

Исследование физико-механических свойств ийолит-уртита в условиях одноосного и трехосного сжатия

Н.Н. Кузнецов✉, А.К. Пак

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

✉ n.kuznecov@ksc.ru

Резюме: Исследование процессов деформирования и разрушения в массивах пород зачастую выполняют в лабораторных условиях на образцах. Для этого используют широко распространенное экспериментальное оборудование, позволяющее создавать условия нагружения, схожие с массивом. В основном реализуется режим нагружения, когда усилия прикладываются только к одной стороне образца (вдоль одной оси), то есть одноосное сжатие или растяжение. Реже применяют экспериментальные установки, которые позволяют создавать условия трехосного напряженного состояния. Такое оборудование зачастую очень дорогое, а испытания требуют много времени и ресурсов. Но тем не менее именно этот режим нагружения является наиболее приближенным к реальным условиям, имеющим место в массиве пород. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований образцов ийолит-уртита (горной породы Хибинского массива, Кольский регион) в условиях одноосного и трехосного сжатия. Цель исследований заключается в том, чтобы установить, как изменяются значения пределов прочности этой породы, критические значения удельной энергии деформирования, а также склонность к динамическому разрушению при переходе от одноосного режима нагружения к трехосному. В ходе выполненных экспериментальных исследований выявлено, что значения пределов прочности и критические значения удельной энергии деформирования образцов ийолит-уртита резко возрастают в условиях трехосного сжатия по сравнению с одноосным сжатием. Установлено, что изученная скальная порода является склонной к динамическому разрушению при одноосном сжатии и не теряет своей склонности к такому виду разрушения при трехосном сжатии.

Ключевые слова: скальные горные породы, одноосное сжатие, трехосное сжатие, ийолит-уртит, физико-механические свойства, динамическое разрушение

Для цитирования: Кузнецов Н.Н., Пак А.К. Исследование физико-механических свойств ийолит-уртита в условиях одноосного и трехосного сжатия. *Горная промышленность*. 2024;(2):127–133. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-127-133>

Investigation of physical and mechanical properties of ijolite-urtite under uniaxial and triaxial compression

N.N. Kuznetsov✉, A.K. Pak

Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

✉ n.kuznecov@ksc.ru

Abstract: The study of deformation and failure processes in rock masses is often carried out in laboratory conditions on samples. Widely used test equipment is used for this purpose, which makes it possible to create loading conditions similar to those inside the rock mass. Basically, the loading mode is implemented when forces are applied only to one side of the sample (along one axis), that is, uniaxial compression or tension. Test equipment that allows creation of loading along three axes, i.e. triaxial compression, is used less frequently. Such equipment is often very expensive, and testing requires a lot of time and resources. Nevertheless, this loading mode is one of the most interesting, since it is close to real conditions in the rock mass. This paper presents the results of experimental studies of ijolite-urtite samples (rocks from the Khibiny massif, the Kola Region) in conditions of uniaxial and triaxial compression. The purpose of the research is to establish how the values of the compressive strength of this rock change, to assess the critical values of the specific strain energy, as well as the tendency to dynamic destruction during the transition from the uniaxial loading mode to the triaxial one. The experimental studies revealed that there exists a sharper increase in the values of compressive strength and the critical values of specific strain energy of the ijolite-urtite samples in conditions of triaxial compression than under uniaxial compression. It has been established that the studied rock is prone to dynamic failure under uniaxial compression and preserve its tendency to this type of failure under triaxial compression.

Keywords: hard rocks, uniaxial compression, triaxial compression, ijolite-urtite, physical and mechanical properties, dynamic failure

For citation: Kuznetsov N.N., Pak A.K. Investigation of physical and mechanical properties of ijolite-urtite under uniaxial and triaxial compression. *Russian Mining Industry*. 2024;(2):127–133. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-127-133>

Введение

К настоящему времени накоплен значительный объем данных о физико-механических свойствах горных пород и методах их испытаний [1–8]. Можно уверенно сказать, что одним из наиболее распространенных методов испытаний является нагружение образцов в режиме одноосного сжатия. В результате получают знания о прочностных и упругих свойствах пород, характере их деформирования, критических значениях удельной энергии деформирования, склонности к разрушению в динамической форме и др. Данный вид испытаний является простым, его можно реализовать на относительно недорогом и доступном лабораторном оборудовании. Однако подобный режим нагружения характеризует предельные случаи разрушения в массиве пород, когда имеются свободные поверхности и отсутствуют боковые нагрузки.

Исследователей всегда интересовал вопрос, каким образом будут меняться свойства пород в нетронutom массиве, который находится в условиях объемного напряженного состояния. С этой целью Т. Карманом была разработана одна из первых экспериментальных установок, позволяющая испытывать образцы при трехосном равнокомпонентном сжатии [1; 9; 10]. Нагружение в ней осуществлялось при помощи поршня, который сдавливал рабочую жидкость (глицерин) и создавал боковое давление. Первые результаты на образцах мрамора показали, что при увеличении бокового давления прочность образцов возрастала.

Опыты Т. Кармана впоследствии были воспроизведены О. Мюллером [1; 11] в аналогичных условиях, в ходе чего были подтверждены полученные результаты для мрамора, песчаника, сланца и каменного угля. Позднее в работах авторов [12–14] опытным путем было показано, что подобная тенденция увеличения прочности образцов с возрастанием бокового давления характерна и для других типов пород.

На данный момент лабораторное оборудование для испытаний образцов горных пород в условиях трехосного сжатия претерпело ряд технических изменений. Возросли нагружающие способности прессов, увеличилась жесткость нагружающих систем, возросло количество контролируемых и определяемых параметров в ходе эксперимента, а также появилась возможность создания трехосной неравнокомпонентной нагрузки [8; 15–19]. Получены новые данные об изменении прочностных и деформационных свойств пород в условиях трехосного сжатия [15–23]. Для ряда горных пород установлено, что с увеличением бокового давления уменьшается их склонность к разрушению в динамической форме, а при высоких значениях бокового давления подобная склонность и вовсе пропадает [21–25], т.е. породы переходят в состояние пластического деформирования.

Несмотря на значительный задел в области исследования свойств пород при нагружении их в условиях трехосного сжатия, существует проблема с получением экспериментальных данных. В основном она связана с высокой стоимостью испытательного оборудования, а также с трудозатратными испытаниями образцов. Тем не менее важность этого метода заключается в том, что он позволяет определить, как меняются свойства пород в условиях трехосного сжатия, а также выявить, будет ли меняться склонность пород к разрушению в динамической форме при увеличении бокового давления.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований образцов ийолит-уртита (горной

породы Хибинского массива, Кольский регион) в условиях одноосного и трехосного сжатия. Основная цель исследований заключается в том, чтобы установить, как изменяются значения пределов прочности этой породы, критические значения удельной энергии деформирования, а также склонность к динамическому разрушению при переходе от одноосного режима нагружения к трехосному.

Методика

Исследования выполняли на образцах ийолит-уртита нечетко-трахитоидного мелко-среднезернистого (рис. 1), отобранных с апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива. Их изготавливали из керна с пришлифовкой торцов и доведением размеров до стандартных по ГОСТ 21153.2–84. Соотношение высоты к диаметру образцов составило 2:1 (95 и 47,5 мм соответственно).



Рис. 1
Образцы ийолит-уртита нечетко-трахитоидного мелко-среднезернистого

Fig. 1
Samples of indistinctly trachtyoid fine-to-medium grained ijolite-urtite

На первом этапе исследований образцы ийолит-уртита испытывали при одноосном сжатии и растяжении (рис. 2) в режиме постоянной скорости нагружения (2,5 МПа/с) на сервогидравлической установке MTS 816 Rock Test System. По результатам испытаний определяли их прочностные и деформационные свойства. Критические значения удельной энергии деформирования образцов рассчитывали по формуле (1).

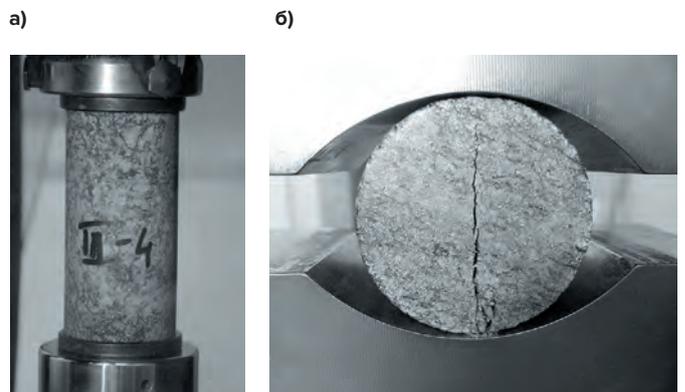


Рис. 2
Испытание образцов ийолит-уртита:
а) при одноосном сжатии;
б) при одноосном растяжении (сжатие по образующим)

Fig. 2
Testing of the ijolite-urtite samples:
а) under uniaxial compression;
б) under uniaxial tension (compression along formations)

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

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

Основываясь на полученных данных, для ийолит-уртита выполняли оценку удароопасности по критерию Кайзера [26] и энергетическому критерию [27].

На втором этапе исследований образцы ийолит-уртита нагружали в условиях трехосного равнокомпонентного сжатия (рис. 3) при величинах бокового давления 20, 30, 40, 50, 60 и 80 МПа с использованием сервогидравлической установки MTS 816. При каждом значении бокового давления испытывали по четыре образца (кроме 80 МПа, в этом случае было испытано два образца). По результатам испытаний определяли значения пределов прочности ийолита-уртита и критические значения удельной энергии деформирования, рассчитываемые по формуле (2). Также в ходе нагружения фиксировали характер разрушения образцов и строили полные графики их деформирования. Полученные данные использовали для анализа изменения физико-механических свойств и склонности к разрушению в динамической форме исследуемой породы при пе-

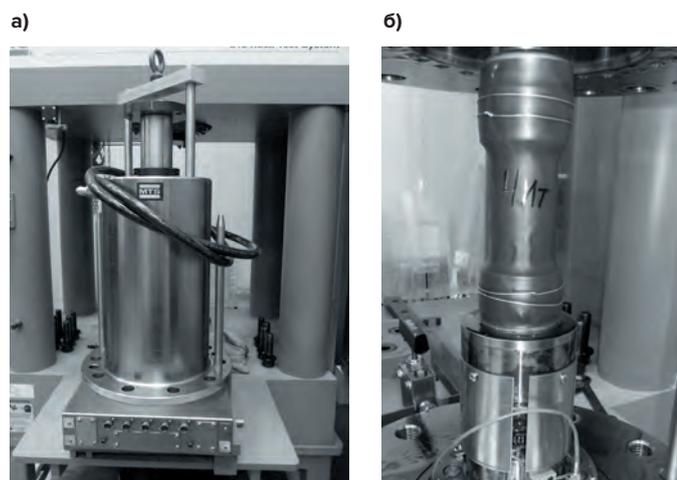


Рис. 3
Испытание образцов ийолит-уртита при трехосном сжатии:
а) общий вид камеры трехосного сжатия;
б) образец, подготовленный для испытаний



Fig. 3
Testing of the ijolite-urtite samples under triaxial compression:
а) general view of the triaxial compression cell;
б) sample prepared for testing

реходе от условий одноосного сжатия к трехосному.

$$W_{\text{тр}} = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3)}{2E}, \quad (2)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – осевое и боковые сжимающие напряжения, МПа; ν – коэффициент Пуассона.

Результаты и обсуждение

На основании проведенных испытаний образцов ийолит-уртита в условиях одноосного напряженного состояния определены основные их прочностные и деформационные свойства, а также критические значения удельной энергии деформирования (табл. 1). Согласно полученным данным эту породу можно охарактеризовать как скальную, высокопрочную (предел прочности при сжатии в среднем выше 200 МПа), хрупкую (коэффициент хрупкости больше 10).

Анализируя графики деформирования образцов ийолит-уртита при одноосном сжатии (рис. 4), можно отметить, что их участки до предела прочности по виду близки к прямолинейным. Это, в свою очередь, свидетельствует о преимущественно упругом характере их деформирования. При достижении предела прочности происходит мгновенное разрушение образцов в динамической форме со взрывоподобным звуком и разлетом осколков, а графики резко обрываются, что характерно для склонных к динамическому разрушению пород.

При оценке потенциала удароопасности образцов ийо-

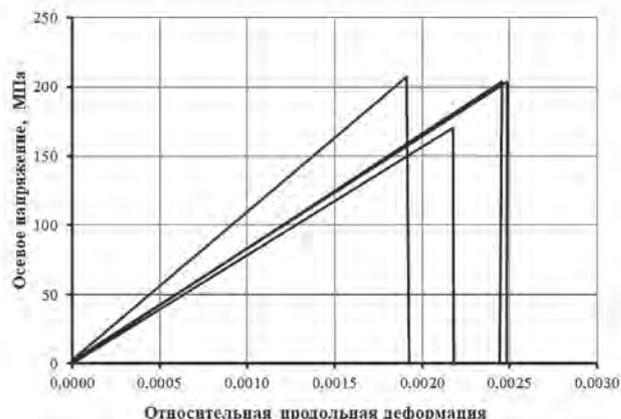


Рис. 4
Графики деформирования образцов ийолит-уртита при одноосном сжатии

Fig. 4
Plots of the ijolite-urtite samples' deformation under uniaxial compression

Таблица 1
Результаты испытаний образцов ийолит-уртита при одноосном сжатии и растяжении

Показатель	Обозначение	Плотность, г/см ³	Предел прочности при сжатии, МПа	Предел прочности при растяжении, МПа	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона	Коэффициент хрупкости	Критическое значение удельной энергии деформирования, МДж/м ³
Среднее значение	X	2,88	219	8,3	88,69	0,22	27	0,28
Стандартное отклонение	S	0,13	36	1,7	17,17	0,02	4	0,08
Количество образцов, шт.	N	10	10	10	10	10	10	10
Коэффициент вариации, %	V	4	17	20	19	10	14	30

Table 1
Test results of the ijolite-urtite samples under uniaxial compression and tension

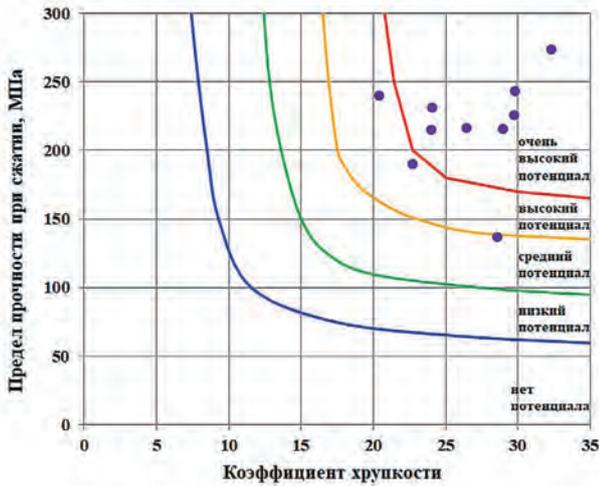


Рис. 5
Оценка потенциала удароопасности образцов ийолит-уртита по критерию Кайзера
Источник: [26]

Fig. 5
Assessment of rockburst hazard potential of ijolite-urtite samples using the Kaiser criterion
Source: [26]

лит-уртита по критерию Кайзера [26] выявлено, что 10% исследованных образцов имеет средний потенциал, 20% – высокий потенциал, 70% – очень высокий потенциал (рис. 5). Следовательно, согласно рассматриваемому критерию эта порода является потенциально удароопасной.

По энергетическому критерию установлен следующий характер разрушения образцов ийолит-уртита (рис. 6): для 10% образцов – слабо динамический характер разрушения, еще для 10% – динамический, и для оставшихся 80% – интенсивно динамический. Из этого следует, что все образ-

Таблица 2
Результаты испытаний образцов ийолит-уртита при трехосном сжатии

Номер образца п/п	Боковое давление ($\sigma_2=\sigma_3$), МПа	Предел прочности при трехосном сжатии, МПа	Критическое значение удельной энергии деформирования, МДж/м ³	Модуль деформации, ГПа	Модуль спада, ГПа	Отношение модуля деформации к модулю спада
1	20	482	1,26	92,05	703,59	0,13
2	20	551	1,66	82,86	999,30	0,08
3	20	575	1,81	95,91	6791,22	0,01
4	20	422	0,96	82,27	306,80	0,27
5	30	565	1,72	87,00	613,28	0,14
6	30	666	2,41	115,85	900,78	0,13
7	30	581	1,83	106,04	775,67	0,14
8	30	416	0,92	102,28	477,67	0,21
9	40	526	1,47	81,33	504,12	0,16
10	40	511	1,39	83,18	522,97	0,16
11	40	610	1,99	91,15	539,80	0,17
12	40	633	2,15	91,60	13935,82	0,01
13	50	766	3,14	70,31	768,06	0,09
14	50	643	2,19	101,57	12252,73	0,01
15	50	639	2,16	94,59	2033,10	0,05
16	50	664	2,34	104,55	1805,00	0,06
17	60	642	2,16	133,06	4996,31	0,03
18	60	765	3,11	116,80	8745,82	0,01
19	60	794	3,34	120,37	2357,56	0,05
20	60	730	2,81	109,02	1438,48	0,08
21	80	843	3,73	107,66	2138,87	0,05
22	80	842	3,71	114,59	9241,49	0,01

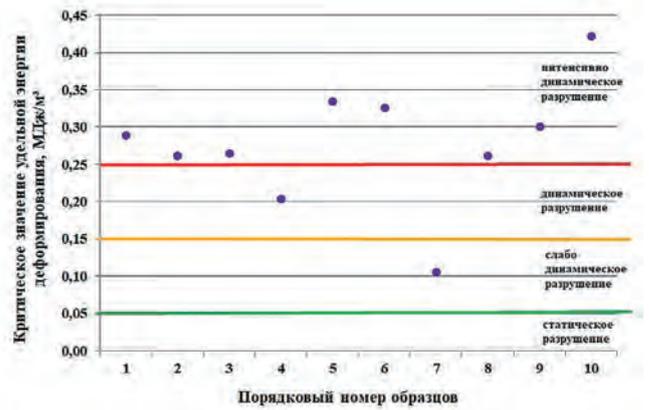


Рис. 6
Оценка склонности образцов ийолит-уртита к разрушению в динамической форме по энергетическому критерию

Fig. 6
Evaluation of the propensity of ijolite-urtite samples to failure in dynamic form by the energy criterion

цы изученной породы склонны к разрушению в динамической форме.

Таким образом, по совокупности выявленных признаков (коэффициент хрупкости равен в среднем 27, упругий характер деформирования, очень высокий потенциал удароопасности по критерию Кайзера, интенсивно динамический характер разрушения по энергетическому критерию) ийолит-уртит нечетко-трахитоидный мелко-среднезернистый можно отнести к склонной к разрушению в динамической форме породе.

В ходе экспериментальных исследований образцов ийолит-уртита при нагружении их в условиях трехосного сжатия получены следующие результаты (табл. 2).

Table 2
Test results of the ijolite-urtite samples under triaxial compression

На основании анализа полученных данных (табл. 2) установлено, что значение предела прочности образцов ийолит-уртита при боковом давлении 20 МПа в среднем увеличилось в 2 раза по сравнению с пределом прочности в отсутствие боковых нагрузок, т.е. при одноосном сжатии. Затем с возрастанием бокового давления прочность образцов продолжает увеличиваться, что наглядно продемонстрировано на рис. 7. При значении $\sigma_2 = \sigma_3 = 80$ МПа предел прочности ийолит-уртита в среднем составил 842 МПа, что почти в 4 раза выше прочности при одноосном сжатии.

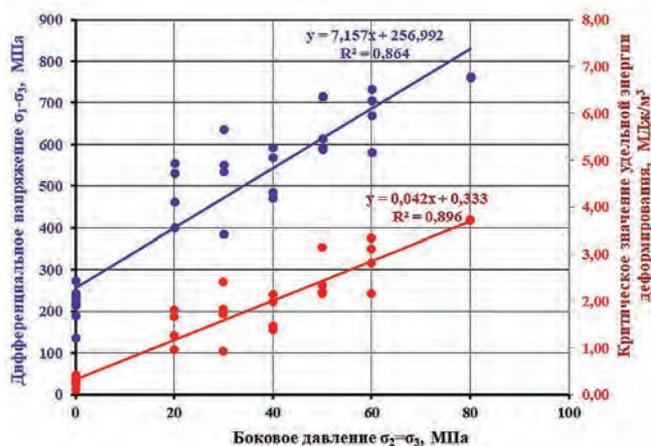


Рис. 7
Зависимость дифференциальных напряжений и критических значений удельной энергии деформирования от бокового давления при нагружении образцов ийолит-уртита в условиях трехосного сжатия

Fig. 7
Dependence of the differential stresses and critical values of specific strain energy on the lateral pressure when loading of the ijolite-urtite samples in the triaxial compression conditions

Схожая тенденция в условиях трехосного сжатия установлена и для критических значений удельной энергии деформирования ийолит-уртита (рис. 7). Так, при боковом давлении 20 МПа критическое значение удельной энергии деформирования образцов увеличилось в 5 раз по сравнению с этим значением при одноосном сжатии, а при боковом давлении 80 МПа – в 13 раз.

Таким образом, прочность образцов ийолит-уртита и критическое значение удельной энергии деформирования в условиях трехосного сжатия с увеличением бокового давления будут возрастать.

Графики деформирования образцов ийолит-уртита, построенные по результатам испытаний при трехосном сжатии, представлены на рис. 8. В ходе анализа этих графиков выявлено, что их участки до предела прочности близки к прямолинейным либо имеют выпуклую форму, а за пределом прочности резко обрываются. Разрушение образцов происходит в динамической форме с сильным звуком. Такой характер разрушения сохраняется для ийолит-уртита и при боковом давлении 80 МПа.

В условиях трехосного сжатия для образцов ийолит-уртита также определены значения модуля деформации и модуля спада. Если проводить аналогию с критерием А.Н. Старогина [28] и определять отношение модуля де-

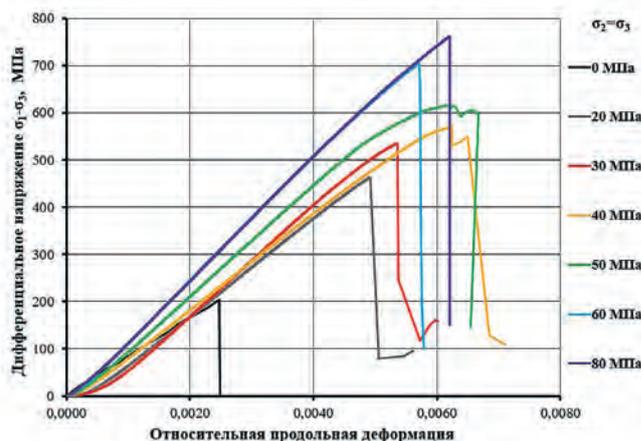


Рис. 8
Графики деформирования образцов ийолит-уртита при трехосном сжатии

Fig. 8
Plots of the ijolite-urtite samples' deformation under triaxial compression

формации к модулю спада, то для всех исследованных образцов оно будет меньше единицы. Модуль упругости, установленный для ийолит-уртита при одноосном сжатии, в среднем составляет 88,69 ГПа (табл. 1). Если определять его отношение к модулю спада при различных значениях бокового давления, то получим, что при боковом давлении 20 МПа это отношение в среднем составит 0,04, при боковом давлении 30 МПа – 0,13, при 40 МПа – 0,02, при 50 МПа – 0,02, при 60 МПа – 0,02, при 80 МПа – 0,02. То есть во всех случаях коэффициент удароопасности будет меньше единицы, а значит порода будет склонна к разрушению в динамической форме по критерию А.Н. Старогина. Следовательно, при переходе от одноосного сжатия к трехосному (величина бокового давления до 80 МПа включительно) склонность ийолит-уртита к динамическому разрушению сохраняется, что также подтверждается обрывом графиков за пределом прочности (см. рис. 8) и характером разрушения образцов.

Выводы

Таким образом, по результатам экспериментальных исследований образцов ийолит-уртита нечетко-гравитовидного мелко-среднезернистого в условиях одноосного и трехосного сжатия определены их основные прочностные и деформационные свойства, а также критические значения удельной энергии деформирования.

Показано, что пределы прочности образцов изучаемой породы при переходе от одноосного режима нагружения к трехосному возрастают. При боковом давлении 20 МПа прочность в среднем увеличилась в 2 раза по сравнению с пределом прочности при одноосном сжатии. При значении бокового давления 80 МПа предел прочности ийолит-уртита в среднем составил 842 МПа, что почти в 4 раза выше прочности при одноосном сжатии.

Для критических значений удельной энергии деформирования ийолит-уртита при переходе от одноосного сжатия к трехосному выявлена следующая тенденция. При боковом давлении 20 МПа критическое значение удельной энергии деформирования образцов увеличилось в 5 раз по сравнению с этим значением при одноосном сжатии, а при боковом давлении 80 МПа – в 13 раз.

Установлено, что по критерию Кайзера и энергетическому критерию ийолит-уртит в условиях одноосного нагружения является склонным к разрушению в динамической форме, что также подтверждается рядом других признаков (высоким значением коэффициента хрупкости, упругим характером деформирования и хрупким разрушением образцов). В условиях трехосного нагружения при величине бокового давления до 80 МПа включительно склонность ийолит-уртита к динамическому разрушению сохраняется, что подтверждается результатами выполненной оценки по критерию А.Н. Ставрогина и характером деформирования и разрушения образцов.

Таким образом, на основании выполненных исследований показано, что значения пределов прочности и критические значения удельной энергии деформирования образцов скальных пород могут резко возрастать в условиях трехосного сжатия по сравнению с одноосным сжатием. Также установлено, что ийолит-уртит является склонным к динамическому разрушению при одноосном сжатии и не теряет своей склонности к такому виду разрушения при трехосном сжатии. Из этого следует, что при действии в массиве пород высоких напряжений ийолит-уртит нечетко-трахитоидный мелко-среднезернистый может быть удароопасным.

Список литературы / References

1. Кузнецов Г.Н. *Механические свойства горных пород*. М.: Углетехиздат; 1947. 180 с.
2. Турчанинов И.А., Медведев Р.В., Панин В.И. *Современные методы комплексного определения физических свойств горных пород*. Ленинград: Недра; 1967. 200 с.
3. Ильницкая Е.И., Тедер Р.И., Ватолин Е.С., Кунтыш М.Ф. *Свойства горных пород и методы их определения*. М.: Недра; 1969. 392 с.
4. Берон А.И., Ватолин Е.С., Койфман М.И. *Свойства горных пород при разных видах и режимах нагружения*. М.: Недра; 1984. 276 с.
5. Ломтадзе В.Д. *Физико-механические свойства горных пород*. Ленинград: Недра; 1990. 328 с.
6. Каспарьян Э.В., Козырев А.А., Иофис М.А., Макаров А.Б. *Геомеханика*. М.: Высшая школа; 2006. 503 с.
7. Jaeger J.C., Cook N. G.W., Zimmerman R.W. *Fundamentals of rock mechanics*. Blackwell publishing, Malden; 2007. 475 p.
8. Feng X.-T., Bezalel H., Li X., Chang C., Ma X., Zhang X., Ingraham M., Suzuki K. I ISRM suggested method: determining deformation and failure characteristics of rocks subjected to true triaxial compression. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019;52(6):2011–2020. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01782-z>
9. Karman T. Festigkeits Versuche unter allseitigem Druck. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*. 1911;55:1749–1759.
10. Deak F., Van P., Vasarhelyi B. Hundred years after the first triaxial test. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2012;56(1):115–122. <https://doi.org/10.3311/pp.ci.2012-1.13>
11. Muller O. Untersuchungen an Karbonatgesteinen zur Klärung von Gebirgsdruckfragen. *Gluckauf*. 1930;47:1601–1612.
12. Воларович М.П., Балашов Д.В., Павлоградский В.А. Исследование сжимаемости изверженных горных пород при давлениях до 5 000 кг/см². *Известия АН СССР. Серия Геофизическая*. 1959;(5):693–702.
Volarovich M.P., Balashov D.V., Pavlogradsky V.A. Study of compressibility of igneous rocks at pressures up to 5,000 kg/cm². *Izvestiya AN SSSR. Seriya Geofizicheskaya*. 1959;(5):693–702. (In Russ.)
13. Томашевская И.С. *Исследование механических свойств горных пород в условиях высокого давления при сложных напряженных состояниях: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук*. М., 1996. 12 с.
14. Horibe T., Kobayashi R. Physical properties of coal-measures rocks under triaxial pressure. *Journal of Mining Society Japan*. 1958;(74):142–146. (In Japan.)
15. Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. *Экспериментальная физика и механика горных пород*. СПб.: Наука; 2001. 343 с.
16. Tarasov B. Superbrittleness of rocks at high confining pressure. In: Van Sint Jan M., Potvin Y. (eds). *Proceedings of the 5th International Seminar on Deep and High Stress Mining, Santiago, Chile, Oct 4–8, 2010*. Australia: Australian Centre for Geomechanics; 2010, pp. 119–133.
17. Mishra D.A., Janecek I. Laboratory triaxial testing – from historical outlooks to technical aspects. *Procedia Engineering*. 2017;191:342–351. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.190>
18. Liu X., Yu J., Zhang J., Yao W., Cai Y., Zhou X. Anisotropic time-dependent deformation and damage constitutive model of rock under true triaxial compression. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2023. <https://doi.org/10.1007/s11043-023-09617-9>
19. Zhang Y., Feng X.-T., Zhang X., Wang Z., Sharifzadeh M., Yang C. A novel application of strain energy for fracturing process analysis of hard rock under true triaxial compression. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019;52(11):4257–4272. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01868-8>

20. Козырев А.А., Кузнецов Н.Н., Шоков А.Н. Оценка удароопасности скальных горных пород Ждановского месторождения (Кольский полуостров). *Горная промышленность*. 2022;(6):75–82. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-75-82>
Kozyrev A.A., Kuznetsov N.N., Shokov A.N. Rockburst hazard assessment of hard rocks in the Zhdanovskoe deposit (Kola Peninsula). *Russian Mining Industry*. 2022;(6):75–82. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-75-82>
21. Xia M., Zhou K. Particle simulation of the failure process of brittle rock under triaxial compression. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2010;17(5):507–513. <https://doi.org/10.1007/s12613-010-0350-4>
22. Shi G.-C., Chen G., Pan Y.-T., Yang X.-L., Liu Y., Dai G.-Z. Stress-drop effect on brittleness evaluation of rock materials. *Journal of Central South University*. 2019;26(7):1807–1819. <https://doi.org/10.1007/s11771-019-4135-2>
23. Descamps F., Tshibangu J.-P., Ramos S.M., Schroeder C., Verbrugge J.-C. Behavior of carbonated rocks under true triaxial compression. In: *Proceedings of the 12th ISRM Congress, Beijing, China*. 2011, pp. 597–602.
24. Tarasov B. Dramatic Weakening and Embrittlement of Intact Hard Rocks in the Earth's Crust at Seismic Depths as a Cause of Shallow Earthquakes. In: Nawaz M., Kundu S.N., Sattar F. (eds) *Earth Crust*. IntechOpen; 2019. <https://doi.org/10.5772/intechopen.85413>
25. Каспарьян Э.В., Кузнецов Н.Н., Шоков А.Н., Пак А.К. Исследование условий динамических разрушений в массивах скальных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(4):69–84. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-40-69-84>
Kasparyan E.E., Kuznetsov N.N., Shokov A.N., Pak A.K. Dynamic failure conditions in strong rock masses. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(4):69–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-40-69-84>
26. Cai M., Kaiser P.K. *Rockburst Support: Reference Book. Volume I: Rockburst Phenomenon and Support Characteristics*. Sudbury: Laurentian University; 2018. 284 p.
27. Козырев А.А., Кузнецов Н.Н., Макаров А.Б. О критериях удароопасности горных пород. *Горная промышленность*. 2023;(S1):61–68. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-61-68>
Kozyrev A.A., Kuznetsov N.N., Makarov A.B. On criteria of rockburst hazard. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):61–68. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-61-68>
28. Петухов И.М., Линьков А.М. *Механика горных ударов и выбросов*. М.: Недра; 1983. 280 с.

Информация об авторах

Кузнецов Николай Николаевич – кандидат технических наук, руководитель лаборатории инструментальных исследований состояния горных пород Арктической зоны РФ, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: n.kuznecov@ksc.ru

Пак Александр Климентьевич – научный сотрудник лаборатории инструментальных исследований состояния горных пород Арктической зоны РФ, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: a.pak@ksc.ru

Information about the authors

Nikolai N. Kuznecov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Instrumental Study of Rock's State of the Russian Arctic Region, Mining Institute, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: n.kuznecov@ksc.ru

Alexandr K. Pak – Researcher of the Laboratory of Instrumental Study of Rock's State of the Russian Arctic Region, Mining Institute, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: a.pak@ksc.ru

Article info

Received: 21.02.2024

Revised: 14.03.2024

Accepted: 16.03.2024

Информация о статье

Поступила в редакцию: 21.02.2024

Поступила после рецензирования: 14.03.2024

Принята к публикации: 16.03.2024