ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

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



Научная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Исследование строения порового пространства зерен щебня из гранита и габбродолерита различной крупности

Е.Е.Каменева[1]✉, **В.С.Никифорова**[2]
[1] *Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия*
[2] *Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*

Как цитировать эту статью: Каменева Е.Е., Никифорова В.С. Исследование строения порового пространства зерен щебня из гранита и габбродолерита различной крупности // Записки Горного института. 2025. Т. 271. № 16276. С. 74-83. EDN UIKLCW

Аннотация
Приведены результаты исследования строения порового пространства различных по крупности зерен щебня, полученного в результате стадиальной дезинтеграции габбродолерита и микроклинового гранита – пород, различающихся по текстуре, структуре и минеральному составу. Исследования, проведенные с применением метода рентгеновской компьютерной микротомографии, показали, что при дезинтеграции происходит изменение строения порового пространства пород. Увеличение общей пористости и концентрации пор в зернах щебня связано с появлением новообразованных пор различных размеров и сферичности. Однозначная зависимость пористости зерен щебня от их крупности отсутствует. Это связано с текстурно-структурными особенностями и минеральным составом исходных горных пород. Влияние масштабного фактора проявляется только для габбродолерита, характеризующегося мелкозернистой структурой, массивной текстурой и стабильным минеральным составом. Мелкие зерна габбродолерита имеют более низкую концентрацию пор по сравнению с крупными, что согласуется со статистической теорией прочности горных пород, согласно которой вероятность дефектов (пор и микротрещин) снижается по мере уменьшения размеров образцов – чем меньше размер зерен, тем выше их прочность. Для неравномернозернистых гранитов порфировидной текстуры тенденция обратная – мелкие зерна являются более пористыми. Исследование пористости отдельных породообразующих минералов гранита показало, что в зернах щебня из гранита поры распределены неравномерно. Наиболее высокая концентрация пор характерна для микроклина. Присутствие в зернах гранитного щебня хрупких и пористых выделений микроклина приводит к появлению новообразованных пор и микротрещин, число которых увеличивается при многократном приложении нагрузки при стадиальной дезинтеграции.

Ключевые слова
гранит; габбродолерит; масштабный фактор; строение порового пространства; рентгеновская компьютерная микротомография

Поступила: 04.07.2023 ***Принята: 02.05.2024*** ***Онлайн: 02.10.2024*** ***Опубликована: 25.02.2025***

Введение

Физико-механические свойства горной породы определяются ее минеральным составом, текстурой и особенностями порового пространства – размерами, формой и пространственной ориентацией пор. Практически во всех работах по исследованию деформации и разрушения горных пород содержатся данные, свидетельствующие о том, что при действии нагрузки в объеме породы создается деформационное поле, приводящее к изменению структуры их порового пространства – размеров, формы и количества дефектов – микротрещин и пор [1-3]. Применительно к задаче дезинтеграции строительных горных пород эти сведения являются основополагающими. Это объясняется тем, что если при дроблении и измельчении рудных материалов для эффективного последующего обогащения важно максимально раскрыть (разупрочнить) минеральные агрегаты, то при дезинтеграции строительных горных пород для получения щебня необходимо сохранить их прочность.

Говоря о прочности щебня, отметим масштабный фактор – размер его зерен. Согласно статистической теории прочности, чем больше объем образца породы, тем больше в нем дефектов и, следовательно, ниже его прочность. В то же время статистическая природа прочности и количество дефектов не является единственной причиной проявления масштабного фактора. В работе

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 271. С. 74-83
© Е.Е.Каменева, В.С.Никифорова, 2025

А.Ф.Иоффе с соавторами [4] установлено, что масштабный эффект проявляется при деформировании материалов, склонных к хрупкому разрушению, и менее выражен для вязких материалов. В современных работах по изучению влияния размера образцов на прочностные свойства горных пород показано, что зависимость прочности от размера образцов неоднозначна. Необходимо учитывать неоднородность минерального состава породы, особенности строения порового пространства, а также предысторию образцов [5-7]. Последнее имеет весьма важное значение при интерпретации прочности щебня, который подвергался буровзрывным работам и стадиальному дроблению.

О непостоянстве прочности фракций щебня различной крупности свидетельствуют многочисленные результаты испытаний промышленно выпускаемого щебня на дробильно-сортировочных заводах Карелии. В одних случаях более прочными оказываются мелкие фракции, в других наблюдается обратная зависимость. Поэтому в настоящей работе мы поставили узкую задачу – изучить влияние масштабного фактора – размера зерен щебня – на его прочность. В значительной мере колебания прочности различных по крупности фракций щебня, полученных на одном и том же предприятии, можно объяснить различной степенью лещадности зерен щебня – при высоком содержании зерен пластинчатой и игольчатой формы прочность щебня снижается [8, 9]. Но увеличение содержания лещадных зерен в щебне не единственная причина снижения его прочности. Исследованиями [10, 11] установлено, что в зернах щебня появляются новообразованные (вторичные) микротрещины и поры, априорно снижающие его прочностные характеристики. При этом объем пустот практически не зависит от крупности щебня [10]. В работе [11] отмечено снижение прочности щебня по мере уменьшения размера его зерен, что авторы объясняют ростом количества микроповреждений за счет дополнительных нагрузок на мелкие фракции при стадиальном дроблении. Эти выводы сделаны авторами на основе микроскопического анализа шлифов [10], а в работе [11] – путем определения величины водопоглощения щебня, косвенно связанного с его пористостью и прочностью. Информативной характеристикой, связывающей прочность породы с дефектностью ее строения, является пористость, под которой понимается совокупность всех полостей, заключенных в породе, включая поры, поровые каналы и микротрещины [12-14]. Физическая или общая пористость породы, определяемая расчетным путем по известным величинам минеральной и объемной плотностей, позволяет лишь косвенно судить о трансформации микроструктуры горных пород при их разрушении. Для получения объективных данных необходимо учитывать особенности строения порового пространства – размеры, форму пор и их пространственную ориентацию [15-17].

Целью настоящей работы является исследование строения порового пространства различных по крупности зерен щебня, полученного в результате стадиальной дезинтеграции пород, различающихся по текстуре, структуре и минеральному составу.

Методы исследований

Для изучения и описания структур и текстур, а также различных морфометрических характеристик пород используются в основном методы минералого-петрографического анализа. Описание шлифов позволяет дать только качественное описание пород и имеет ограничения в получении количественных и объемных структурно-текстурных характеристик пород, что влияет на качество интерпретации результатов исследований. Появление новых неразрушающих методов исследования вещества позволяет расширить представления о структурно-текстурных характеристиках пород и дополнить традиционные оптико-петрографические исследования количественными данными о дефектах структуры.

Для получения достоверной картины трехмерного распределения дефектов, их размеров, формы и пространственной ориентации используется рентгеновская компьютерная микротомография (X-ray micro-CT), нейтронная компьютерная томография, контактная лазерная ультразвуковая структуроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, акустическая спектроскопия [18-20]. Метод исследования должен обеспечить получение данных, характеризующих структуру порового пространства горных пород – общую пористость, концентрацию, размеры и геометрическую форму пор и микротрещин, а также обеспечить визуализацию микроструктуры исследуемых образцов с целью выявления возможной неоднородности распределения пор [21-23]. Кроме того, чувствительность метода должна быть соизмерима с размерами структурных объектов (пор, зерен минералов). Этим условиям наиболее полно отвечает метод рентгеновской компьютерной микротомографии (X-ray micro-CT) [24-26].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Рентгеновская компьютерная микротомография является неразрушающим методом изучения внутреннего строения твердых материалов, основанным на зависимости линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения от химического состава и плотности вещества. Компьютерная обработка набора теневых проекций, получаемых при просвечивании образцов рентгеновским лучом, позволяет визуализировать внутреннюю трехмерную структуру образца и выполнить детальный анализ морфометрических и плотностных характеристик как на отдельных сечениях, так и по всему объему исследуемого образца. Перспективность метода при решении практических задач дезинтеграции горных пород заключается в возможности получения количественных характеристик структуры порового пространства [27-29].

Метод успешно применяется для оценки изменения структуры пустотного пространства при дезинтеграции руд в дробильных аппаратах [30], исследовании процессов деформирования и разрушения горных пород [31, 32]. Несмотря на существенный научный задел, ряд вопросов, касающихся изменения прочности пород в процессе дезинтеграции, остается нерешенным. Практически все исследования в этом направлении выполнены на образцах правильной формы в условиях статической или динамической нагрузки [33-35]. Продукты, образованные при разрушении образцов, как правило, авторами не исследуются.

Для микротомографических исследований отобраны образцы зерен щебня из микроклинового гранита месторождения Кирьявалахти и габбродолерита месторождения Чевжавара (республика Карелия), выделенные из проб щебня фракций 5-20 и 20-40 мм, полученных в промышленных условиях на дробильно-сортировочных заводах. Щебень фракции 20-40 мм выделен после второй стадии дробления, фракции 5-20 мм – после третьей. Для получения сравнительных данных, характеризующих структуру порового пространства зерен щебня и исходных горных пород, отобраны штуфы, из которых изготовлены образцы в виде кубиков с размером ребра 4,0 см. На аналогичных образцах-кубиках по стандартной методике определен предел прочности при сжатии. Значение этого показателя, вычисленное как среднее по пяти испытанным образцам, соответствовало 121 (гранит) и 192 мПа (габбродолерит).

Структура исследуемых образцов микроклинового гранита (рис.1, *а*) неравномернозернистая, текстура порфировидная. Основные породообразующие минералы – микроклин, плагиоклаз и кварц. Содержание, %: микроклина – 35-47, плагиоклаза – 25-35, кварца – 20-26. Второстепенные минералы – биотит 1-5 % и акцессорные минералы (апатит, титанит) до 1 %. Согласно петрографическому описанию шлифов, размеры зерен микроклина – 1,0-5,0 мм, плагиоклаза – 1,0-2,0 мм. Кварц выделяется в виде ксеноморфных зерен размером до 1 мм, биотит – рассеянных мелких лейст размером 0,1-0,3 мм в срастании с титанитом. Апатит образует единичные округлые зерна размером до 0,1 мм.

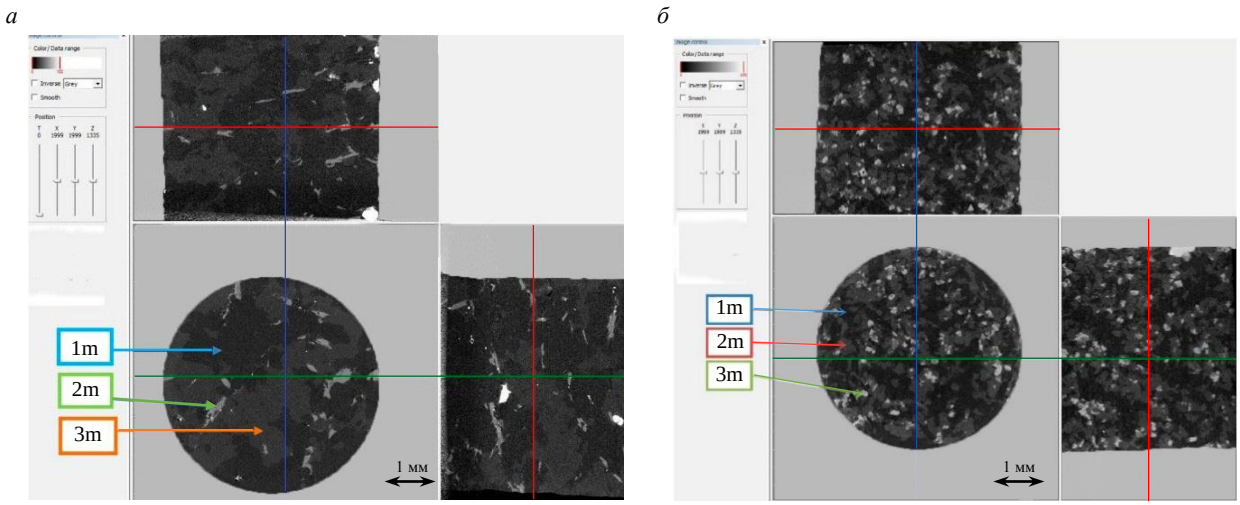


Рис.1. Микротомографические срезы образца гранита (*а*) и габбродолерта (*б*)
по трем взаимноперпендикулярным плоскостям:
а – 1m – микроклин, 2m – плагиоклаз + кварц, 3m – биотит;
б – 1m – плагиоклаз + кварц, 2m – пироксен, 3m – титанит

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 271. С. 74-83
© Е.Е.Каменева, В.С.Никифорова, 2025

Структура образцов габбродолерита (рис.1, *б*) мелкозернистая, текстура массивная. Основные породообразующие минералы – плагиоклаз – 45-50 % и пироксен – 47-51 %. Содержание кварца – 2-4 %, биотита до 1 %, рудных минералов (титанит) до 1 %. Пироксен выделяется в виде призматических зерен размером 0,1-0,8 мм, плагиоклаз образует удлиненные кристаллы размером 0,1-1,0 мм.

Основные физико-механические свойства проб щебня определены по стандартным методикам, предусмотренным ГОСТ 8269.0-97 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Методы физико-механических испытаний» (табл.1). С целью исключения влияния формы зерен на прочность (дробимость) щебня для испытаний были отобраны только изометричные (кубовидные) зерна.

Таблица 1

Физико-механические свойства щебня

Стадия дробления	Размер фракции, мм	Дробимость (прочность)		Объемная плотность, г/см^3	Пористость, %
		Потеря массы после испытания, %	Марка щебня по дробимости		
Щебень из гранита					
II	От 20 до 40	12,6	1200	2,68	2,2
III	От 5 до 20	16,2	1000	2,60	2,8
Щебень из габбродолерита					
II	От 20 до 40	5,4	1400	2,96	0,68
III	От 5 до 20	4,8	1400	2,98	0,60

Исследования микроструктуры зерен щебня проводились на микротомографе SkyScan1173 (Бельгия) с разрешениями от 0,5 до 15 мкм. Режим сканирования – ток 130 мА, напряжение 61 кВ, мощность рентгеновского излучения 90 Вт. Сканирование производилось с медным фильтром толщиной 0,1 мм и с усреднением трех снимков. Размер пикселя при максимальном увеличении (штатном разрешении) составлял 0,5 мкм, что позволяет идентифицировать поры размером от 5 мкм и более. Столик с образцом поворачивался на 360° с шагом 0,2°. Количество теневых снимков составляло 2000-2100. Последующая реконструкция выполнялась при помощи программ NRecon, CTAn и CTVol. Для ускорения процесса обработки изображений произведена бинаризация, которая позволяет более детально изучить внутреннее пустотное пространство исследуемых образцов [36-38]. В ходе исследований определялись параметры порового пространства – общая пористость (объем пор в объеме образца), концентрация пор (количество пор на единицу объема образца) (табл.2).

Таблица 2

Морфометрические параметры исходных образцов и зерен щебня из гранита и габбродолерита по результатам микротомографических исследований

Номер образца	Гранит			Габбродолерит		
	Объем образца, мм^3	Пористость, %	Концентрация пор, мм$^{-3}$	Объем зерна, мм^3	Пористость, %	Концентрация пор, мм$^{-3}$
Образцы исходных горных пород						
1	64312	0,66	0,22	64462	0,37	0,20
2	64163	0,58	0,21	64753	0,38	0,20
3	63954	0,54	0,19	63556	0,38	0,21
4	64065	0,71	0,20	64003	0,37	0,20
5	64052	0,75	0,21	63652	0,35	0,20
Среднее	64109	0,65	0,21	64085	0,37	0,20
Зерна щебня из фракции 20-40 мм						
1	61479	2,05	0,59	63314	0,60	0,26
2	51733	1,98	0,36	41226	0,59	0,24
3	61669	2,21	0,83	43658	0,62	0,26

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Окончание табл.2

Номер образца	Гранит			Габбродолерит		
	Объем образца, мм^3	Пористость, %	Концентрация пор, мм$^{-3}$	Объем зерна, мм^3	Пористость, %	Концентрация пор, мм$^{-3}$
4	42281	2,42	0,93	51254	0,62	0,28
5	54908	1,85	0,56	31006	0,60	0,28
Среднее	54414	**2,10**	**0,65**		**0,60**	**0,26**
Зерна щебня из фракции 5-20 мм						
1	3453	3,30	2,31	3168	0,50	0,27
2	4379	2,45	1,12	3212	0,57	0,21
3	3848	2,31	1,95	4203	0,52	0,24
4	3953	3,20	2,08	4185	0,55	0,26
5	4162	2,40	2,08	3247	0,53	0,24
Среднее	3959	**2,73**	**1,74**	–	**0,53**	**0,24**

Примечание. Разрешение сканирования 0,5 мкм.

Обсуждение результатов

Анализ полученных данных показывает, что пористость исходных образцов, которые не подвергались механическим нагрузкам при буровзрывных работах и дезинтеграции в дробильных аппаратах, ниже, чем у зерен щебня. Это подтверждается выводами, сделанными в работах [10, 11]. Увеличение пористости зерен щебня сопровождается появлением новообразованных дефектов (пор и микротрещин), о чем свидетельствует рост их концентрации в объеме исследованных зерен. Такая закономерность проявляется наиболее сильно для гранита – пористость увеличивается в среднем в 3,2-4,2 раза (от 0,64 до 2,1-2,73 %), концентрация пор в 3,1-8,3 раза (от 0,21 до 0,65-1,74 мм$^{-3}$) и менее заметна для габбродолерита – пористость увеличивается в среднем в 1,5 раза, концентрация пор – в 1,25 раза.

Однозначная зависимость пористости от крупности зерен отсутствует. Если у крупных зерен гранита, выделенных из фракции 20-40 мм, среднее значение пористости составляет 2,1 %, то у мелких (из фракции 5-20 мм) этот показатель выше – 2,73 %. У зерен габбродолерита, наоборот, более пористыми являются крупные зерна, однако разница в значениях пористости менее значительна – 0,53 и 0,6 % соответственно (табл.2). Увеличение пористости мелких зерен гранита связано с ростом концентрации пор (среднее значение 1,74 мм$^{-3}$ по сравнению с 0,65 мм$^{-3}$ у крупных). Концентрация пор в зернах щебня из габбродолерита имеет близкие значения у крупных и мелких зерен – 0,26 мм$^{-3}$ и 0,24 мм$^{-3}$.

В структуре всех исследованных зерен щебня в количественном отношении преобладают поры мелкокапиллярных размеров – до 40 мкм (рис.1, *б*). Сферичность (соотношение длин наименьшей и наибольшей оси) у этих пор высокая – 0,8-0,9. В мелких зернах гранита наибольший размер пор составляет 120 мкм, габбродолерита – 60 мкм. В крупных зернах присутствуют полости сверхкапиллярного размера – до 240 мкм у гранита и не более 160 мкм у габбродолерита (рис.2), их

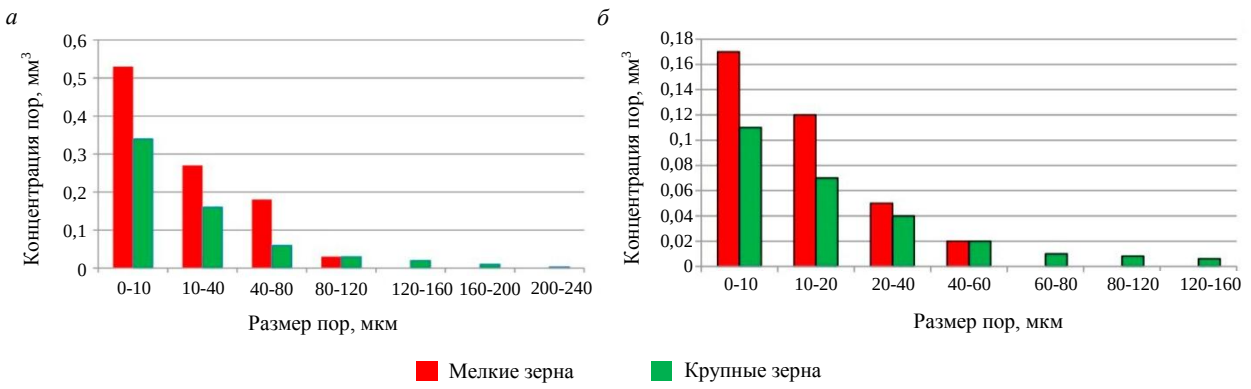


Рис.2. Распределение пор по размеру в зернах гранита (*а*) и габбродолерита (*б*) (усредненные значения)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 271. С. 74-83
© Е.Е.Каменева, В.С.Никифорова, 2025

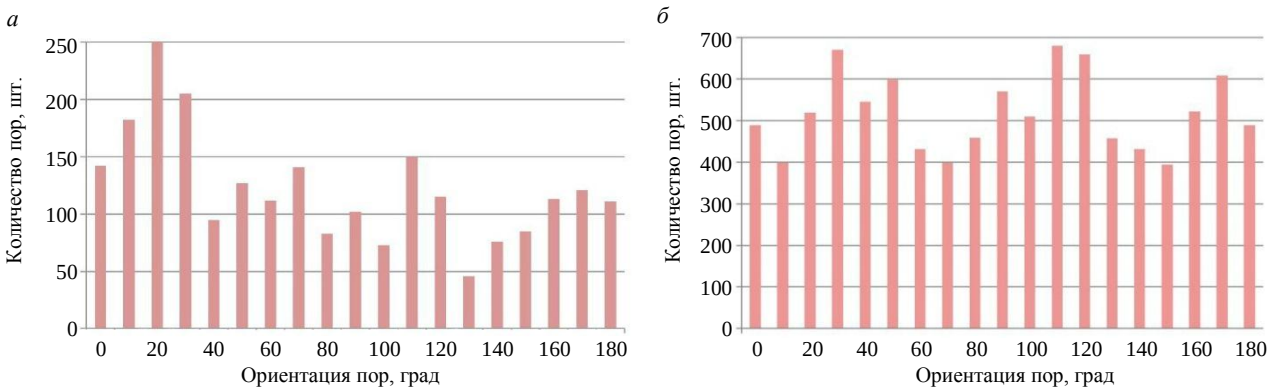


Рис.3. Распределение пор по ориентации самой длинной оси:
зерна 4 из фракции 5-20 мм из габбродолерита (*а*), гранита (*б*)

количество не более 1-3 шт. на зерно. Сферичность этих пор низкая – 0,1-0,3. Ориентация пор в каком-либо направлении отсутствует (рис.3). Эта особенность характерна для всех исследованных образцов. Следует отметить, что если значение пористости достаточно стабильно для отдельных зерен щебня из габбродолерита – 0,59-0,62 % у крупных и 0,5-0,57 у мелких, то зерна гранита неоднородны. Их пористость колеблется 1,85-2,42 и 2,31-3,3 % соответственно (табл.2).

Развитие микроповреждений в горных породах зависит от прочностных свойств отдельных породообразующих минералов [39, 40]. Учитывая, что некоторые разновидности гранитов характеризуются широкими вариациями размеров, формы и содержания пор, неравномерно распределенных в ее объеме [41-43], принципиальное значение имеет исследование особенностей строения порового пространства минералов, входящих в ее состав. Микротомография показала, что поры в структуре исследуемых зерен щебня из гранита распределены неравномерно. Наиболее высокая концентрация пор характерна для крупных зерен микроклина – их пористость в 1,5-2 раза превышает общую пористость зерен в целом. Поры в микроклине распределены хаотично и имеют размеры до 40 мкм. Пористость агрегатов плагиоклаза и кварца существенно ниже. Широкие вариации содержания микроклина от 35,34 до 47,22 % объясняют нестабильность пористости исследованных зерен гранита (табл.3).

Таблица 3

Характеристики основных породообразующих минералов в исходных образцах и зернах щебня из гранита, %

Номер зерна	Микроклин		Плагиоклаз + кварц	
	Содержание	Пористость	Содержание	Пористость
Исходные образцы гранита				
Среднее	39,82	1,2	55,31	0,3
Зерна щебня из фракции 20-40 мм				
1	35,34	4,1	63,00	0,90
2	40,34	3,9	57,68	0,63
3	42,34	4,1	55,91	0,78
4	47,22	3,3	50,38	0,66
5	35,50	3,8	61,71	0,73
Среднее	**40,15**	**3,8**	**57,73**	**0,74**
Зерна щебня из фракции 5-20 мм				
1	39,69	4,31	58,61	0,93
2	47,09	4,12	50,71	0,90
3	39,65	4,25	55,95	0,94
4	46,96	6,41	50,54	0,95
5	35,29	4,48	60,89	0,96
Среднее	**41,74**	**4,71**	**55,34**	**0,94**

Примечание. Объемное содержание минералов и их пористость определены методом рентгеновской компьютерной микротомографии.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

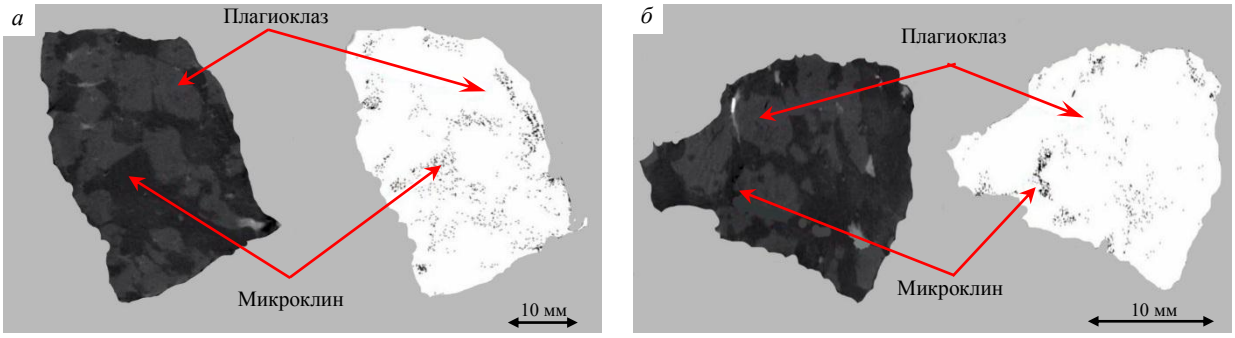


Рис.4. Единичные сечения зерен щебня из гранита, полученные в результате микротомографического сканирования зерен из фракции 20-40 мм (*а*), 5-20 мм (*б*)

Сравнение томографических срезов зерен щебня из гранита различной крупности (рис.4) показывает, что пористость выделений микроклина в крупных зернах выше, чем в мелких. В крупных зернах гранита пористость микроклина составляет в среднем 3,8 %, в мелких зернах этот показатель выше – 4,71 %. Пористость плагиоклаза и кварца в мелких зернах также выше – 0,74 и 0,94 % соответственно (табл.3). На рис.4 представлена визуализация сечений изучаемых образцов, на рис.5 – микротомографические срезы после проведения бинаризации для более контрастной детализации зерен. Логично предположить, что увеличение пористости мелких гранитных зерен связано с дополнительными механическими нагрузками на мелкие фракции щебня, полученные в третьей стадии дробления. Прочность образца определяется степенью прочности самого слабого его участка [44]. Разрушение начинается на наиболее хрупких участках. В зернах щебня из гранита такими участками являются выделения микроклина. Необратимые пластические деформации приводят к появлению новообразованных дефектов, число которых увеличивается при многократном приложении нагрузки.

Исследуемые образцы гранитного щебня содержат кварц в количестве 20-26 %. В работе [45] отмечено, что присутствие кварца в составе пород оказывает значительное влияние на появление микротрещин. При воздействии механических нагрузок хрупкие и упругие кристаллы кварца растрескиваются с образованием внутризерновых микротрещин [46, 47].

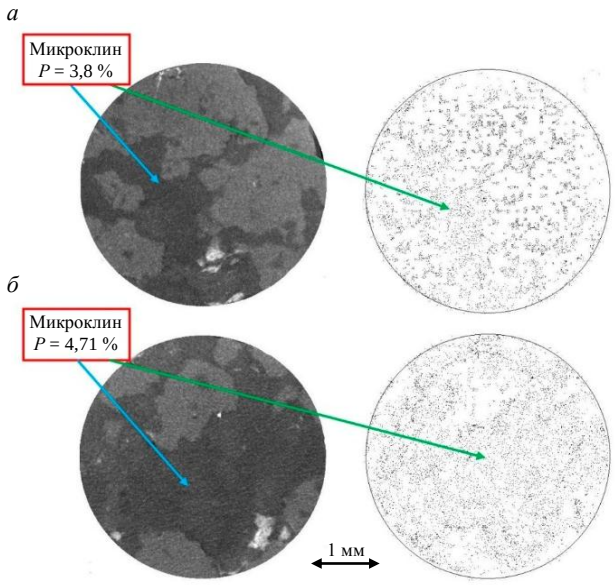


Рис.5. Единичные сечения зерен щебня из гранита, полученные в результате микротомографического сканирования после бинаризации зерен из фракции 20-40 мм (*а*), 5-20 мм (*б*)

Исследуемые образцы щебня из габбродолерита однородны по минеральному составу. Содержание пироксена – 46,7-50,0 %, плагиоклаза и кварца – 47,3-50,2 %. Поры достаточно равномерно распределены в агрегатах основных породообразующих минералов – пироксена и плагиоклаза с незначительным преобладанием в плагиоклазе. В мелких зернах отмечается незначительное снижение пористости плагиоклаза с 0,62 до 0,69 % в крупных. Пористость пироксена имеет практически равные значения для мелких и крупных зерен – 0,46 и 0,44 % (табл.4). Снижение общей пористости зерен габбродолерита при уменьшении размеров зерен согласуется со статистической теорией прочности горных пород, согласно которой вероятность дефектов снижается по мере уменьшения размеров образцов – чем меньше размер зерен, тем выше их прочность.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 4

Характеристики основных породообразующих минералов в исходных образцах и зернах щебня из габбродолерита, %

Номер зерна	Плагиоклаз + кварц		Пироксен	
	Содержание	Пористость	Содержание	Пористость
Исходные образцы габбродолерита				
Среднее	50,6	0,44	46,1	0,2
Зерна из фракции 20-40 мм				
1	50,2	0,64	46,7	0,56
2	47,9	0,68	48,3	0,30
3	49,0	0,70	47,1	0,53
4	49,4	0,81	48,8	0,43
5	46,8	0,63	48,3	0,57
Среднее	**48,1**	**0,69**	**48,2**	**0,44**
Зерна из фракции 5-20 мм				
1	49,1	0,68	46,9	0,45
2	48,6	0,56	49,1	0,58
3	48,1	0,65	48,4	0,40
4	49,7	0,63	47,5	0,39
5	47,3	0,58	50,0	0,48
Среднее	**49,0**	**0,62**	**48,2**	**0,46**

Примечание. Объемное содержание минералов и их общая пористость определены методом рентгеновской компьютерной микротомографии. Разрешение сканирования 0,5 мкм.

Заключение

Таким образом, при дезинтеграции происходит изменение строения порового пространства породы. Общая пористость зерен щебня увеличивается за счет появления новообразованных пор. Эта закономерность проявляется наиболее сильно для гранита и менее заметна для габбродолерита.

Крупные и мелкие зерна щебня различаются по значениям общей пористости, размерам пор и их концентрации. Однозначная зависимость пористости зерен щебня от их крупности отсутствует, что связано с текстурно-структурными особенностями и минеральным составом исходных горных пород.

Зерна щебня из гранита неоднородны по минеральному составу, вследствие чего поры распределены неравномерно. Присутствие в зернах гранитного щебня хрупких и пористых выделений микроклина приводит к появлению новообразованных пор и микротрещин, число которых увеличивается при многократном приложении нагрузки. Поэтому крупные зерна щебня, выделенные из фракции 20-40 мм после второй стадии дробления, характеризуются более низкими значениями пористости и концентрации пор по сравнению с мелкими зернами, выделенными из фракции 5-20 мм после дробления третьей стадии.

Влияние масштабного фактора проявляется только для габбродолерита, характеризующегося мелкозернистой структурой и массивной текстурой – при уменьшении размера зерен щебня происходит снижение размеров пор и общей пористости.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Викторов С.Д., Кочанов А.Н.* Некоторые аспекты разрушения горных пород с позиций физики прочности и механики трещин // Актуальные проблемы прочности: Материалы 60-й Международной конференции, 14-18 мая 2018, Витебск, Беларусь. Витебск: Витебский государственный технологический университет, 2018. С. 340-342.

2. *Quansheng Liu, Qi Liu, Yucong Pan et al.* Microcracking Mechanism Analysis of Rock Failure in Diametral Compression Tests // Journal of Materials in Civil Engineering. 2018. Vol. 30. Iss. 6. № 04018082-1. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002251

3. *Wen-Ling Tian, Sheng-Qi Yang, Li-Xiang Xie, Zhi-Liang Wang.* Cracking behavior of three types granite with different grain size containing two non-coplanar fissures under uniaxial compression // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2018. Vol. 18. Iss. 4. P. 1580-1596. DOI: 10.1016/j.acme.2018.06.001

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

4. *Иоффе А.Ф., Кирпичева М.В., Левитская А.И.* Деформация и прочность кристаллов // Журнал русского физико-химического общества. 1924. Т. 56. № 5-6. С. 489-504.

5. *Усольцева О.М., Цой П.А., Семенов Н.В.* Влияние размера образцов на деформационно-прочностные свойства горных пород // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2020. Т. 7. № 2. С. 53-59. DOI: 10.15372/FPVGN2020070209

6. *Зайцев Д.В., Кочанов А.Н., Пантелеев И.А., Панфилов П.Е.* О влиянии масштабного фактора при испытаниях на прочность образцов горных пород // Известия РАН. Серия физическая. 2017. Т. 81. № 3. С. 366-369. DOI: 10.7868/S0367676517030401

7. *Латышев О.Г., Прищепа Д.В.* Учет масштабного эффекта при проектировании параметров горной технологии // Известия Уральского государственного горного университета. 2017. Вып. 1 (45). С. 59-61. DOI: 10.21440/2307-2091-348 2017-1-59-61

8. *Вайсберг Л.А., Каменева Е.Е., Аминов В.Н.* Оценка технологических возможностей управления качеством щебня при дезинтеграции строительных горных пород // Строительные материалы. 2013. № 11. С. 30-34.

9. *Колотушкин Д.М., Алгебраистова Н.К.* Исследование свойств нерудных материалов и их влияние на качество конечной товарной продукции // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 6. С. 226-233.

10. *Буртан С.Т., Мустафин С.К.* Состав и свойства минерального остова в связи с проблемой управления качеством асфальтобетона // Дорожная держава. 2010. № 10. С. 20-27.

11. *Мясникова О.В., Шеков В.А.* Влияние природной и техногенной микротрещиноватости на прочность горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 8. С. 321-326.

12. *Staněk M., Géraud Y.* Granite microporosity changes due to fracturing and alteration: secondary mineral phases as proxies for porosity and permeability estimation // Solid Earth. 2019. Vol. 10. Iss. 1. P. 251-274. DOI: 10.5194/se-10-251-2019

13. *Бригаднов И.А.* Прямые методы решения вариационной задачи для многокритериальной оценки несущей способности геоматериалов // Записки Горного института. 2018. Т. 232. С. 368-374. DOI: 10.31897/PMI.2018.4.368

14. *Господариков А.П., Трофимов А.В., Киркин А.П.* Оценка деформационных характеристик хрупких горных пород за пределом прочности в режиме одноосного сервогидравлического нагружения // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 539-548. DOI: 10.31897/PMI.2022.87

15. *Жуков В.С., Кузьмин Ю.О., Тихоцкий С.А. и др.* Изменение трещинной пористости при подготовке разрушения горных пород // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле: Материалы 22-й Международной конференции, 27-29 сентября 2021, Москва, Россия. М.: Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, 2021. С. 106-109.

16. *Rui Song, Lifu Zheng, Yao Wang, Jianjun Liu.* Effects of Pore Structure on Sandstone Mechanical Properties Based on Micro-CT Reconstruction Model // Advances in Civil Engineering. 2020. Vol. 2020. Iss. 1. № 9085045. DOI: 10.1155/2020/9085045

17. *Cheng Z.L., Sui W.B., Ning Z.F.* Microstructure characteristics and its effects on mechanical properties of digital core // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2018. Vol. 37. № 2. P. 449-460. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1122

18. *Karch J., Dudák J., Žemlička J. et al.* X-ray micro-CT and neutron CT as complementary imaging tools for non-destructive 3D imaging of rare silicified fossil plants // Journal of Instrumentation. 2017. Vol. 12. № 12004. DOI: 10.1088/1748-0221/12/12/C12004

19. *Kravcov A., Franek O., Morozov N. et al.* Laser ultrasonic measurement of mechanical decay in limestone caused by freeze-thaw cycles // Acta Polytechnica. 2020. Vol. 60. № 5. P. 410-414. DOI: 10.14311/AP.2020.60.0410

20. *Карабутов А.А., Черепецкая Е.Б., Кравцов А.Н., Арригони М.* Методы исследования структуры и свойств горных пород на образцах (краткий обзор) // Горные науки и технологии. 2018. № 4. С. 10-20. DOI: 10.17073/2500-0632-2018-4-10-20

21. *Guntoro P.I., Ghorbani Y., Koch P.-H., Rosenkranz J.* X-ray Microcomputed Tomography (μCT) for Mineral Characterization: A Review of Data Analysis Methods // Minerals. 2019. Vol. 9. Iss. 3. № 183. DOI: 10.3390/min9030183

22. *Bam L.C., Miller J.A., Becker M., Basson I.J.* X-ray computed tomography: Practical evaluation of beam hardening in iron ore samples // Minerals Engineering. 2019. Vol. 131. P. 206-215. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.11.010

23. *Withers P.J., Bouman C., Carmignato S. et al.* X-ray computed tomography // Nature Reviews Methods Primers. 2021. Vol. 1. № 18. DOI: 10.1038/s43586-021-00015-4

24. *Rui Song, Yao Wang, Jianjun Liu et al.* Comparative analysis on pore-scale permeability prediction on micro-CT images of rock using numerical and empirical approaches // Energy Science & Engineering. 2019. Vol. 7. Iss. 6. P. 2842-2854. DOI: 10.1002/ese3.465

25. *Якушина О.А., Хозяинов М.С.* Изучение геоматериалов методом рентгеновской микротомографии: современное состояние вопроса // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле: Материалы 22-й Международной конференции, 27-29 сентября 2021, Москва, Россия. М.: Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, 2021. С. 302-305.

26. *Pini R., Madonna C.* Moving across scales: a quantitative assessment of X-ray CT to measure the porosity of rocks // Journal of Porous Materials. 2016. Vol. 23. Iss. 2. P. 325-338. DOI: 10.1007/s10934-015-0085-8

27. *Jarzyna J.A., Krakowska P.I., Puskarczyk E. et al.* X-ray computed microtomography – a useful tool for petrophysical properties determination // Computational Geosciences. 2016. Vol. 20. Iss. 5. P. 1155-1167. DOI: 10.1007/s10596-016-9582-3

28. *Godinho J.R.A., Hassanzadeh A., Heinig T.* 3D Quantitative Mineral Characterization of Particles Using X-ray Computed Tomography // Natural Resources Research. 2023. Vol. 32. Iss. 2. P. 479-499. DOI: 10.1007/s11053-023-10169-5

29. *Callow B., Falkon-Suarez I., Marin-Moreno N. et al.* Optimal X-ray micro-CT image based methods for porosity and permeability quantification in heterogeneous sandstones // Geophysical Journal International. 2020. Vol. 223. Iss. 2. P. 1210-1229. DOI: 10.1093/gji/ggaa321

30. *Lau S.H., Miller J.D., Lin C.-L.* 3D mineralogy, texture and damage analysis of multiphase mineral particles with a high contrast, submicron resolution X-ray tomography system // Conference Proceedings of the XXVI International Mineral Processing Congress (IMPC 2012), 24-28 September 2012, New Delhi, India. № 1022.

31. *Willson C.S., Ning Lu, Likos W.J.* Quantification of Grain, Pore, and Fluid Microstructure of Unsaturated Sand from X-Ray Computed Tomography Images // Geotechnical Testing Journal. 2012. Vol. 35. Iss. 6. 13 p. DOI: 10.1520/GTJ20120075

32. *De Kock T., Boone M.A., De Schryver T. et al.* A Pore-Scale Study of Fracture Dynamics in Rock Using X-ray Micro-CT Under Ambient Freeze – Thaw Cycling // Environmental Science & Technology. 2015. Vol. 49. Iss. 5. P. 2867-2874. DOI: 10.1021/es505738d

33. *Мерзликин А.В., Захарова Л.Н.* Особенности кинематики сдвижений массива горных пород в процессе развития малоамплитудного нарушения // Записки Горного института. 2018. Т. 231. С. 235-238. DOI: 10.25515/PMI.2018.3.235

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

34. *Reyes F., Lin Q., Cilliers J.J., Neethling S.J.* Quantifying mineral liberation by particle grade and surface exposure using X-ray microCT // Minerals Engineering. 2018. Vol. 125. P. 75-82. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.05.028

35. *Van Geet M., Swennen R., Wevers M.* Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocus X-ray computerised tomography // Sedimentary Geology. 2000. Vol. 132. Iss. 1-2. P. 25-36. DOI: 10.1016/S0037-0738(99)00127-X

36. *Jardine M.A., Miller J.A., Becker M.* Coupled X-ray computed tomography and grey level co-occurrence matrices as a method for quantification of mineralogy and texture in 3D // Computers & Geosciences. 2018. Vol. 111. P. 105-117. DOI: 10.1016/j.cageo.2017.11.005

37. *Lin Qingyang, Andrew M., Thompson W. et al.* Optimization of image quality and acquisition time for lab-based X-ray microtomography using an iterative reconstruction algorithm // Advances in Water Resources. 2018. Vol. 115. P. 112-124. DOI: 10.1016/j.advwatres.2018.03.007

38. *Van Offenwert S., Cnudde V., Bultreys T.* Pore-Scale Visualization and Quantification of Transient Solute Transport Using Fast Microcomputed Tomography // Water Resources Research. 2019. Vol. 55. Iss. 11. P. 9279-9291. DOI: 10.1029/2019WR025880

39. *Головин Ю.И., Тюрин А.И., Викторов С.Д. и др.* Размерные эффекты и картирование физико-механических свойств отдельных фаз и межфазных границ поликристаллических материалов // Известия РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82. № 7. С. 945-950. DOI: 10.1134/S0367676518070207

40. *Латышев О.Г., Казак О.О.* Влияние нарушенности горных пород на их свойства и состояние // Известия Уральского государственного горного университета. 2017. Вып. 4 (48). С. 62-65. DOI: 10.21440/2307-2091-2017-4-62-65

41. *Dajun Zhao, Shulei Zhang, Meiyan Wang.* Microcrack Growth Properties of Granite under Ultrasonic High-Frequency Excitation // Advances in Civil Engineering. 2019. Vol. 2019. Iss. 1. № 069029. DOI: 10.1155/2019/3069029

42. *Мясникова О.В., Тришина О.М., Ковалевский М.В. и др.* Структура и свойства гранитов из месторождений нерудных строительных материалов // Труды Ферсмановской научной сессии Горного института КНЦ РАН. 2009. № 6. С. 226-230.

43. *Вайсберг Л.А., Каменева Е.Е., Никифорова В.С.* Микротомографические исследования порового пространства горных пород как основа совершенствования технологии их дезинтеграции // Обогащение руд. 2018. № 3. С. 51-55. DOI: 10.17580/or.2018.03.09

44. *Зайцев Д.В., Кочанов А.Н., Токтогулов Ш.Ж. и др.* Влияние масштабного эффекта и неоднородности горных пород при определении их прочностных свойств // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 11. С. 208-215.

45. *Кочанов А.Н.* Микротрещины в твердом теле на примере горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 7. С. 221-225.

46. *Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф., Мансуров В.А. и др.* Структурные изменения при деформации природных гетерогенных материалов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2009. № 4. С. 55-59.

47. *Менжулин М.Г., Махмудов Х.Ф., Куксенко В.С., Султонов У.* Формирование и развитие очага разрушения при деформации природных гетерогенных материалов // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2013. Т. 18. Вып. 4-2. С. 1667-1668.

Авторы: **Е.Е.Каменева,** *канд. техн. наук, заведующий кафедрой, Elena.kameneva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6767-1536 (Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия),* **В.С.Никифорова,** *канд. геол.-минерал. наук, старший преподаватель, https://orcid.org/0000-0003-1278-5290 (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0