

# Оценка влияния скорости нагружения на прочность скальных горных пород при одноосном сжатии и характер их разрушения

А.А. Козырев, Н.Н. Кузнецов✉, А.К. Пак

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация  
✉ n.kuznecov@ksc.ru

**Резюме:** При исследовании физико-механических свойств горных пород одним из основных определяемых параметров является их предел прочности при одноосном сжатии. В ходе проведения лабораторных экспериментов на значение этого параметра могут влиять как условия нагружения, так и форма изготовленных образцов. Изучая влияние этих факторов, можно давать адекватную оценку изменения прочности пород, а также прогнозировать характер их разрушения. В статье представлены результаты экспериментальных исследований скальных горных пород месторождений Кольского региона при одноосном сжатии. Установлены значения их пределов прочности при скоростях нагружения от 0,01 до 50 кН/с. На основе полученных данных выявлено, что критерий В.А. Фокина можно использовать для определения паспортной прочности пород. Показано, что с увеличением скорости нагружения будут также возрастать значения пределов прочности при одноосном сжатии хрупкой упругой породы (уртита) и нехрупкой упруго-пластичной (карбонатита). Установлено, что для скальных горных пород, склонных к динамическому разрушению, увеличение скорости нагружения будет приводить к возрастанию интенсивности их разрушения. Для нехрупких упруго-пластичных пород увеличение скорости нагружения может привести к тому, что они начнут разрушаться в динамической форме. Полученные выводы свидетельствуют о том, что характер разрушения образцов пород зависит от временного фактора нагружения.

**Ключевые слова:** скорость нагружения, предел прочности при одноосном сжатии, скальная горная порода, разрушение скальных горных пород

**Для цитирования:** Козырев А.А., Кузнецов Н.Н., Пак А.К. Оценка влияния скорости нагружения на прочность скальных горных пород при одноосном сжатии и характер их разрушения. *Горная промышленность*. 2024;(1):126–131. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-1-126-131>

## Assessment of the loading rate impact on the uniaxial compressive strength of hard rocks and their failure behavior

A.A. Kozyrev, N.N. Kuznecov✉, A.K. Pak

Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation  
✉ n.kuznecov@ksc.ru

**Abstract:** When studying physical and mechanical properties of rocks, one of the main parameters to be determined is their uniaxial compressive strength. During laboratory experiments, the value of this parameter can be influenced by both loading conditions and the shape of the prepared samples. By studying the impact of these factors, it is possible to give an adequate assessment of changes in the strength of rocks, as well as to predict their failure behavior. The paper presents the results of experimental studies of hard rocks from the Kola region deposits under uniaxial compression. The values of the rock strength at loading rates from 0.01 to 50 kN/s were established. On the basis of the obtained data it was revealed that the V.A. Fokin criterion can be used to determine the rated strength of rocks. It is shown that the values of uniaxial compressive strength of brittle elastic rock (urtite) and non-brittle elastic-plastic rock (carbonatite) will also increase with the increasing loading rate. It is established that for hard rocks prone to dynamic failure, an increase in the loading rate will lead to an increase in the intensity of their failure. Increasing the loading rate for non-brittle elastic-plastic rocks can cause them to start failing dynamically. The obtained conclusions indicate that the failure behavior of rock samples depends on the time factor of loading.

**Keywords:** loading rate, uniaxial compressive strength, hard rock, failure of hard rock

**For citation:** Kozyrev A.A., Kuznecov N.N., Pak A.K. Assessment of the loading rate impact on the uniaxial compressive strength of hard rocks and their failure behavior. *Russian Mining Industry*. 2024;(1):126–131. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-1-126-131>

## Введение

Одним из наиболее часто применяемых параметров при решении задач геомеханики, связанных с обеспечением устойчивости выработок и прогнозом динамических форм проявления горного давления, является предел прочности горных пород при одноосном сжатии. Его определяют в лабораторных условиях на образцах пород с использованием гидравлических или электромеханических прессов.

В ходе экспериментальных исследований было выявлено, что на предел прочности образцов при одноосном сжатии могут оказывать влияние различные факторы, основными из которых являются размеры образцов (масштабный фактор) [1–4] и скорость их нагружения (временной фактор) [2; 5–12].

В данной работе главное внимание уделено влиянию скорости нагружения на прочность пород. Согласно накопленным данным для большей части пород характерно возрастание значений пределов прочности при сжатии с увеличением скорости нагружения [2; 5–7; 10; 12–14]. Подобный эффект упрочнения, по мнению ряда исследователей, может быть связан с размерами зерен, которые по-разному уплотняются и поворачиваются при сжатии [1; 9; 15], а также с перераспределением энергии в образце, подводимой из нагружающей системы [16].

Более широкое распространение получила концепция, согласно которой увеличение прочности пород с возрастанием скорости нагружения происходит за счет того, что микротрещины в образце не успевают среагировать и развиваться [6; 11; 12; 17; 18]. И, наоборот, при длительных нагрузках микротрещины прорастают по всему объему образца и снижают его прочность. Исходя из этой концепции получаем, что предел прочности пород при одноосном сжатии является временным показателем. Возникает вопрос, какую скорость нагружения нужно использовать для определения этого показателя?

На территории Российской Федерации действует ГОСТ 21153.2–84, согласно которому скорость нагружения образцов пород при испытании в условиях одноосного сжатия нужно выбирать из интервала от 1 до 5 МПа/с. Пределы прочности образцов, определяемые в этом интервале скорости нагружения, можно рассматривать как паспортную характеристику пород (паспортную прочность). Тем не менее даже в этом интервале скоростей прочность пород может быть разной, в результате чего становится важным и необходимым разработать подходы для ее определения вне зависимости от времени нагружения.

Также для исследователей остается ряд не до конца изученных вопросов, а именно: одинаково ли будет изменяться прочность хрупких упругих и упруго-пластичных пород с увеличением скорости нагружения и будет ли меняться характер их разрушения?

В связи с этим поставлена задача изучить влияние временного фактора нагружения на прочность и характер разрушения хрупких упругих и упруго-пластичных горных пород при одноосном сжатии, а также рассмотреть возможность определения их паспортной прочности.

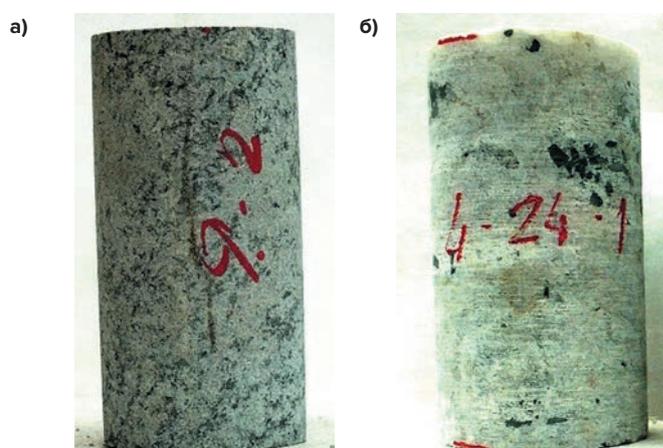
## Материалы и методы исследования

Для проведения исследований отобран керн двух петротипов горных пород месторождений Кольского региона (Мурманская область). Первый тип – уртит нечетко-трахитоидный мелко-среднезернистый, полевошпатовый. Образцы уррита отобраны с апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива. Эта порода является скальной, имеет

высокие значения пределов прочности при сжатии (свыше 100 МПа) и склонна к разрушению в динамической форме (хрупкому разрушению) [19].

Второй петротип изучаемых пород – карбонатит флогопит-кальцитовый массивный, средне-крупнозернистый, с магнетитом. Отобран с Ковдорского магнетит-апатит-бадделейтового месторождения. Эта порода также является скальной, ее пределы прочности при сжатии изменяются от 40 до 90 МПа [19]. Образцы карбонатита при одноосном сжатии разрушаются без динамических проявлений.

Для проведения испытаний изготавливали цилиндрические образцы (рис. 1) с отношением высоты к диаметру равным 2. Диаметр образцов уррита составил 47,5 мм, а карбонатита – 60 мм. Торцы образцов обрабатывали на плоскошлифовальном станке, а параллельность и перпендикулярность сторон контролировали в соответствии с ГОСТ 21153.2–84.



**Рис. 1**  
Образцы, подготовленные для испытаний:  
а – уртит нечетко-трахитоидный мелко-среднезернистый, полевошпатовый;  
б – карбонатит флогопит-кальцитовый массивный, средне-крупнозернистый, с магнетитом

**Fig. 1**  
Samples prepared for testing:  
a – urtite indistinctly trachytoid fine-medium-grained, feldspathic;  
b – carbonate phlogopite-calcite massive, medium-coarse-grained, with magnetite

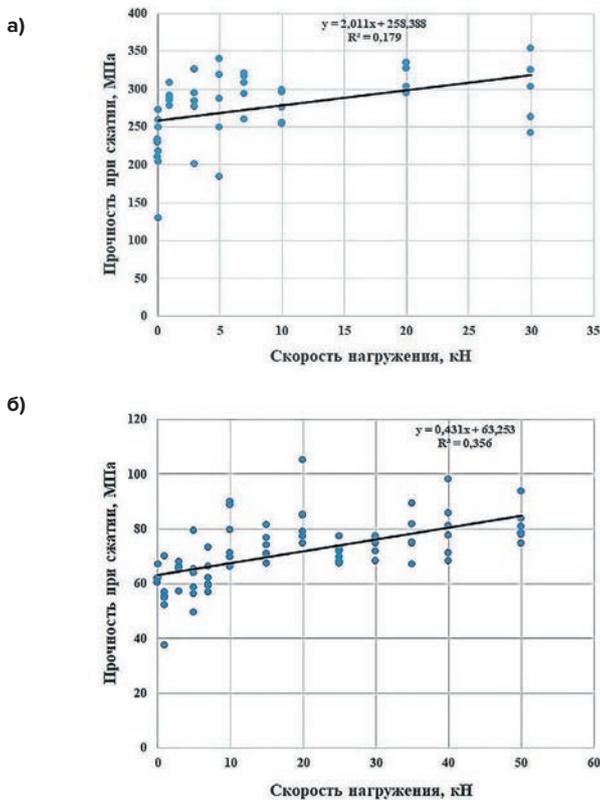
Испытания выполняли на сервогидравлической установке MTS 816 с максимальной нагружающей способностью 2000 кН. Особенность этой установки заключается в том, что она позволяет испытывать образцы горных пород при одноосном сжатии в режиме заданной скорости нагружения (кН/с).

Подготовленные образцы были разделены на группы в соответствии с заданной скоростью нагружения. Для уртитов скорость выбрана равной 0,01, 0,1, 1, 3, 5, 7, 10, 20 и 30 кН/с (0,006, 0,06, 0,6, 1,7, 2,8, 4,0, 5,6, 11,3 и 16,9 МПа/с), а для карбонатитов – 0,01, 0,1, 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 и 50 кН/с (0,003, 0,03, 0,3, 1,0, 1,7, 2,4, 3,4, 5,2, 6,9, 8,7, 10,4, 12,2, 13,9 и 17,2 МПа/с). Количество образцов в каждой группе составило 5–6 шт. Для карбонатита при скорости нагружения 0,01 и 0,1 кН/с испытано по 2 образца.

В ходе испытаний регистрировали значения разрушающей нагрузки, время проведения экспериментов и характер разрушения образцов. Полученные данные использовали для дальнейшего анализа.

**Влияние скорости нагружения на прочность скальных пород при одноосном сжатии**

На основании полученных результатов испытаний построены графики зависимости пределов прочности при одноосном сжатии исследуемых скальных горных пород от скорости их нагружения (рис. 2).



**Рис. 2**  
Графики зависимости пределов прочности при одноосном сжатии образцов от скорости их нагружения: а – уртит; б – карбонатит

**Fig. 2**  
Dependence diagrams of uniaxial compressive strength of samples on their loading rate: а – urtite; б – carbonatite

Как следует из представленных графиков (см. рис. 2), для образцов уртита и карбонатита характерно возрастание значений прочности при сжатии с увеличением скорости нагружения. Следовательно, хрупкая прочная порода (уртит) и упруго-пластичная (карбонатит) ведут себя схожим образом в соответствии с концепцией об упрочнении пород при уменьшении времени их нагружения, когда трещины в образцах не успевают развиваться.

**Таблица 1**  
Результаты испытаний образцов исследуемых скальных горных пород в условиях одноосного сжатия при различных скоростях нагружения

**Table 1**  
Test results of the investigated rock samples under uniaxial compression at different loading rates

Порода	Данные	Скорость нагружения, кН/с													
		0,01	0,1	1	3	5	7	10	15	20	25	30	35	40	50
Уртит	$\sigma_{сжр}$ , МПа	226	222	290	276	275	300	275	–	319	–	297	–	–	–
	V, %	5	23	4	17	22	8	8	–	6	–	15	–	–	–
Карбонатит	$\sigma_{сжр}$ , МПа	61	65	54	65	62	63	78	73	84	71	74	77	80	82
	V, %	2	6	19	6	16	10	13	7	13	5	5	10	13	8

Примечание:  $\sigma_{сжр}$  – среднее значение предела прочности при одноосном сжатии, V – коэффициент вариации.

Усредненные значения пределов прочности при одноосном сжатии исследуемых горных пород, определенные при различных скоростях нагружения, представлены в табл. 1.

Если рассматривать интервал скоростей по ГОСТ 21153.2–84 от 1 до 5 МПа/с, то для уртитов он составит от 2 до 9 кН/с. Значение предела прочности при одноосном сжатии образцов в этом интервале скоростей в среднем равно 284 МПа. При скорости нагружения 0,01 кН/с прочность образцов в среднем составила 226 МПа, что на 58 МПа (26%) меньше прочности в рекомендуемом по ГОСТ 21153.2–84 интервале скорости нагружения. При скорости 30 кН/с прочность образцов уртита оказалась равна в среднем 297 МПа, что на 13 МПа (5%) больше значения прочности в рекомендуемом интервале.

Для образцов карбонатита определено, что в интервале рекомендуемой скорости нагружения по ГОСТ 21153.2–84 (1–5 МПа/с или 3–10 кН/с в рассматриваемом случае) прочность в среднем составила 67 МПа. При скорости нагружения 0,01 кН/с прочность карбонатита в среднем оказалась равна 61 МПа, что на 6 МПа (10%) меньше прочности в рекомендуемом по ГОСТ 21153.2–84 интервале. При скорости 30 кН/с прочность образцов составила в среднем 74 МПа, а при скорости 50 кН/с – 82 МПа, что на 7 МПа (11%) и 15 МПа (22%) соответственно больше значения прочности в рекомендуемом интервале.

Сравнивая полученные данные, можно отметить следующее. Значения пределов прочности при сжатии образцов карбонатита с возрастанием скорости нагружения увеличивались больше, чем значения этого параметра для образцов уртита. При низких же скоростях нагружения (0,01 кН/с) прочность уртита уменьшилась в сравнении с прочностью в рекомендуемом интервале – на 26%, тогда как для карбонатита такое снижение составило 10%.

В связи с этим можно сделать вывод, что для хрупких скальных горных пород при увеличении скорости нагружения относительно интервала, рекомендуемого по ГОСТ 21153.2–84, прочность при сжатии увеличивается в меньшей степени, чем для нехрупких упруго-пластичных пород. Возможно, это вызвано тем, что хрупкие упругие породы обладают малой способностью к деформациям и в меньшей степени упрочняются при сокращении времени их нагружения. Упруго-пластичные породы в этом случае могут в большей степени деформироваться и упрочняться, становясь ближе по своим свойствам к хрупким материалам.

При уменьшении скорости нагружения относительно интервала 1–5 МПа/с наблюдается обратное, прочность хрупких пород резко снижается в отличие от нехрупких упруго-пластичных. В этом случае последние деформируются под нагрузкой без значительных разрушений, образующиеся трещины смыкаются, возникает процесс пластического течения. Для хрупких пород в большей степени будет характерно динамическое образование микротрещин, их слияние в одну или несколько магистральных трещин, что в итоге приводит к снижению прочности образцов.

### Определение паспортной прочности скальных пород

Как было обозначено выше, среднее значение предела прочности при одноосном сжатии в интервале скорости нагружения от 1 до 5 МПа/с (паспортная прочность) для образцов уррита составляет 284 МПа, а для карбонатита – 67 МПа.

Следует отметить, что прочность уррита при скорости нагружения 3 кН/с (1,7 МПа/с) в среднем составила 276 МПа, а при скорости 7 кН/с (4 МПа/с) – 300 МПа. Для образцов карбонатита при скорости 3 кН/с (1 МПа/с) прочность в среднем составила 65 МПа, а при скорости 10 кН/с (3,4 МПа/с) – 78 МПа. Из чего можно сделать вывод, что даже при испытании образцов со скоростью нагружения 1 и 5 МПа/с предел прочности пород при сжатии будет отличаться.

Если рассматривать прочность пород как временную характеристику, то ее можно записать в виде зависимости:

$$\sigma_{сж} = pt, \quad (1)$$

где  $p$  – скорость нагружения образца, МПа/с;  $t$  – время нагружения образца до разрушения, с.

Используя зависимость (1) и функцию вида  $t = \varphi(p)$ , В.А. Фокин [20] предложил определять паспортное значение прочности горных пород. Для этого нужно прологарифмировать значения скорости нагружения образцов и установленные для них значения времени нагружения и представить их в виде зависимости (рис. 3).

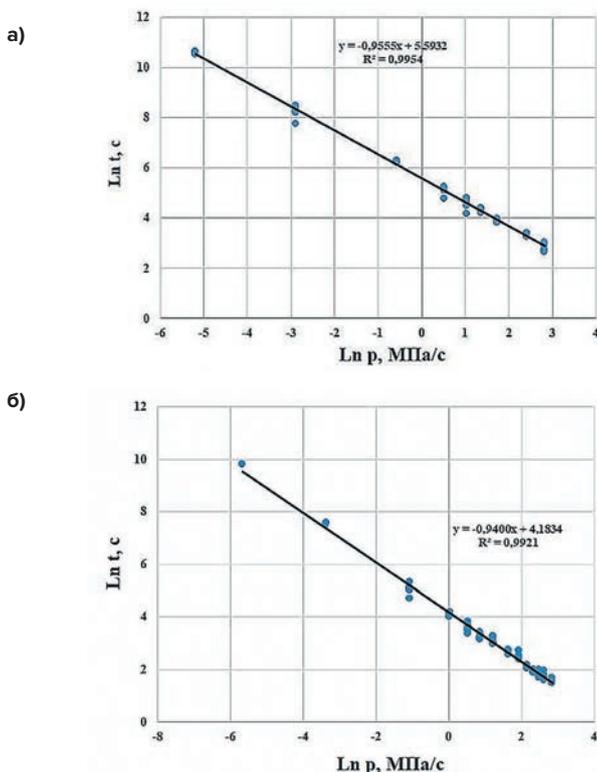


Рис. 3  
Зависимость скорости нагружения образцов от времени их нагружения:  
а – уррит; б – карбонатит

Fig. 3  
Dependence of samples loading rate on the loading time: a – urtite; b – carbonatite

Из рис. 3 следует, что взаимосвязь между временем и скоростью нагружения образцов может быть с высокой степенью достоверности аппроксимирована линейной

функцией вида:

$$\ln t = A - B \ln p, \quad (2)$$

где  $A$  – эмпирический коэффициент, равный для уррита 5,5932, а для карбонатита – 4,1834;  $B$  – эмпирический коэффициент, равный для уррита 0,9555, а для карбонатита – 0,9400.

На основании установленной зависимости (2) расчет паспортной прочности при сжатии образцов можно выполнять по следующей формуле [20]:

$$\sigma_{сж} = \exp(A) * p^{1-B}. \quad (3)$$

С учетом того что эмпирический коэффициент  $B$  близок к единице, формулу (3) можно представить в конечном виде как [20]:

$$\sigma_{сж} = \exp(A). \quad (4)$$

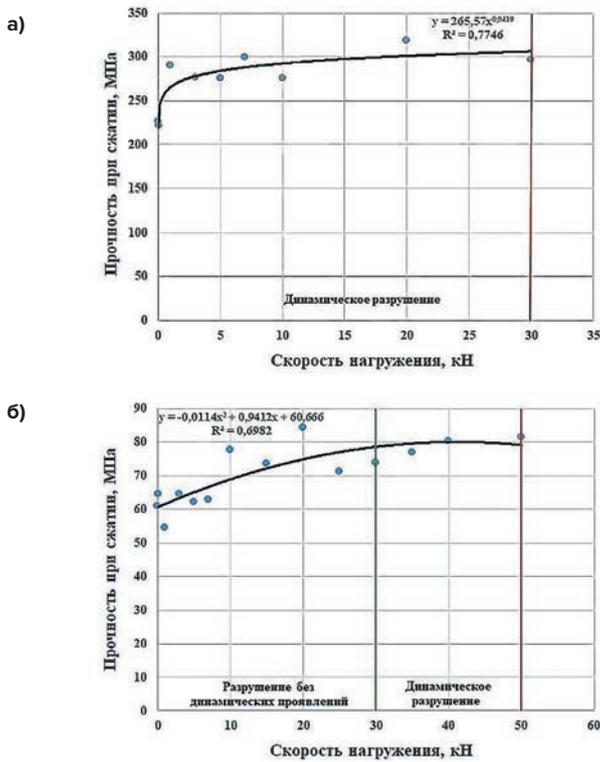
Подставляя установленные значения эмпирических коэффициентов в уравнение (4), получим, что паспортная прочность для уррита составит 269 МПа, а для карбонатита – 66 МПа. Полученные значения прочности близки к тем, что определены в интервале скорости нагружения от 1 до 5 МПа/с, а разница между ними не превышает 6%. Следовательно, предложенный В.А. Фокиным подход можно использовать для определения паспортной прочности пород при сжатии, когда установлены значения этого параметра при различных скоростях нагружения.

### Влияние скорости нагружения на характер разрушения скальных пород при одноосном сжатии

На рис. 2 рассмотрена зависимость между пределами прочности пород при одноосном сжатии и скоростью их нагружения. Она отражает общий характер увеличения прочности исследуемых скальных пород при возрастании скорости нагружения. Более детально эта зависимость представлена на рис. 4. В этом случае усредняли значения пределов прочности при сжатии образцов уррита и карбонатита. Также в ходе испытаний образцов при одноосном сжатии фиксировали их характер разрушения по видимым проявлениям. Полученные результаты отмечены на рис. 4 в виде линий, разделяющих графики на участки, где разрушения происходили в динамической форме и без динамики.

Из рис. 4, а следует, что зависимость между прочностью образцов уррита и скоростью их нагружения можно в некотором приближении представить в виде степенной функции. Она демонстрирует резкое увеличение прочности в интервале скорости от 0,01 до 1 кН/с. Разрушение всех образцов уррита при испытаниях в условиях одноосного сжатия происходило в динамической форме с разлетом осколков и взрывоподобным звуком. Качественно можно отметить, что разрушение образцов при скоростях нагружения больше 20 кН/с происходило более интенсивно, чем при меньших скоростях.

Зависимость между прочностью и скоростью нагружения для карбонатита можно приближенно представить в виде полинома второй степени (рис. 4, б). В этом случае нет резкого набора прочности у образцов, хотя и присутствует отклонение в большую сторону от линии тренда при скоростях 10 и 20 кН/с. Интересными являются данные о характере разрушения карбонатита. При скорости нагружения до 30 кН/с образцы этой породы разрушались без динамики в виде проседания под нагрузкой. Однако при скорости нагружения 30 кН/с и выше наблюдали динамическое образование магистральной трещины в



**Рис. 4**  
Характер разрушения образцов при одноосном сжатии в зависимости от скорости их нагружения: а – уртит; б – карбонатит

**Fig. 4**  
Failure behavior of samples under uniaxial compression depending on their loading rate: а – urtite; б – carbonatite

образцах с отчетливым звуком, но без разлета осколков. Таким образом, можно сделать следующий вывод. Для скальных горных пород, склонных к динамическому разрушению, увеличение скорости нагружения будет при-

водить к возрастанию интенсивности их разрушения. Для нехрупких упруго-пластичных пород увеличение скорости нагружения может привести к тому, что они начнут разрушаться в динамической форме.

**Выводы**

На основании проведенных экспериментальных исследований скальных горных пород месторождений Кольского региона в условиях одноосного сжатия определены значения их пределов прочности при различных скоростях нагружения.

Установлено, что прочность образцов уррита в рекомендуемом интервале скорости по ГОСТ 21153.2–84 от 1 до 5 МПа/с в среднем составила 284 МПа, а прочность образцов карбонатита – 67 МПа. Показано, что предел прочности при одноосном сжатии является показателем, зависящим от времени нагружения, а для определения паспортной прочности пород можно использовать подход В.А. Фокина.

Выявлено, что для хрупкой упругой породы (уртит) и нехрупкой упруго-пластичной (карбонатит) при увеличении скорости нагружения будут возрастать значения пределов прочности при сжатии. При этом прочность образцов уррита резко увеличивается в интервале от 0,01 до 1 кН/с, а затем постепенно возрастает с увеличением скорости нагружения. Для нехрупкой упруго-пластичной породы характерен постепенный набор прочности при возрастании скорости нагружения.

Установлено, что для скальных горных пород, склонных к разрушению в динамической форме, с увеличением скорости нагружения будет возрастать и интенсивность их разрушения. Увеличение скорости при нагружении упруго-пластичных скальных пород может привести к тому, что они начнут разрушаться в динамической форме.

Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования разрушения скальных горных пород с учетом фактора времени.

**Список литературы / References**

1. Wong R.H.C., Chau K.T., Wang P. Microcracking and grain size effect in Yuen Long marbles. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics*. 1996;33(5):479–485. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(96\)00007-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(96)00007-1)
2. Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. *Экспериментальная физика и механика горных пород*. СПб.: Наука; 2001. 343 с. Stavrogin A.N., Tarasov B.G. *Experimental physics and mechanics of rocks*. St. Petersburg, Nauka Publ., 2001, 343 p. (In Russ.)
3. Komurlu E. Loading rate conditions and specimen size effect on strength and deformability of rock materials under uniaxial compression. *International Journal of Geo-Engineering*. 2018;9:17. <https://doi.org/10.1186/s40703-018-0085-z>
4. Ma H., Song Y., Chen S., Li X., Feng F. Experimental study on effects of loading rate and sample size on the mechanical and failure characteristics of mudstone. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2020;38:2735–2744. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01182-8>
5. Мансуров В.А., Протосеня А.Г. *Поведение горных пород при различных скоростях нагружения*. Фрунзе: Илим; 1982. 88 с. Mansurov V.A., Protosenya A.G. *Behavior of rocks at different loading rates*. Frunze, Ilim Publ., 1982, 88 p. (In Russ.)
6. Петров В.А. *Статистическая кинетика разрушения гетерогенных твердых тел: дис. ... д-ра физ.-мат. наук*. 01.04.12. Ленинград; 1986. 333 с. Petrov V.A. *Statistical kinetics of fracture of heterogeneous solid bodies*, Dr. Sci. (Phys.-Math.) diss.: 01.04.12, Leningrad, 1986, 333 p. (In Russ.)
7. Краско Н.И. Исследование зависимости прочности пород на растяжение от времени их нагружения. *Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия «Горно-геологическая»*. 2002;(54):154–159. Режим доступа: <http://ea.donntu.ru:8080/bitstream/123456789/15346/1/154-159.pdf> (дата обращения: 13.01.2024). Krasko N.I. Investigation of the dependence of rock tensile strength on the time of its loading. *Nauchnye trudy Donetskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya "Gorno-geologicheskaya"*. 2002;(54):154–159. (In Russ.) Available at: <http://ea.donntu.ru:8080/bitstream/123456789/15346/1/154-159.pdf> (accessed: 13.01.2024).
8. Пак А.К., Кузнецов Н.Н. Исследование влияния скорости нагружения на прочностные свойства уррита среднезернистого массивного. В кн.: *Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: тезисы докладов 9-й Междунар. школы-семинара, Иркутск, 2–6 сент. 2013 г.* Иркутск: ИЗК СО РАН; 2013. С. 62. Pak A.K., Kuznetsov N.N. Investigation into the impact of loading rate on the strength properties of medium-grained massive urtite. In: *Physical basis of rock fracture prediction: Proceedings of the 9th International Workshop, Irkutsk, September 2-6, 2013, Irkutsk, Russia, 2013 г.* Irkutsk IZK SB RAS Publ.; 2013, pp. 62. (In Russ.)

9. Wasantha P.L.P., Ranjith P.G., Zhao J., Shao S.S., Permata G. Strain rate effect on the mechanical behaviour of sandstones with different grain sizes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2014;48:1883–1895. <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0688-4>
10. Ефимов В.П. Влияние скорости нагружения на трещиностойкость горных пород с позиций кинетической термофлуктуационной концепции разрушения. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2016;(2):57–63. Efimov V.P. Effect of loading rate on fracture toughness within the kinetic concept of thermal fluctuation mechanism of rock failure. *Journal of Mining Science*. 2016;52(2):274–278. <https://doi.org/10.1134/S1062739116020406>
11. Efimov V.P. Experimental study on loading rate effects on the tensile strength and fracture toughness of rocks. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2020;38:6923–6930. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01470-8>
12. Zhu J., Deng J. A new explanation of loading rate effect on rock compressive strength. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;1124:012066. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1124/1/012066>
13. Кузнецова А.В., Смолин И.Ю. Численное моделирование механического поведения горных пород вокруг выработки при разных скоростях подвигания забоя. *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2010;(2):79–87. Режим доступа: [https://journals.tsu.ru/mathematics/en/&journal\\_page=archive&id=475&article\\_id=16252](https://journals.tsu.ru/mathematics/en/&journal_page=archive&id=475&article_id=16252) (дата обращения: 13.01.2024).  
Kuznetsova A.V., Smolin I.Yu. Numerical simulation for mechanical behaviour of rocks around a mine working at different place advance rates. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2010;(2):79–87. (In Russ.) Available at: [https://journals.tsu.ru/mathematics/en/&journal\\_page=archive&id=475&article\\_id=16252](https://journals.tsu.ru/mathematics/en/&journal_page=archive&id=475&article_id=16252) (accessed: 13.01.2024).
14. Kozyrev A.A., Lodus E.V., Kuznetsov N.N. The study of rock properties of the Khibiny massif on shear and uniaxial compression. In: *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on In-Situ Rock Stress, ISRM Specialized Conference, Sendai, 20–22 August 2013*. 2013, pp. 939–952.
15. Jiao M.R., Wong R., Wong T., Chau K.T., Tang C.A. Numerical simulation of the influence of grain size on the progressive development of brittle failure in Yuen Long marbles. *Key Engineering Materials*. 2004;261-263:1511–1516. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.261-263.1511>
16. Liang C., Wu S., Li X., Xin P. Effects of strain rate on fracture characteristics and mesoscopic failure mechanisms of granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015;76:146–154. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2015.03.010>
17. Yin X.G.X., Li C., Wang S. Influences of loading rates on mechanical behaviors of rock materials. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2010;29:2610–2615.
18. Zhou L., Zhu Z., Qiu H., Zhang X., Lang L. Study of the effect of loading rates on crack propagation velocity and rock fracture toughness using cracked tunnel specimens. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018;112:25–34. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2018.10.011>
19. Козырев А.А., Кузнецов Н.Н., Федотова Ю.В., Шоков А.Н. Определение степени удароопасности скальных горных пород по результатам испытаний при одноосном сжатии. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2019;(6):41–50. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-6-41-50>  
Kozyrev A.A.1, Kuznetsov N.N., Fedotova Iu.V., Shokov A.N. The determination of rockburst hazard degree of hard rocks by the test results under uniaxial compression. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2019;(6):41–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-6-41-50>
20. Фокин В.А. К вопросу определения предела прочности пород на одноосное сжатие. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2002;(4):20–22.  
Fokin V.A. Determination of uniaxial compressive strength of rocks. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2002;(4):20–22. (In Russ.)

**Информация об авторах**

**Козырев Анатолий Александрович** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела геомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

**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

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 23.11.2023

Поступила после рецензирования: 10.01.2024

Принята к публикации: 15.01.2024

**Information about the authors**

**Anatolii A. Kozyrev** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Scientist of Department of Geomechanics, Mining Institute, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

**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: 23.11.2023

Revised: 10.01.2024

Accepted: 15.01.2024