдорского месторождения. Полученные в результате испытаний образцов графики деформирования представлены на рисунке 4.13.

На рисунке 4.13 видно, что графики деформирования образцов пироксенита 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. Иная ситуация наблюдается при боковом давлении 30 МПа. В этом случае графики деформирования за пределом прочности начинают выполаживаться, а образцы разрушаются без динамических проявлений (без сильного звука).

На основании определенных прочностных и деформационных параметров образцов пироксенита выполнена оценка их склонности к динамическим разрушениям по критерию А.Н. Ставрогина [101], а также рассчитаны значения критической удельной энергии деформирования, результаты которых приведены в таблице 4.3.

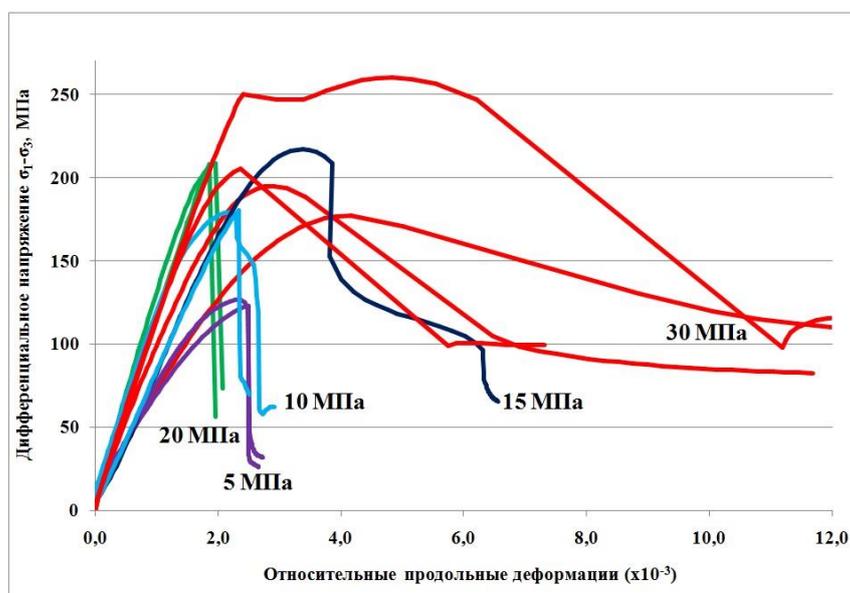


Рис. 4.13. Графики деформирования образцов пироксенита в условиях трехосного сжатия (фиолетовые линии - боковое давление 5 МПа, голубые линии - боковое давление 10 МПа, черная линия - боковое давление 15 МПа, зеленые линии - боковое давление 20 МПа, красные линии - боковое давление 30 МПа)

Табл. 4.3. Результаты определения деформационных характеристик и склонности к динамическим разрушениям образцов пироксенита в условиях трехосного сжатия

№ п/п	Боковое давление, $\sigma_{бок}$ (МПа)	Критическая удельная энергия деформирования, $W_{*тр}$ (МДж/м ³)	Модуль упругости, E (МПа*10 ⁻⁴)	Модуль спада, M (МПа*10 ⁻⁴)	Коэффициент удароопасности, K_1	Заключение о склонности к динамическому разрушению
1	5	0,1776	4,41	133,31	0,03	склонен
2	5	0,1641	5,08	49,96	0,10	склонен
3	10	0,2261	7,53	25,80	0,29	склонен
4	10	0,2290	7,56	357,63	0,02	склонен
5	15	0,4016	6,28	10,20	0,62	склонен
6	20	0,2234	10,72	151,69	0,07	склонен
7	20	0,2311	10,42	113,60	0,09	склонен
8	30	0,2950	8,51	3,14	2,71	не склонен
9	30	0,3454	6,45	2,40	2,68	не склонен
10	30	0,4479	4,12	0,41	10,04	не склонен
11	30	0,6159	5,99	2,55	2,35	не склонен

Согласно приведенным в таблице 4.3 данным, склонными к разрушениям в динамической форме являются образцы, нагрузка которых происходила в

условиях трехосного сжатия при величинах бокового давления от 5 до 20 МПа. Интересным является тот факт, что при $\sigma_{бок} = 30$ МПа образцы пироксенита уже не являются склонными к таким видам разрушения. Также установленные для пироксенита величины критической удельной энергии деформирования в среднем в 3 раза меньше, чем значения этого параметра для уррита при боковом давлении 30 МПа, а величина отношения между пределом прочности и остаточной прочностью (накопленной и остаточной энергиями) уменьшается с возрастанием значений компонентов тензора напряжений.

На основе полученных результатов выдвинуто предположение, что с уменьшением контрастности между компонентами тензора напряжений также будет уменьшаться склонность скальных горных пород к разрушениям в динамической форме. Для подтверждения этого предположения выполнены испытания образцов уррита среднезернистого массивного при величинах бокового давления от 50 до 80 МПа. Графики деформирования образцов представлены на рисунке 4.14.

На рисунке 4.14 видно, что при величинах бокового давления до 50 МПа включительно графики деформирования образцов обрываются круто, что является типичным для склонных к динамическим разрушениям пород. При величинах бокового давления свыше 50 МПа на графиках в окрестности пределов прочности (максимальных напряжений) появляются площадки, параллельные горизонтальной оси, а разрушение образцов происходит с некоторой отсрочкой (порядка 30 - 50 с момента выхода на площадку деформирования). Таким образом, при высоких значениях горизонтальных составляющих тензора напряжений ($\sigma_2 = \sigma_3 = 80$ МПа) для образцов уррита наблюдается небольшой участок выполаживания графика деформирования на пределе прочности, после чего происходит его обрыв и разрушение образцов в динамическом режиме. Следовательно, создаваемых величин бокового давления не хватает, чтобы привести к выполаживанию графика деформирования уррита за пределом прочности и, соответственно, уменьшить его склонность к разрушениям в динамической форме. Однако это может быть возможно, если значение создаваемого давления в трехосной камере будет свыше 80 МПа. Поскольку экспериментально проверить такое предположение сложно ввиду ограниченных технических возможностей используемого оборудования,

проанализированы существующие литературные источники, содержащие в себе информацию об испытаниях образцов в условиях трехосного сжатия.

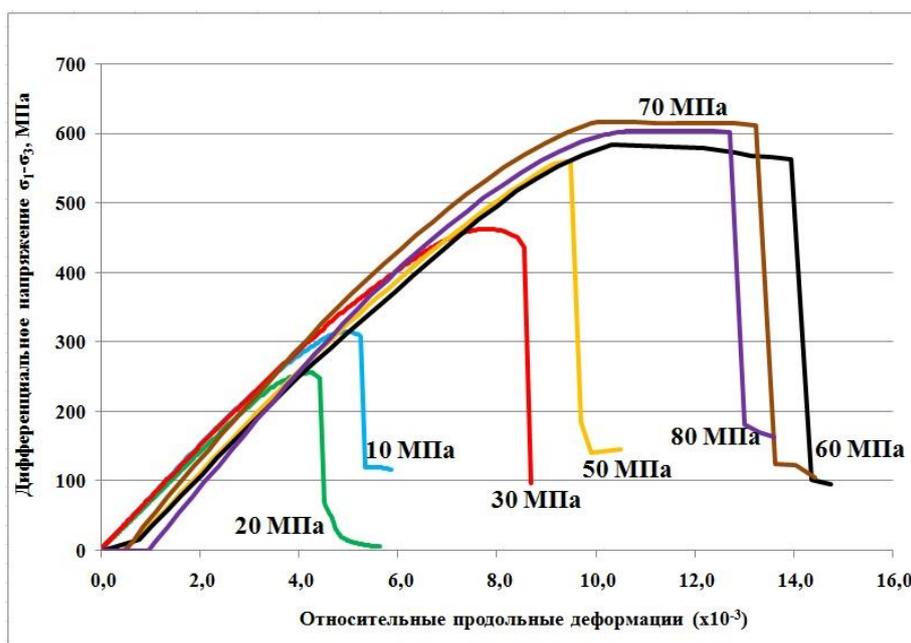


Рис. 4.14. Графики деформирования уррита среднезернистого массивного в условиях трехосного сжатия; данные, полученные в Санкт-Петербургском Горном университете: голубая линия - боковое давление 10 МПа, зеленая линия - боковое давление 20 МПа, красная линия - боковое давление 30 МПа; данные, полученные в Горном институте КНЦ РАН: оранжевая линия - боковое давление 50 МПа, черная линия - боковое давление 60 МПа, коричневая линия - боковое давление 70 МПа, фиолетовая линия - боковое давление 80 МПа

В работах Б.Г. Тарасова [157, 158] приведены результаты испытаний образцов песчаника в условиях трехосного сжатия при величинах бокового давления от 0 до 150 МПа. Графики деформирования образцов представлены на рисунке 4.15.

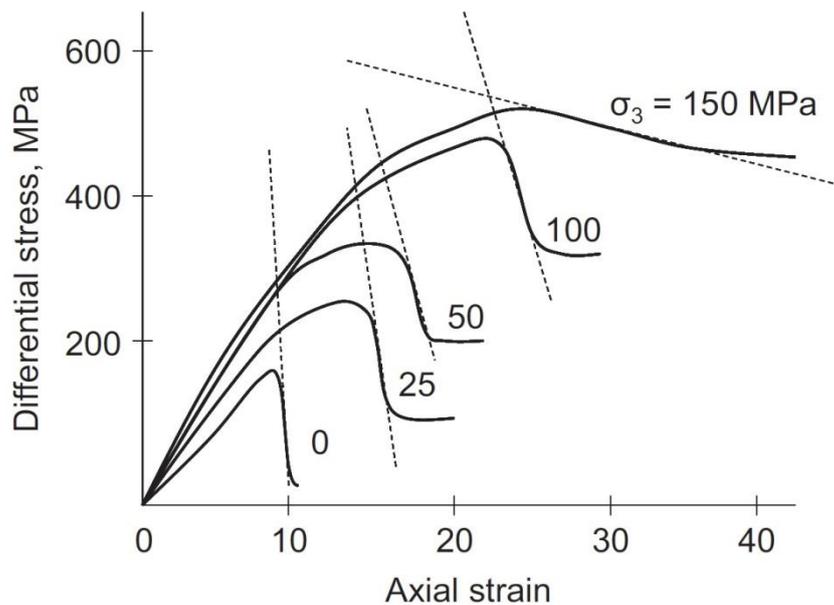


Рис. 4.15. Графики деформирования образцов песчаника в условиях трехосного сжатия (по [158])

На рисунке 4.15 видно, что график деформирования образцов песчаника при одноосном сжатии ($\sigma_3 = 0$ МПа) обрывается круто, что характерно для склонных к динамическим разрушениям пород. Затем, с увеличением бокового давления от 25 до 150 МПа, наблюдается постепенное выполаживание графика деформирования за пределом прочности. При величине бокового давления 150 МПа график деформирования образцов песчаника становится похож на графики деформирования карбонатита (Рис. 4.8). Следовательно, при таком соотношении значений компонентов тензора напряжений песчаник перестаёт быть склонным к динамическим разрушениям.

Подобные результаты также были получены в работах [125, 152, 159], где в условиях трехосного сжатия испытывали образцы скарна (Рис. 4.16), красного песчаника (Рис. 4.17) и известняка (Рис. 4.18).

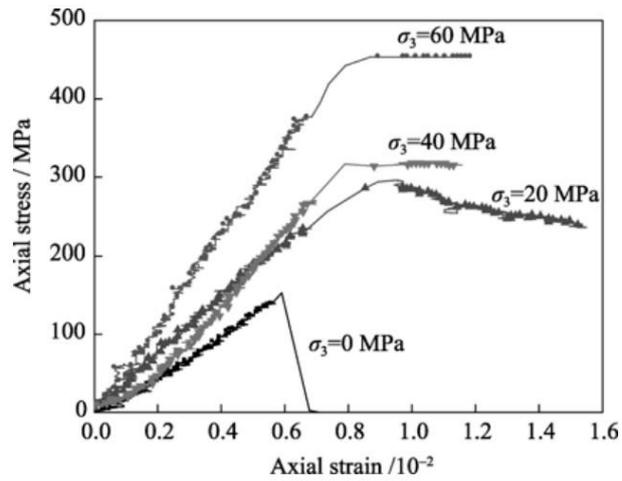


Рис. 4.16. Графики деформирования образцов скарна в условиях трехосного сжатия (по [159])

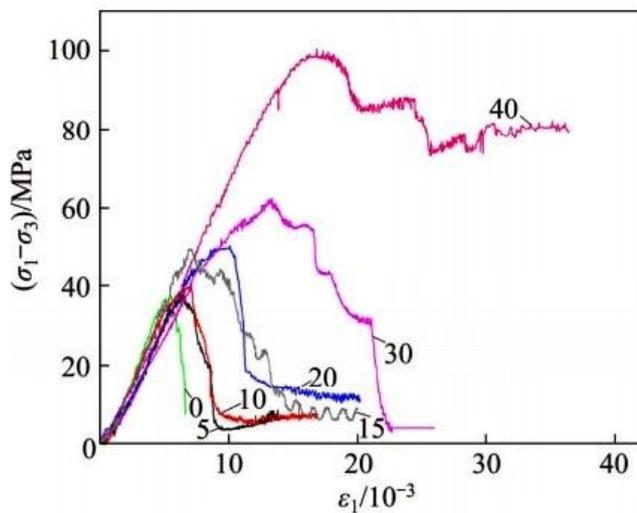


Рис. 4.17. Графики деформирования образцов красного песчаника в условиях трехосного сжатия (по [152])

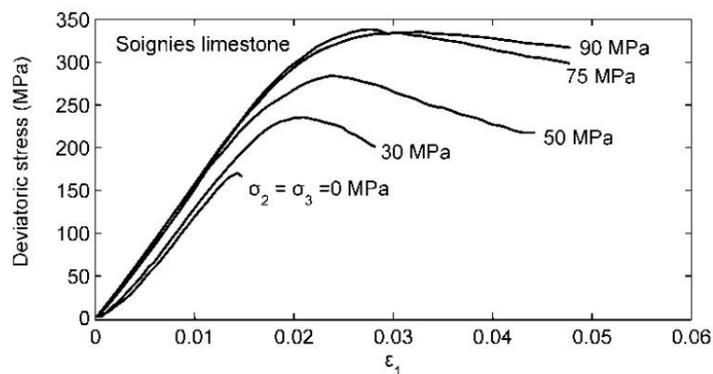


Рис. 4.18. Графики деформирования образцов известняка в условиях трехосного сжатия (по [125])

На рисунке 4.16 видно, что график деформирования образцов скарна при отсутствии бокового давления обрывается круто, а при увеличении бокового давления от 20 до 60 МПа происходит выполаживание графиков. Следовательно, данная порода в условиях трехосного сжатия перестает быть склонной к динамическим разрушениям. Для образцов красного песчаника (Рис. 4.17) и известняка (Рис. 4.17) выполаживание предельных графиков деформирования происходит при величинах бокового давления 40 МПа и 90 МПа соответственно, что также свидетельствует об уменьшении их склонности к разрушениям в динамической форме.

Таким образом, на основании полученных результатов испытаний образцов пироксенита в условиях трехосного сжатия, а также анализа литературных источников [125, 152, 158, 159], выявлено, что с выравниванием величин компонентов тензора напряжений уменьшается склонность скальных горных пород к динамическим разрушениям. При этом породы с невысокими значениями предела прочности в условиях одноосного сжатия (порядка 50 - 100 МПа) становятся несклонными к таким видам разрушения при величинах бокового давления порядка 30 - 40 МПа. Для скальных пород с пределами прочности более 100 МПа переход в подобное состояние возможен при величинах бокового давления порядка 100 МПа и выше.

4.3. Общий алгоритм оценки склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям

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 ($W_{\text{п}}$) и идеально упругой ($W_{\text{и.у.}}$) энергий деформирования по следующим формулам:

$$W_{\text{п}} = \int_0^D \sigma(\varepsilon) d\varepsilon,$$

$$W_{\text{и.у.}} = S_{\text{OBCD}} = \frac{OD \cdot DC}{2}$$

где $\sigma(\varepsilon)$ - функция "напряжение-деформация"; S_{OBCD} - площадь треугольника OBCD в координатах σ - ε (Рис. 3.3);

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. Для этого необходимо:

1) выполнить испытания образцов скальных горных пород при трехосном сжатии с увеличением значений бокового давления (рекомендуемый шаг

изменения бокового давления - 10 МПа, скорость нагружения - 1,5 – 2,5 МПа/с), учитывая существующие отечественные и зарубежные стандарты;

2) в ходе испытаний при трехосном сжатии регистрировать величины прикладываемой нагрузки, время испытания, а также продольных деформаций с использованием тензодатчиков или экстензометров; при невозможности измерять значения продольных деформаций следует регистрировать величину прикладываемой к образцу нагрузки и время испытаний;

3) на основании экспериментальных данных построить полные графики зависимости «дифференциальное напряжение - деформация», а также графики зависимости «дифференциальное напряжение - время»;

4) проанализировать графики деформирования образцов за пределом прочности и выполнить оценку склонности пород к динамическим разрушениям по критерию А.Н. Ставрогина [101]:

- если график деформирования образцов за пределом прочности обрывается круто, а коэффициент удароопасности $K_1 \leq 1$, то горная порода является склонной к динамическим разрушениям;

- если график деформирования образцов за пределом прочности имеет плавный ниспадающий вид или полностью выполаживается (становится параллельным горизонтальной оси), а коэффициент удароопасности $K_1 > 1$, то горная порода не является склонной к динамическим разрушениям;

5) проанализировать графики зависимости «дифференциальное напряжение - время» и установить, за какое время произошло выделение накопленной в процессе нагружения энергии, а также величину остаточной прочности:

- если время выделения накопленной энергии (время между максимальным значением дифференциального напряжения и обрывом графика/остаточной прочностью) не превышает 40 с, а величина остаточной прочности образцов в два-три раза меньше их предела прочности, то горная порода является склонной к динамическим разрушениям;

- если время выделения накопленной энергии превышает 40 с, а величина остаточной прочности образцов отличается от их предела прочности не более чем на 10 - 20%, то горная порода не является склонной к динамическим разрушениям.

б) при выполнении оценки склонности скальных горных пород к динамически разрушениям в условиях трехосного сжатия необходимо иметь ввиду, что пункт 4 является приоритетным, тогда как пункт 5 является вспомогательным способом проведения оценки и требует дополнительного экспериментального подтверждения.

Выводы по главе 4.

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 уррита среднезернистого массивного сохраняется при величинах бокового давления от 0 до 30 МПа, а кальцитовый карбонатит в этих условиях не проявляет склонности к таким разрушениям.

В ходе анализа условий разрушения скальных горных пород в динамической форме выявлено, что основными влияющими факторами являются величина накопленной упругой энергии и скорость ее выделения при разрушении образцов:

1. 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 уррита и апатит-нефелиновой руды в среднем больше, чем для карбонатита, в 7 и 5 раз соответственно при боковом давлении 30 МПа;

2. 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.

Результаты лабораторных исследований позволили установить, 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.

На основании экспериментальных работ предложен общий алгоритм выполнения оценки склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям в условиях одноосного и трехосного сжатия.

В результате сформулировано третье научное положение:

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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная задача, связанная с исследованием энергоемкости 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 энергоемкости 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. 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.

3. 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.

4. 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 уррита среднезернистого массивного сохраняется при величинах бокового давления от 0 до 30 МПа, а кальцитовый карбонатит в этих условиях не проявляет склонности к таким разрушениям.

5. 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 уррита 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.

6. Результаты лабораторных исследований показали, 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.

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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авершин, С. Г. Горные удары / С. Г. Авершин. – М.: Углетехиздат, 1955. – 236 с.
2. Авсюк, Ю. Н. Колебательный режим эволюции системы Земля-Луна и его сопоставление с геологическими процессами фанерозоя / Ю. Н. Авсюк // Доклады АН СССР. – 1986. – Т. 287. – № 5. – С. 1097–1101.
3. Авсюк, Ю. Н. Земные приливы / Ю. Н. Авсюк // Актуальные проблемы геодинамики. – М.: Наука, 1991. – С. 52–70.
4. Авсюк, Ю. Н. Перемещения оси вращения в теле Земли и их модальное объяснение / Ю. Н. Авсюк // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород, теория и практика эксперимента: тез. докл. – М., 1999. – С. 4.
5. Адушкин, В. В. Исследование режимов движения по разлому / В. В. Адушкин, Г. Г. Кочарян, В. А. Новиков // Физика земли. – 2016. – № 5. – С. 13–24.
6. Айзерман, М. А. Классическая механика / М. А. Айзерман. – М.: Наука, 1980. – 368 с.
7. Аксенов, А. А. Моделирование напряженно-деформированного состояния целиков при отработке пологих рудных тел / А. А. Аксенов, А. М. Вандышев, О. В. Зотеев, Ю. Г. Феклистов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2003. – № 6. – С. 186–188.
8. Амусин, Б. З. Применение метода переменных модулей в задачах линейно-наследственной ползучести / Б. З. Амусин, А. М. Линьков // Горное давление и горные удары, тр. ВНИМИ, вып. 88. – Л.: Наука, 1973. – С. 180–184.
9. Аристотель. Физика / Пер. с древнегреч. В. П. Карпова // Аристотель. Сочинения в четырех томах. Том. 3. – М.: Мысль, 1981. – 601 с.
10. Арсланов, В. В. Толковый англо-русский словарь по нанотехнологии / В. В. Арсланов. – М.: ИФХЭ РАН, 2009. – 261 с.
11. Багдасарьян, А. Г. О подобии механизма формирования структуры разрушения горного массива / А. Г. Багдасарьян, В. Н. Сытенков, Л. Т. Федянина, П. А. Шеметов // Физика Земли. – 2011. – № 4. – С. 87–95.

12. Баклашов, И. В. Геомеханика: Учебник для вузов. / И. В. Баклашов // Т.1. Основы геомеханики. – М.: Издательство МГГУ, 2004. – 208 с.
13. Балек, А. Е. Учет мозаичности напряженно-деформированного состояния массивов скальных горных пород при решении практических задач недропользования / А. Е. Балек // Проблемы недропользования. – 2018. – № 3. – С. 140–150.
14. Барон, Л. И. Коэффициенты крепости горных пород / Л. И. Барон. – М.: «Наука», 1972. – 176 с.
15. Барях, А. А. Расчет напряженного-состояния массива горных пород в зонах локальных неоднородностей строения / А. А. Барях, Н. А. Самоделкина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2004. – № 5. – С. 50–59.
16. Белов, Н. И. Исследование динамической природы горных ударов и обоснование критериев прогноза удароопасности: специальность 25.00.20 "Геомеханика, разрушение пород взрывом, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Белов Николай Иванович; Горный институт РАН Ордена Ленина Научный центр им. С. М. Кирова. – Апатиты, 1992. – 147 с.
17. Берон, А. И. Свойства горных пород при разных видах и режимах нагружения / А. И. Берон, Е. С. Ватолин, М. И. Койфман. – М.: Недра, 1984. – 276 с.
18. Вержанский, П. М. Исследование энергоемкости вибрационного воздействия рабочего органа при разрушении забоя резанием / П. М. Вержанский, М. И. Маслов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 5. – С. 195–201.
19. Глушко, В. Т. Разрушение горных пород и прогнозирование проявлений горного давления / В. Т. Глушко, В. В. Виноградов. – М.: Недра, 1982. – 192 с.
20. ГОСТ 21153.0-75. Породы горные. Отбор проб и общие требования к методам физических испытаний = Rocks. Sampling and general requirements for the methods of physical testing: государственный стандарт Союза ССР: издание официальное: утвержден и введен в действие постановлением Государственного

комитета стандартов Совета Министров СССР от 25 сентября 1975 г. № 2491: введен впервые: дата введения 1976-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 3 с.

21. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии = Rocks. Methods for determination of axial compression strength: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по Управлению качеством продукции и стандартам от 19.06.84 № 1973: введен впервые: дата введения 1986-07-01 / разработан Министерством угольной промышленности СССР. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 8 с.

22. ГОСТ 21153.3-85. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении = Rocks. Methods for determination uniaxial tensile strength: государственный стандарт Союза ССР: издание официальное: утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 27 ноября 1985 г. № 3731: введен впервые: дата введения 1987-01-01 / разработан Министерством угольной промышленности СССР, Академией наук СССР, Министерством геологии СССР, Академией наук УССР, Академией наук Киргиз. ССР, Министерством высшего и среднего специального образования СССР. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 18 с.

23. ГОСТ 21153.5-88. Породы горные. Метод определения предела прочности при срезе со сжатием = Rocks. Method for the determination of cut strength limit: государственный стандарт Союза ССР: издание официальное: утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 15.03.88 № 54: введен впервые: дата введения 1989-07-01 / разработан Министерством угольной промышленности СССР, Академией наук СССР, Министерством геологии СССР, Академией наук УССР, Академией наук Кирг. ССР, Министерством высшего и среднего специального образования СССР. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 8 с.

24. ГОСТ 21153.8-88. Породы горные. Методы определения предела прочности при объемном сжатии = Rocks. Methods for determination of triaxial compressive strength: государственный стандарт Союза ССР: издание официальное: утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 15.03.88 № 546: введен впервые: дата введения 1989-07-01 /

разработан Министерством угольной промышленности СССР, Академией наук СССР, Министерством геологии СССР, Академией наук УССР, Академией наук Кирг. ССР, Министерством высшего и среднего специального образования СССР. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 17 с.

25. ГОСТ 28985-91. Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии = Rocks. Methods for determination of deformation characteristics under uniaxial compression: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 24.04.91 № 563: введен впервые: дата введения 1992-07-01 / разработан Министерством угольной промышленности СССР, Академией наук СССР, Министерством геологии СССР, Академией наук УССР, Министерством по производству минеральных удобрений, Государственным комитетом СССР по народному образованию. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 11 с.

26. Дверий, В. П. Бурение скважин лопастными долотами / В. П. Дверий. - М.: Недра, 1977. – 188 с.

27. Добрецов, Н. Л. Глубинная геодинамика / Н. Л. Добрецов, А. Г. Кирдяшкин. – Новосибирск, 1994. – 299 с.

28. Додис, Я. М. Разрушение горных пород при бурении и взрывании / Я. М. Додис, В. И. Нифадьев. – Бишкек: КРСУ, 2006. – 374 с.

29. Захаров, В. Н. Паспорт прочности для неоднородных горных пород в объемном напряженном состоянии / В. Н. Захаров, И. Ф. Жариков, Б. К. Норель // Маркшейдерский вестник. – 2013. – №5. – С. 28–31.

30. Захаров, Е. В. Влияние знакопеременных температурных воздействий на энергоемкость процесса дробления горных пород: специальность 25.00.20 "Геомеханика, разрушение пород взрывом, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика": автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук / Евгений Васильевич Захаров; ИГДС СО РАН. - Якутск: ООО "Цумори пресс", 2012. – 19 с.

31. Зеленин, А. Н. Основы разрушения грунтов механическими способами / А. Н. Зеленин. – М.: Машиностроение, 1968. – 376 с.

32. Земцовский, А. В. Исследование физических свойств и характера разрушения горных пород Ждановского месторождения (АО «Кольская ГМК») в условиях одноосного и трехосного сжатия / А. В. Земцовский, Н. Н. Кузнецов, А. К. Пак // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* – 2019. – Т. 6. – № 1. – С. 117–122.
33. Зерцалов, М. Г. Механика скальных грунтов и скальных массивов / М. Г. Зерцалов. – М.: ИД "Юриспруденция", 2003. – 184 с.
34. Ильницкая, Е. И. Свойства горных пород и методы их определения / Е. И. Ильницкая, Р. И. Тедер, Е. С. Ватолин, М. Ф. Кунтыш. – М.: Недра, 1969. – 392 с.
35. Каспарьян, Э. В. Геомеханика: учебное пособие / Э. В. Каспарьян, А. А. Козырев, М. А. Иофис, А. Б. Макаров. – М.: Изд-во Высшая школа., 2006. – 503 с.
36. Каспарьян, Э. В. Геомеханика. В 2 частях. Часть 1 / Э. В. Каспарьян, А. А. Козырев, М. А. Иофис, А. Б. Макаров, Е. Ю. Куликова. – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2016. – 272 с.
37. 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.
38. Коган, И. Ш. Процесс обмена энергией между физической системой и средой / И. Ш. Коган. – 2006. – URL: <http://physicalsystems.org/index03.1.07.1.html> (дата обращения: 16.09.2019). – Текст: электронный.
39. Коган, И. Ш. Формы энергии и виды энергии и энергообмена / И. Ш. Коган. – 2008. – URL: <http://physicalsystems.org/index03.1.09.html> (дата обращения: 16.09.2019). – Текст: электронный.
40. Козырев, А. А. Геомеханическое обеспечение горных работ при отработке удароопасных месторождений в тектонически напряженных массивах / А. А. Козырев // *Геомеханика при ведении горных работ в высоконапряженных массивах: сб. науч. тр.* – Апатиты, 1998. – С. 11–25.
41. Козырев, А. А. Региональная разгрузка горизонта для предотвращения горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений / А. А. Козырев, Ю. В. Демидов, А. Н. Енютин, В. А. Мальцев, И. Э. Семенова, В. С. Свинин //

Техногенная сейсмичность при горных работах: модели очагов, прогноз, профилактика. Часть 2. – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2004. – С. 149–155.

42. 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.

43. 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.

44. Козырев, А. А. Прогноз горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений на Хибинских апатитовых рудниках / А. А. Козырев, В. И. Панин, В. А. Мальцев, М. В. Аккуратов // Геомеханика при ведении горных работ в высоконапряженных массивах. – Апатиты, 1998. – С. 73–82.

45. Козырев, А. А. Геомеханические исследования и обоснования при ведении горных работ на Кольском полуострове / А. А. Козырев, В. И. Панин, С. Н. Савченко // Формирование основ современной стратегии природопользования в Евро-Арктическом регионе: сб. науч. тр. – Апатиты: КНЦ РАН, 2005. – С. 122–131.

46. Козырев, А. А. Геомеханическое обеспечение технических решений при ведении горных работ в высоконапряженных массивах / А. А. Козырев, В. И. Панин, И. Э. Семенова, Ю. В. Федотова, В. В. Рыбин // ФТПРПИ. – 2012. – №2. – С. 46–55.

47. Козырев, А. А. Разработка методических принципов диагностики тектонических напряжений в верхней части земной коры с целью управления динамическими проявлениями горного давления / А. А. Козырев, С. Н. Савченко, В. А. Мальцев. – Апатиты, 1994. – 66 с.

48. Козырев, А. А. Вероятностный прогноз сейсмоопасных зон в условиях удароопасных месторождений Хибинского массива / А. А. Козырев, Ю. В. Федотова, О. Г. Журавлева // Вестник МГТУ. – 2014. – Т. 17. – № 2. – С. 225–230.

49. Кокс, А. Тектоника плит / А. Кокс, Р. Харт; [перевод с английского А. А. Калачникова, В. Л. Панькова]. – М.: Мир, 1989. – 427 с.
50. Кононов, В. М. Влияние формы зарядной полости на энергоемкость разрушения горных пород / В. М. Кононов // Горный журнал. – 2015. – №4. – С. 66–69.
51. Корнилков, С. В. Институт горного дела УРО РАН и его вклад в развитие минерально-сырьевого комплекса России / С. В. Корнилков, В. Л. Яковлев, А. В. Глебов, А. А. Панжин // Горная промышленность. – 2018. – № 5. – С. 36–38.
52. Кузнецов, Г. Н. Механические свойства горных пород / Г. Н. Кузнецов. – М.: Углетехиздат, 1947. – 180 с.
53. 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.
54. 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. – № 56. – С. 286–292.
55. Куксенко, В. С. Физические и методические основы прогнозирования горных ударов / В. С. Куксенко, И. Е. Инжеваткин, Б. Ц. Манжиков, С. А. Станциц, Н. Г. Томилин, Д. И. Фролов // ФТПРПИ. – 1987. – № 1. – С. 9–22.
56. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц // Издание 5-е, стереотипное. – М.: Физматлит, 2004. – 224 с.
57. Лань, Т. Исследование энергии системы горных ударов при подземной глубокой разработке на угольной шахте / Т. Лань, Х. Чжан, И. М. Батугина, Л. Юй, Ш. Ли, Ц. Хан, В. Сун, Г. Тан // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 6. – С. 287–292.
58. Лаптев, Б. В. О геодинамической ситуации на горных предприятиях России / Б. В. Лаптев, А. Н. Минькин, А. И. Перепелицын // Техногенная сейсмичность при горных работах: модели очагов, прогноз, профилактика. Часть 1. – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2004. – С. 113–122.

59. Лодус, Е. В. Энергообмен при деформировании и разрушении горных пород: специальность 05.15.11 "Физические процессы горного производства": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Лодус Евгений Васильевич; ВНИМИ. – СПб., 1994. – 499 с.
60. 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.
61. Ломтадзе, В. Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород / В. Д. Ломтадзе. – Л.: Недра, 1972. – 312 с.
62. Ломтадзе, В. Д. Физико-механические свойства горных пород / В. Д. Ломтадзе. – Л.: Недра, 1990. – 328 с.
63. Мазуров, Б. Т. Геодинамика и геодезические методы ее изучения / Б. Т. Мазуров, И. Е. Дорогова. – Новосибирск: СГГА, 2014. – 175 с.
64. Мангуш, С. К. Методика оперативной оценки удельной энергоемкости взрывного дробления горных пород / С. К. Мангуш, В. А. Кузнецов, Б. В. Эквист, К. И. Должиков // Уголь. – 2001. – №3. – С. 56–64.
65. Мансуров, В. А. Хрупкое разрушение горных пород / В. А. Мансуров. – Фрунзе: ИЛИМ, 1984. – 125 с.
66. Марков, Г. А. Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива / Г. А. Марков. – Л.: Наука, 1977. – 213 с.
67. Мельников, Н. Н. Геодинамический полигон при крупномасштабных горных работах для прогноза и профилактики техногенных землетрясений и горно-тектонических ударов / Н. Н. Мельников, А. А. Козырев, В. И. Панин // Горный вестник. – 1995. – №4. – С. 6–11.
68. Металлы и сплавы / Справочник под ред. Ю. П. Солнцева. – СПб.: НПО "Профессионал", НПО "Мир и Семья", 2003. – 1066 с.
69. Методические рекомендации по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23 мая 2013 года № 216. – ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2016. – 52 с.

70. Мосинец, В. Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах / В. Н. Мосинец. – М.: Недра, 1976. – 271 с.
71. Музгин, С. С. К теории разрушения мерзлых грунтов / С. С. Музгин // Труды института горного дела. – АН КазССР, 1957. – С. 7–14.
72. Мусхелишвили, Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н. И. Мусхелишвили. – М.: Наука, 1966. – 707 с.
73. Мухитдинов, Ш. Р. Определение удароопасности горных пород месторождения Кочбулак / Ш. Р. Мухитдинов, В. Р. Рахимов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – №2. – С. 114–118.
74. Нескромных, В. В. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ: учебное пособие / В. В. Нескромных. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2015. – 396 с.
75. Онохин, Ф. М. Особенности структур Хибинского массива / Ф. М. Онохин. – Л.: Наука, 1975. – 105 с.
76. Панжин, А. А. Определение напряженно-деформированного состояния массива в районе Киембаевского карьера / А. А. Панжин, А. Д. Сашурин, Н. А. Панжина // Маркшейдерия и недропользование. – 2019. – № 1. – С. 37–40.
77. Пестриков, В. М. Механика разрушения твердых тел: курс лекций / В. М. Пестриков, Е. М. Морозов. – СПб.: Профессия, 2002. – 320 с.
78. Петухов, И. М. Поведение горных пород и угля на шахтах Кизеловского бассейна, опасных по горным ударам: специальность 05.00.00 «Техника»: автореферат диссертации, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук / Петухов Игнатий Макарович; Ленинградский ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени Горный институт. – Л.: ЛГИ, 1954. – 23 с.
79. Петухов, И. М. Горные удары на шахтах Кизеловского бассейна / И. М. Петухов. – Пермь: Пермское книжное издательство, 1957. – 143 с.
80. Петухов, И. М. Горные удары на угольных шахтах / И. М. Петухов. – М.: Недра, 1972. – 221 с.
81. Петухов, И. М. Геодинамика недр / И. М. Петухов, И. М. Батугина. – М.: Недра коммюникейшн ЛТД, 1999. – 256 с.

82. Петухов, И. М. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках / И. М. Петухов, А. М. Ильин, К. Н. Трубецкой. – М.: Изд-во Академии горных наук, 1997. – 384 с.
83. Петухов, И. М. Механика горных ударов и выбросов / И. М. Петухов, А. М. Линьков. – М.: Недра, 1983. – 280 с.
84. Полянина, Г. Д. Выбор и исследование метода борьбы с газодинамическими явлениями на Верхнекамских калийных рудниках: специальность 05.00.00 «Техника»: автореферат диссертации, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук / Полянина Генриетта Даниловна; Кузбасский политехнический институт. – Кемерово: КПИ, 1968. – 24 с.
85. Пономарев, В. С. Энергонасыщенность геологической среды / В. С. Пономарев. – М.: Наука, 2008. – 378 с.
86. Практическая методика определения энергозатрат и энергоемкости производства продукции, а также потребностей в энергоресурсах // протокол N 17 от 07.06.2001 г. – 2001. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200085539> (дата обращения: 20.09.2019). – Текст: электронный.
87. Проскураков, Н. М. Внезапные выбросы породы и газа в калийных рудниках / Н. М. Проскураков. – М.: Недра, 1980. – 264 с.
88. Протоdjяконов, М. М. Материалы для урочного положения горных работ. Часть 1. Горные работы / М. М. Протоdjяконов. – Изд. ЦК горнорабочих СССР, 1926. – 274 с.
89. Резник, Н. Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов / Н. Е. Резник. – М.: Машиностроение, 1975. – 311 с.
90. Ржевский, В. В. Основы физики горных пород / В. В. Ржевский, Г. Я. Новик. – М.: Недра, 1978. – 390 с.
91. Родионов, В. Н. Основы геомеханики / В. Н. Родионов, И. А. Сизов, В. М. Цветков. – М.: Недра, 1986. – 299 с.
92. Рожков, В. П. Определение числа опытов / В. П. Рожков, А. Л. Неверов // Разведка и охрана недр. – 2014. – № 11. – С. 17–19.
93. Савченко, С. Н. Напряженное состояние пород блочного строения / С. Н. Савченко, А. А. Козырев, В. А. Мальцев // ФТПРПИ. – 1994. – №5. – С. 38–47.

94. Садовский, М. А. Физический эквивалент понятия "тектоническая сила" / М. А. Садовский, Ю. Н. Авсюк // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. – 2002. – Т. 3. – С. 84–93.
95. Садовский, М. А. О механике блочного горного массива / М. А. Садовский, Г. Г. Кочарян, В. Н. Родионов // Доклад АН СССР. – 1988. – Т. 302. – № 2. – С. 306–307.
96. Сегаль, А. И. Прикладная теория упругости / А. И. Сегаль. – Л.: СУДПРОМ ГИЗ, 1961. – 268 с.
97. Свинин, В. С. Особенности профилактики динамических проявлений горного давления на апатитовых рудниках / В. С. Свинин, В. Ю. Запорожец // Техногенная сейсмичность при горных работах: модели очагов, прогноз, профилактика. – 2004. – Ч. 2. – С. 187–195.
98. Сидоренков, Н. С. Физика нестабильностей вращения Земли / Н. С. Сидоренков. – М.: Наука, 2002. – 375 с.
99. Сорохтин, О. Г. Развитие Земли: учебник / О. Г. Сорохтин, С. А. Ушаков; под ред. акад. РАН В. А. Садовниченко. – М.: Изд-во МГУ, 2002. – 560 с.
100. Спивак, А. И. Разрушение горных пород при бурении скважин / А. И. Спивак, А. Н. Попов. – М.: Недра, 1979. – 239 с.
101. Ставрогин, А. Н. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах / А. Н. Ставрогин, А. Г. Протосеня. – М.: Недра, 1985. – 271 с.
102. Ставрогин, А. Н. Экспериментальная физика и механика горных пород / А. Н. Ставрогин, Б. Г. Тарасов. – СПб.: Наука, 2001. – 343 с.
103. Сторчеус, А. В. Заметки к методике расчета сейсмической энергии взрывов и землетрясений / А. В. Сторчеус // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, 27–29 марта, 2008 г. – Петропавловск–Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2008. – С. 274–281.
104. Сукнев, С. В. Методика определения статического модуля упругости и коэффициента Пуассона горных пород при изменении температуры образца / С. В. Сукнев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 8. – С. 101–105.
105. Суриков, В. В. Механика разрушения мерзлых грунтов / В. В. Суриков. – Л.: Стройиздат, 1978. – 128 с.

106. Тарасов, Б. Г. Энергоемкость процессов хрупкого разрушения горных пород: специальность 01.02.07 "Механика сыпучих тел и грунтов": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Тарасов Борис Григорьевич; ВНИМИ. – Л., 1983. – 233 с.
107. Тарасов, Б. Г. Закономерности деформирования и разрушения горных пород при высоких давлениях: специальность 05.15.11 "Физические процессы горного производства": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Тарасов Борис Григорьевич; Ленинградский ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени Горный институт. – СПб.: ЛГИ, 1992. – 378 с.
108. Тангаев, И. А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых / И. А. Тангаев. – М.: Недра, 1986. – 231 с.
109. Трубицын, В. П. Мантийная конвекция с плавающими континентами / В. П. Трубицын, В. В. Рыков // Проблемы глобальной геодинамики, Материалы Теоретического семинара ОГГГН РАН. – 1999. – Ч. 1. – С. 6–27.
110. Турчанинов, И. А. Основы механики горных пород / И. А. Турчанинов, М. А. Иофис, Э. В. Каспарьян. – СПб: Недра, 1977. – 503 с.
111. Турчанинов, И. А. Современные методы комплексного определения физических свойств горных пород / И. А. Турчанинов, Р. В. Медведев, В. И. Панин. – Л.: Недра, 1967. – 200 с.
112. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам": утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 2 декабря 2013 г. № 576: введены в действие 03.09.2014. – 76 с.
113. Филоненко-Бородич, М. М. Теория упругости / М. М. Филоненко-Бородич. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. – 364 с.
114. Фисенко, Г. Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок / Г. Л. Фисенко. – М.: Недра, 1976. – 272 с.
115. Фридман, Я. Б. Механические свойства металлов / Я. Б. Фридман. – М.: Оборонгиз, 1946. – 424 с.

116. Шадрина, А. В. Исследование разрушения твердой горной породы энергией удара / А. В. Шадрина, Т. В. Кабанова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 6. – С. 381–385.
117. Шпанский, О. В. Обоснование границ открытых горных работ на железорудном месторождении Куркенпахк АО "Олкон" / О. В. Шпанский, К. С. Арзуманян, И. А. Ишкулова // Записки Горного института. – 2002. – Т. 152. – С. 95–98.
118. Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона: в 86 т. (82 т. и 4 доп.). – СПб., 1890–1907.
119. Яковлев, В. Л. Оценка напряженного состояния прибортовых массивов карьеров / В. Л. Яковлев, А. В. Яковлев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2007. – № 3. – С. 36–44.
120. ASTM D 7012-10. Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures: American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, 2010. – 9 p.
121. Brady, B. H. G. Energy changes and stability in underground mining: design applications of boundary methods / B. H. G. Brady, E. T. Brown // Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. – 1981. – Section A. – Pp. 61–68.
122. Brady, B. H. G. Rock mechanics for underground mining / B. H. G. Brady, E. T. Brown. – Springer Science/Business Media, 2005 – 628 p.
123. Cai, M. Prediction and prevention of rockburst in metal mines - A case study of Sanshandao gold mine / M. Cai // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2016. – Vol. 8. – Pp. 204–211.
124. Cook, N. G. W. Rock mechanics applied to the study of rockbursts / N. G. W. Cook, E. Hoek, J. P. G. Pretorius, W. D. Ortlepp, M. D. G. Salamon // Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. – 1966. – Pp. 435–528.
125. Descamps, F. Behavior of carbonated rocks under true triaxial compression / F. Descamps, J.-P. Tshibangu, M. Ramos da Silva, C. Schroeder, J.-C. Verbrugge // Proceedings of the 12th ISRM Congress, Beijing, China. – 2011. – Pp. 597–602.

126. Fedotova, Iu. Specificity of hard rock failure under uniaxial compression / Iu. Fedotova, N. Kuznetsov // Proceedings of the 64th Geomechanics Colloquium EUROCK 2015. – Austria, Salzburg, 2015. – P. 559–564.
127. Fedotova, Iu. V. Specific strain energy assessment of hard rocks under different loading modes / Iu. V. Fedotova, N. N. Kuznetsov, A. K. Pak // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 191. – Pp. 317–323.
128. Griffith, A. A. The phenomena of rupture and flow in solids / A. A. Griffith // Philosophical Transactions of the Royal Society A. – 1921. – № 2. – Pp. 163–198.
129. Griffith, A. A. The theory of rupture / A. A. Griffith // Proceedings of the First International Congress on Applied Mechanics. – 1924. – Pp. 55–63.
130. Griffiths, R. W. The adjustment of mantle plumes to changes in plate motion / R. W. Griffiths, M. A. Richards // Geophysical Research Letters. – 1989. – Vol. 16. – № 5. – Pp. 437–440.
131. Hast, N. The measurement of rock pressure in mines / N. Hast // Sveriges Geologiska Undersökning. – 1958. – № 560. – 183 p.
132. Hedley, D. G. F. Rockburst handbook for Ontario hardrock mines / D. G. F. Hedley // CANMET special report, SP92-1E. – 1992. – Pp. 243–254.
133. Hoek, E. Brittle rock fracture propagation in rock under compression / E. Hoek, Z. T. Bieniawski // International Journal of Fracture Mechanics. – 1965. – Vol. 1. – № 3. – Pp. 137–155.
134. Hudson, J. A. Engineering rock mechanics: an introduction to the principles / J. A. Hudson, J. P. Harrison. – Elsevier Science Ltd., 1997. – 444 p.
135. Irwin, G. R. Analysis of stress and strains near the end of crack traversing a plate / G. R. Irwin // Journal of Applied Mechanics. – 1957. – Vol. 24. – № 3. – Pp. 361–364.
136. ISRM. The complete suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006 / Edited by R. Ulusay and J. A. Hudson. – International Society for Rock Mechanics: Ankara, Turkey, 2007.
137. Kabwe, E. Review on rockburst theory and types of rock support in rockburst prone mines / E. Kabwe, Y. Wang // Open Journal of Safety Science and Technology. – 2015. – № 5. – Pp. 104–121.

138. Kaiser, P. K. Rockburst damage mechanisms and support design principles / P. K. Kaiser, M. Cai // Proceedings of the 8th Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines. – Obninsk–Perm, 2013. – Pp. 349–370.
139. Kidybiski, A. Bursting liability indices of coal / A. Kidybiski // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstract. – 1981. – Vol. 18. – Iss. 4. – Pp. 295–304.
140. Kozyrev, A. The specificities of deformations and failures of highly stressed hard rock massifs / A. Kozyrev, E. Kasparyan, Iu. Fedotova, N. Kuznetcov // 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 (дата обращения: 21.10.2019). – Текст: электронный.
141. Kuznetcov, N. N. Strain and energy parameters of burst-prone rocks: study and analysis / N. N. Kuznetcov, I. V. Fedotova, A. K. Pak // Proceedings of the 3rd International Conference on Rock Dynamics and Applications (RocDyn-3). – London: Taylor & Francis Group, 2018. – Pp. 281–284.
142. Li, X. True-triaxial testing techniques for rocks / X. Li, L. Shi, B. Bai, Q. Li, D. Xu, X. Feng // State of the art and future perspectives. – CRC Press/Balkema, Leiden, 2012. – Pp. 3–16.
143. Manchao, H. Prediction of rockburst based on experimental systems and artificial intelligence techniques / H. Manchao, J. Xuena, A. Peixoto, L. R. Sousa, R. L. Sousa, T. Miranda // South American Tunnelling. – 2012. – URL: https://www.researchgate.net/publication/270162149_Prediction_of_Rockburst_Based_on_Experimental_Systems_and_Artificial_Intelligence_Techniques (дата обращения: 20.09.2019). – Текст: электронный.
144. Mellor, M. Normalization of specific energy values / M. Mellor // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 1972. – Vol. 9. – Pp. 661–663.
145. Mishra, D. A. Laboratory triaxial testing - from historical outlooks to technical aspects / D. A. Mishra, I. Janecek // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 191. – Pp. 342–351.

146. Morrison, D. Rockburst research handbook / D. Morrison, G. Swan, P. Kaiser, M. Neumann, V. Kazakadis, S. Talebi // CD-ROM Version. – 1995. – Vol. 4. – Ch. 1. –976 p.
147. Nettelfield, D. The influence of plate-like surface motion on upwelling dynamics in numerical mantle convection models / D. Nettelfield, J. P. Lowman // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 2007. – Vol. 161. – Pp. 184–201.
148. Neves, P. F. Evaluation of elastic deformation energy in stone cutting of Portuguese marbles with a diamond saw / P. F. Neves, M. C. Silva, V. F. N. Torres // *The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2012. – Vol. 112. – Pp. 413–418.
149. Pan, J. Experimental research of coal burst potential based on energy dissipation / J. Pan, J. He, J. Zhang // *Progress in safety science and technology*. – 2006. – Vol. 6. – Part A. – Pp. 1719–1723.
150. Ptacek, J. Rockburst in Ostrava-Karvina coalfield / J. Ptacek // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 191. – Pp. 1144–1151.
151. Salamon, M. D. G. Stability, instability and design of pillar workings / M. D. G. Salamon // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*. – 1970. – Vol. 7. – Pp. 613–631.
152. Shi, G. Stress-drop effect on brittleness evaluation of rock materials / G. Shi, G. Chen, Y. Pan, X. Yang, Y. Liu, G. Dai // *Journal of Central South University*. – 2019. – Vol. 26. – Pp. 1807–1819.
153. Singh, S. P. Technical note. Burst energy release index / S. P. Singh // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 1988. – Vol. 21. – Pp. 149–155.
154. Skufin, P. K. Proterozoic central-type volcano in the Pechenga Structure and its relation to the ore-bearing gabbro-wehrlite complex of the Kola Peninsula / P. K. Skufin, T. B. Bayanova // *Petrology*. – 2006. – Vol. 14. – Pp. 609–627.
155. Skufin, P. K. Geochemical and tectono-magmatic evolution of the volcano-sedimentary rocks of Pechenga and other greenstone fragments of the Kola Greenstone Belt / P. K. Skufin, H. F. J. Theart // *Precambrian Research*. – 2005. – Vol. 141. – Pp. 1–48.
156. Smith, C. The science of energy: a cultural history of energy physics in Victorian Britain / C. Smith. – The University of Chicago Press, 1998. – 411 p.

157. Tarasov, B. G. Superbrittleness of rocks at high confining pressure / B. G. Tarasov // Deep Mining. – Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2010. – Pp. 119–133.
158. Tarasov, B. G. Superbrittleness of rocks and earthquake activity / B. G. Tarasov, M. F. Randolph // International Journal of Rock Mechanics & Mining Science. – 2011. – Vol. 48. – Iss. 6. – Pp. 888–898.
159. Xia, M. Particle simulation of the failure process of brittle rock under triaxial compression / M. Xia, K. Zhou // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. – 2010. – Vol. 17. – № 5. – Pp. 507–513.
160. Zhao, T. Numerical investigation of influence of drilling arrangements on the mechanical behavior and energy evolution of coal models / T. Zhao, W. Guo, F. Yu, Y. Tan, B. Huang, S. Hu // Advances in Civil Engineering. – 2018. – URL: <https://www.hindawi.com/journals/ace/aip/3817397/> (дата обращения: 20.09.2019). – Текст: электронный.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Регламент по обоснованию устойчивых параметров борта карьера и отвалов участка Гакман Юкспорского месторождения

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
(ФИЦ КНЦ РАН)

ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ КНЦ РАН
(ГоИ КНЦ РАН)

УТВЕРЖДАЮ

Директор ГоИ КНЦ РАН

д.т.н.  С.В. Лукичёв

« ____ » _____ 2020 г.



РЕГЛАМЕНТ ПО ОБОСНОВАНИЮ УСТОЙЧИВЫХ ПАРАМЕТРОВ БОРТА КАРЬЕРА
И ОТВАЛОВ УЧАСТКА ГАКМАН ЮКСПОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Отчёт (заключительный) в рамках хоздоговора № 26122 от 01.10.2019 г.

Руководитель работы, зав. отделом Геомеханики,
проф. д.т.н.

 А.А. Козырев

Отв. исполнитель, вед. науч. сотр.,
д.т.н.

 В.В. Рыбин

Апатиты
2020