

DOI: 10.15393/j2.art.2026.9083

УДК 625.073

*Статья*

## **Исследование фильтрационных свойств природных песков и песков-отсевов дробления гранита для строительства лесовозных дорог в Карелии**

**Александрова Анастасия Александровна**

*аспирант, Петрозаводский государственный университет  
(Петрозаводск, Российская Федерация), [nastenkay9807@gmail.com](mailto:nastenkay9807@gmail.com)*

**Каменева Елена Евгеньевна**

*кандидат технических наук, Петрозаводский государственный университет  
(Петрозаводск, Российская Федерация), [elena.kameneva@mail.ru](mailto:elena.kameneva@mail.ru)*

*Получена: 13 октября 2025 / Принята: 10 апреля 2026 / Опубликовано: 30 апреля 2026*

---

**Аннотация:** Опираясь на негативное влияние фактора сезонности на процессы лесозаготовки и преимущественное использование снежно-ледяных дорог, проявляется потребность как в лесовозных дорогах круглогодичного действия, так и в обеспечении отрасли качественными дорожно-строительными материалами. Цель работы — исследование и сравнительная оценка фильтрационных свойств природных песков и песков-отсевов дробления гранита. В качестве материалов исследования рассматривались пробы природных песков и песков-отсевов дробления гранита месторождений Карелии крупностью 0—5 мм. По ходу исследования были оценены следующие показатели и выявлено их влияние на фильтрационные свойства: минеральный и гранулометрический составы, модуль крупности, содержание пылевидных частиц, однородность, лещадность, пустотность. Определены зависимости коэффициента фильтрации от модуля крупности для природных песков и сквозная зависимость для всех исследуемых проб коэффициента фильтрации от содержания пылевидных частиц крупностью менее 0,05 мм. В ходе исследования установлено, что пески-отсевы дробления гранита уступают по фильтрационным свойствам природным пескам. Песок-отсев дробления гранита является искусственным материалом, образующимся в результате технологического процесса дробления, которое, в свою очередь, влияет на увеличение пылевидных частиц, лещадности,

пустотности и неоднородности проб песков-отсевов, что косвенно и напрямую приводит к изменениям коэффициента фильтрации.

**Ключевые слова:** грунтовые дороги; природные пески; пески-отсевы дробления; фильтрация; лещадность; однородность

---

DOI: 10.15393/j2.art.2026.9083

*Article*

## **Filtration properties of natural and granite crushing sand for construction of logging roads in Karelia**

**Anastasia Aleksandrova**

*Ph. D. student, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation),  
nastenkay9807@gmail.com*

**Elena Kameneva**

*Ph. D. in engineering, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation),  
elena.kameneva@mail.ru*

*Received: 13 October 2025 / Accepted: 19 April 2026 / Published: 30 April 2026*

---

**Abstract:** The negative seasonality impact on logging processes and the predominant use of snow and ice roads necessitate year-round logging roads engagement and provision the industry with high-quality road construction materials. The aim of the work was to study and comparatively evaluate the filtration properties of natural and granite crushing sand. The materials for the study were samples of natural sand and granite crushing sand from Karelian deposits with a size of 0—5 mm. During the study the following parameters were assessed and their influence on filtration properties was identified: mineral and granulometric composition, fineness modulus, dust particle content, homogeneity, flakiness, and voidness. The dependences of the filtration coefficient on the fineness modulus for natural sand and the continuous dependence of the filtration coefficient for all studied samples on the content of dust particles with a size of less than 0.05 mm were determined. The authors established that the natural sand filtration properties outmatch those of granite crushed sand. Granite crushed sand is an artificial material formed as a result of the technological crushing process. During crushing the amount of dust particles, flakiness index, voidness increases and the heterogeneity of the crushed sand samples increases. The crushing process has both a direct and indirect effect on the filtration coefficient.

**Keywords:** dirt roads; natural sands; granite-crushed sand; filtration; flakiness; homogeneity

---

## 1. Введение

Одной из составных частей дорожно-транспортной инфраструктуры лесного комплекса являются грунтовые дороги, которые используются как в процессах лесоосвоения и лесозаготовки, так и в лесохозяйственных целях — охрана, защита, воспроизводство лесов, рекреационная деятельность и др. На долю процессов лесозаготовки и лесоосвоения отводится немалая часть нагрузки на лесовозные грунтовые дороги не капитального строения — временные дороги зимнего и летнего действия, которые создаются без разработки проекта [1], что изначально относит временные дороги к дорогам низкого качества и обуславливает с экономической точки зрения преимущественную эксплуатацию в зимний период.

В последнее время изменение климата, связанное с ростом числа тёплых зим в Республике Карелия, негативно сказывается на стабильности процесса заготовки и вывозки древесины. Это связано с сокращением срока функционирования снежно-ледяных дорог и обострением проблемы транспортной доступности лесных ресурсов. Вследствие этого актуальность приобретает проблема строительства лесовозных дорог круглогодичного действия с вытекающей задачей поиска дорожно-строительных материалов, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками — сопротивляемостью механическим нагрузкам при движении большегрузного транспорта, избыточному увлажнению и колебаниям температур в период межсезонья. Наиболее рациональным вариантом является использование местных дорожно-строительных материалов [2], [3]. Традиционно для строительства лесовозных дорог в Карелии используются природные песчано-гравийные смеси (ПГС), добываемые в непосредственной близости от участков строительства.

С другой стороны, Республика Карелия обладает огромными запасами нерудных строительных материалов — сырья для производства щебня, щебёночно-песчаных смесей, песков-отсевов дробления. Основной проблемой карьеров Карелии являются трудности реализации этой продукции, что связано, с одной стороны, с высокой конкуренцией на рынке щебня в республике, с другой — проблемой её транспортирования до потребителя: при перевозке щебня на значительные расстояния железнодорожным транспортом его стоимость повышается в 2—3 раза. Наиболее остро проблема реализации продукции стоит для карьеров, разрабатывающих месторождения гранитов: при переработке этих пород образуется значительное количество малоликвидной продукции — песков-отсевов дробления, которые также могут быть использованы для устройства лесовозных дорог. Учитывая, что карьеры по переработке гранита территориально сопряжены с местами лесозаготовок, переориентация их на производство продукции для строительства лесовозных дорог (создания специализированных карьеров) позволит решить проблему обеспечения отрасли дорожно-строительными материалами.

Качество покрытий грунтовых дорог в значительной мере зависит от фильтрационных свойств ПГС и ЩПС как основной характеристики, обеспечивающей дренирование и моро-

зоустойчивость дорожного покрытия [4], [5]. Использование материалов с низкими фильтрационными свойствами влияет как на дренирующую способность дорожного покрытия, так и на его пучинистость: при замерзании воды в пустотах между зёрнами щебня образуются кристаллы льда и небольшие ледяные линзы, что приводит к увеличению объёма грунта и формированию дороги типа «стиральная доска» [6].

К настоящему времени накоплен значительный объём экспериментальных данных и результатов исследований фильтрационных свойств сыпучих материалов. Исследования проводили как в связи с конкретными технологическими задачами, так и с целью изучения механизма фильтрации.

Обобщение результатов этих работ показывает, что фильтрационная способность строительных песков зависит от их пористости, плотности, наличия пылевидных и глинистых частиц, скорости водонасыщения, однородности зёрен по крупности и ряда других факторов [4—9]. Так, авторы работы [4] среди наиболее значимых факторов выделяют тип грунта, его влажность, пористость, гранулометрический состав, проницаемость и воздействие напорной воды. В работах [7], [10], [11] оценено влияние гранулометрического состава, эффективного диаметра частиц, модуля крупности песка и коэффициента однородности. Авторы работ [12], [13] обращают внимание на наличие пылевидных и глинистых фракций в песках: пылевидные частицы обладают повышенной гидрофобностью, что препятствует фильтрации [13] и приводит к просадке искусственных оснований дорог [12].

Целью нашей работы является исследование и сравнительная оценка фильтрационных свойств природных песков и песков-отсевов дробления гранита.

## 2. Материалы и методы

Для исследований были отобраны пробы природных песков и пробы песков-отсевов дробления крупностью 0—5 мм, полученные в результате дробления гранита в промышленных условиях на карьерах Карелии.

Минеральный состав исследуемых проб песков-отсевов дробления относительно стабильный. Зёрна песков-отсевов дробления гранита представлены микроклином (30—35 %), плагиоклазом (50—60 %), кварцем (5—8 %), рудными минералами (апатит, титанит) в количестве 0,5—1,2 % в виде сростков или отдельных мономинеральных зёрен.

Форма зёрен песков-отсевов дробления — остроугольная, в значительном количестве присутствуют частицы пластинчатой и игольчатой формы.

В пробах природных песков выделяются мономинеральные зёрна и сростки кварца, микроклина, плагиоклаза, кальцита, кварца, амфибола. Форма зёрен — преимущественно изометричная, зёрна пластинчатой и игольчатой формы практически отсутствуют.

Прочность песков оценена по стандартной методике ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» и соответствует марке 1000—1200 по пробам отсева дробления гранита и марке 1000 по пробам природных песков.

Гранулометрический состав исследуемых проб приведён в таблице 1, кривые распределения зёрен по крупности отражены на рисунке 1.

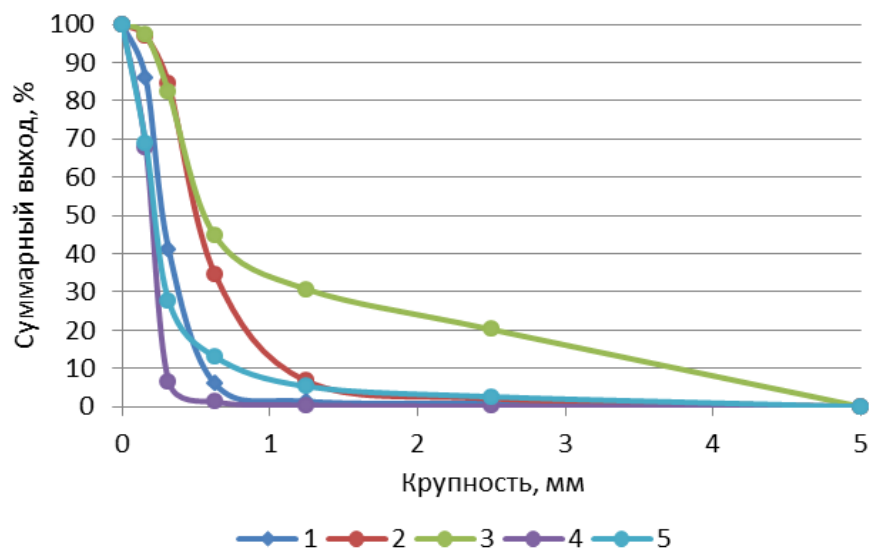
**Таблица 1.** Гранулометрический состав проб песков

**Table 1.** Granulometric composition of sand samples

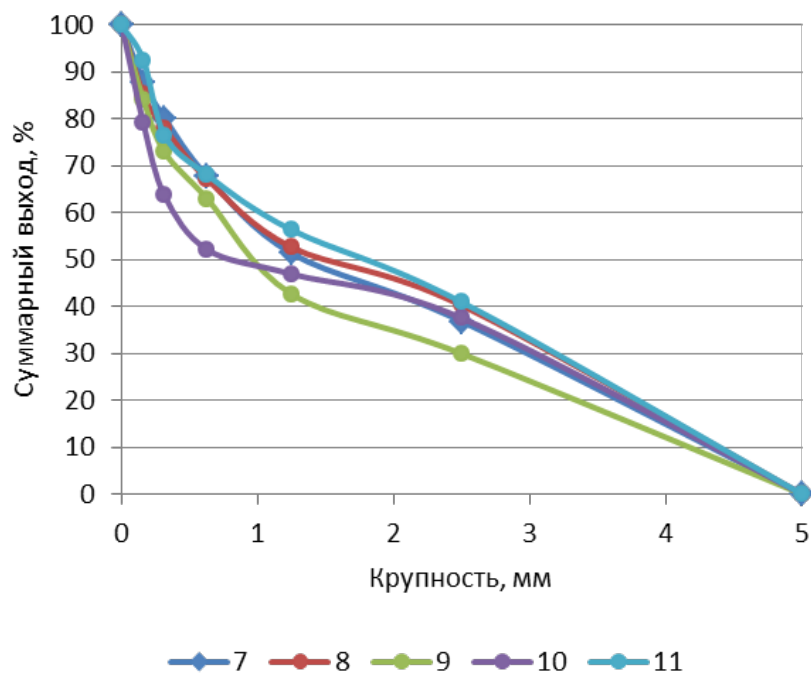
Номера проб	Крупность, мм						Итого
	2,5—5	1,25—2,5	0,63—1,25	0,315—0,63	0,16—0,315	0,05—0,16	
Природные пески							
1	0,8	0,6	4,5	35,2	44,9	14,0	100
2	2,1	4,6	27,8	49,9	14,4	1,2	100
3	20,2	10,5	13,9	37,7	15,0	2,7	100
4	0,1	0,3	0,8	5,4	61,2	31,2	100
5	2,6	2,7	7,7	14,7	43,3	31,0	100
Среднее	5,16	3,74	10,94	28,58	35,76	16,02	100
Пески-отсевы дробления гранита							
7	36,7	13,6	17,1	12,8	7,7	12,1	100
8	40,2	12,4	14,5	11,0	7,1	14,8	100
9	29,9	12,7	20,3	10,0	11,5	15,6	100
10	37,5	9,4	12,2	11,5	8,6	20,8	100
11	40,9	15,4	21,3	6,4	6,7	7,5	100
Среднее	37,04	12,7	17,08	10,34	8,32	14,16	100

По зерновому составу все исследованные пески соответствовали требованиям ГОСТ 8736-2014 (природные пески) и ГОСТ 31424-2014 (отсевы дробления, таблица 1).

Экспериментальные исследования выполнены по стандартным методикам в соответствии с требованиями нормативных документов. В экспериментах определялись следующие показатели: модуль крупности, гранулометрический состав, содержание пылевидных частиц, коэффициент однородности, содержание частиц пластинчатой и игольчатой формы, пустотность. Результаты экспериментов приведены в таблице 2.



а



б

**Рисунок 1.** Кривые распределения зёрен песка по крупности: **а** — природные пески; **б** — пески-отсевы дробления гранита [рисунок авторов]

**Figure 1.** Distribution curves of sand grains by size: **(a)** natural sand; **(b)** sand from granite crushing

**Таблица 2.** Результаты исследования состава и фильтрационных свойств песков

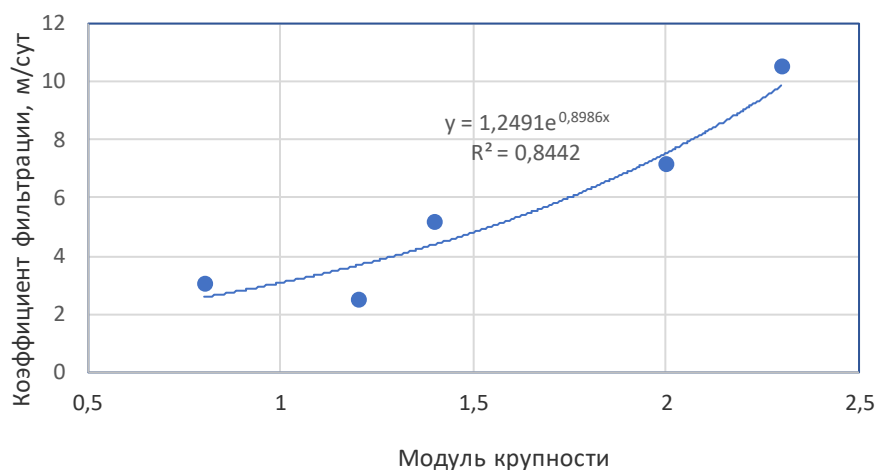
**Table 2.** Results of the study of the composition and filtration properties of sand

Номера проб	Модуль крупности, ед.	Содержание частиц мельче 0,05 мм, %	Коэффициент однородности, %	Содержание лещадных зёрен, %	Пустотность, %	Коэффициент фильтрации, м/сут.
Природные пески						
1	1,4	1,0	34	3,4	45,6	5,2
2	2,3	0,5	52	5,4	46,3	10,6
3	2,0	0,9	35	7,9	45,0	7,2
4	0,8	1,4	48	0	37,4	3,1
5	1,2	3,6	38	0	44,2	2,5
Среднее	1,54	2,1	41,4	3,34	45,14	5,8
Пески-отсевы дробления гранита						
7	3,3	8,4	11	54,27	51,2	1,1
8	3,2	6,7	10	29,5	48,8	2,0
9	3,1	6,1	19	16,2	52,8	1,1
10	2,9	7,8	10	33,4	52,5	3,3
11	3,6	4,8	8	34,9	56,2	2,6
Среднее	3,22	6,4	11,6	33,65	52,76	2,0

### 3. Обсуждение результатов

Анализ полученных данных показывает, что исследуемые пробы природных песков нестабильны по гранулометрическому составу: модуль крупности колеблется от 0,8—1,2 (группы «тонкий» и «очень мелкий») до 2,0—3,2 («средний» и «повышенной крупности»). Коэффициент фильтрации составляет 2,5—3,1 м/сут. — для природных песков групп «очень мелкий» и «тонкий». Для песков групп «средний» и «повышенной крупности» коэффициент фильтрации выше — 7,2—10,6 м/сут. (рисунок 2).

Пески-отсевы дробления гранита по гранулометрическому составу достаточно стабильны: модуль крупности 2,6—3,6 («крупный» и «очень крупный»), но коэффициент фильтрации для этих проб не превышает 2,6—8,0 м/сут. Однозначная зависимость коэффициента фильтрации от крупности отсутствует: пески-отсевы дробления с высоким модулем крупности имеют более низкие значения коэффициента фильтрации по сравнению с природными песками (средние значения: 2,0 м/сут. и 5,8 м/сут. соответственно) (см. таблицу 2).



**Рисунок 2.** Зависимость коэффициента фильтрации от модуля крупности природных песков [рисунок авторов]

**Figure 2.** Dependence of the filtration coefficient on the fineness modulus of natural sand

При оценке модуля крупности песков не учитывается содержание в них самой мелкой фракции — менее 0,05 мм (пылевидных частиц). Проведённые исследования показывают, что в пробах природных песков содержание фракции мельче 0,05 мм не превышает 1,0—3,6 %, в пробах песков-отсевов этот показатель значительно выше — 4,8—8,4 %.

Высокие значения пылевидных частиц в пробах песков-отсевов связаны с условиями их дезинтеграции в дробильных аппаратах: под действием сжимающей нагрузки в разрушаемой породе формируется очаг разрушения, в котором концентрируются сверхтонкие минеральные частицы [14], [15].

Следует также отметить, что в гранитах присутствуют слоистые силикаты (биотит, хлорит) в количестве до 5—10 %. Эти минералы выделяются на границах между зёрнами, а также в виде отдельных агрегатов внутри зёрен более прочных минералов. В результате действия сжимающих нагрузок в технологическом процессе дробления происходит деструктуризация выделений слоистых силикатов как наиболее слабых составляющих и их вынос из зоны разрушения. Микроскопический анализ показывает, что содержание биотита в песках-отсевах во фракции крупностью 0,16—0,315 мм увеличивается до 14,6—18,6 % (таблица 3).

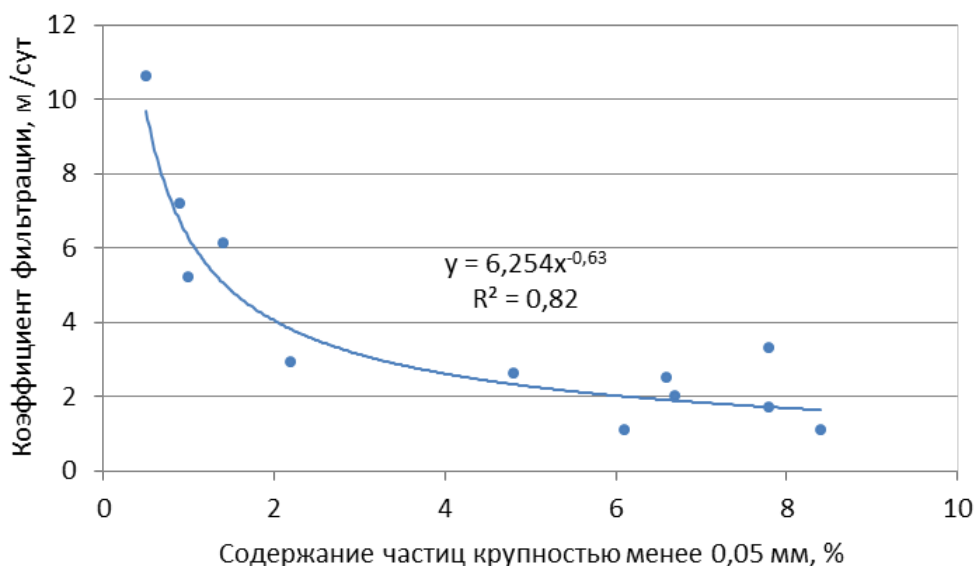
**Таблица 3.** Распределение содержания биотита во фракциях различной крупности в песках-отсевах дробления гранита

**Table 3.** Distribution of biotite content in fractions of different sizes in granite crushing sand

Крупность, мм	Содержание биотита, %	
	Проба 7	Проба 9
1,25—2,5	4,5	6,4
0,63—1,25	5,1	8,1
0,315—0,63	9,8	12,0
0,16—0,315	14,6	18,6

Влияние биотита на снижение фильтрационной способности песков-отсевов дробления гранита связано со способностью слюд поглощать воду по плоскостям спайности. Заполняя пустоты между зёрнами песка, слюды поглощают воду и препятствуют фильтрации.

Устойчивая зависимость коэффициента фильтрации песков от содержания частиц крупностью менее 0,05 мм имеет сквозной вид для всех исследованных проб (рисунок 3).



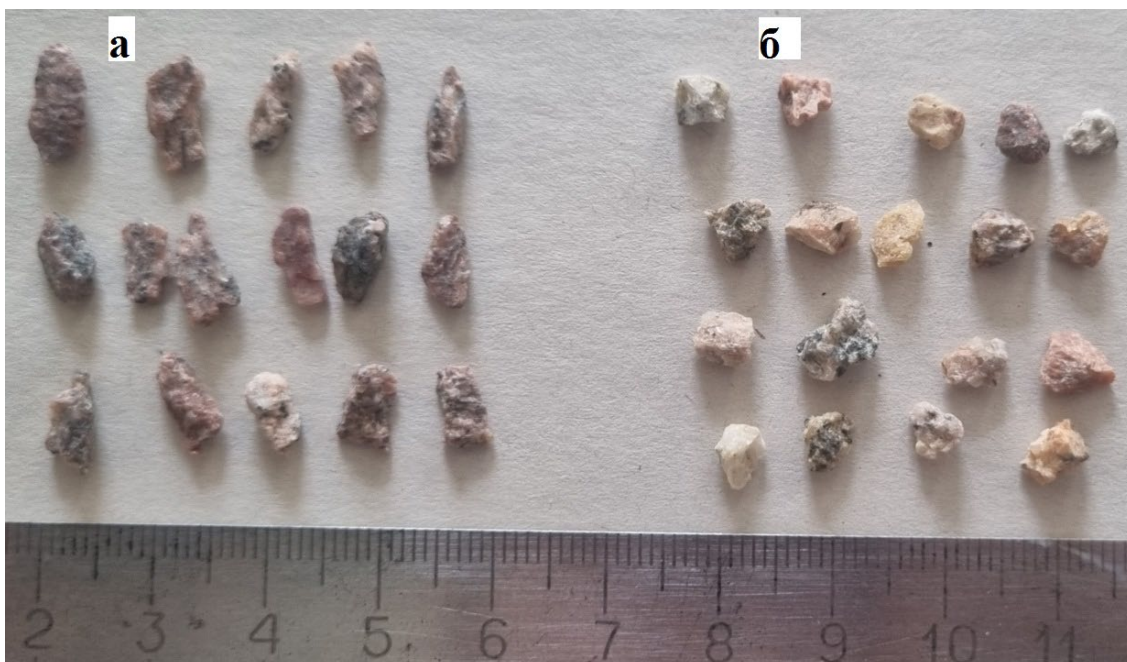
**Рисунок 3.** Зависимость коэффициента фильтрации песков от содержания частиц крупностью менее 0,05 мм [рисунок авторов]

**Figure 3.** Dependence of the filtration coefficient of sands on the content of particles smaller than 0.05 mm

Фильтрационные свойства песков в значительной мере зависят от равномерности распределения размеров частиц по крупности. В однородном песке поры между частицами распределены равномерно, что позволяет воде протекать с постоянной скоростью. В неоднородном песке более мелкие частицы заполняют пространство между крупными, затрудняя фильтрацию воды.

Исследования показали, что пробы песков существенно различаются по однородности гранулометрического состава. Коэффициент однородности песков-отсевов дробления гранита составляет 8—19 % (среднее значение 11,6 %). Однородность проб природных песков значительно выше — 34—52 % (среднее значение 41,4 %).

В значительной мере неоднородность отсевов дробления связана с формой их зёрен. Если частицы природных песков имеют форму, близкую к изометричной, то пески-отсевы содержат значительное количество зёрен пластинчатой и игольчатой (лещадной) формы — 16,9—54,3 % во фракции 2,5—5,0 мм, выделенной из проб 7—11, среднее значение 33,65 % (фото). Лещадные зёрна в продуктах дезинтеграции (щебне и песке-отсеве) образуются при использовании дробильного оборудования, работающего по принципу сжатия, а также при дроблении сланцеватых анизотропных пород [16].



**Фото.** Форма зёрен песка (фракция 2,5—5 мм): **а** — пески-отсевы дробления гранита; **б** — природные пески [фото авторов]

**Photo.** Sand grain shape (fraction 2.5—5 mm): **(a)** sand from granite crushing; **(b)** natural sand

Присутствие в песках-отсевах частиц пластинчатой и игольчатой формы увеличивает пористость (пустотность), что согласуется с экспериментальными данными: пустотность проб природных песков составляет 37,4—46,3 %, пустотность песков-отсевов гранита выше — 48,8—56,2 %.

Теоретически при увеличении пустотности сыпучих сред их фильтрационная способность должна улучшаться. В то же время в песках-отсевах, при высокой пустотности и неоднородности гранулометрического состава, мелкие частицы заполняют промежутки между крупными зёрнами, что ухудшает фильтрационные свойства.

Согласно «Методическим рекомендациям по применению и обогащению отсеков дробления и разнопрочных каменных материалов для дорожного строительства» [17], коэффициент фильтрации песков для дренирующих слоёв должен быть не менее 1 м/сут.; для участков большого скопления воды — не менее 2 м/сут. При значениях коэффициента фильтрации 1,1—3,3 м/сут. (среднее значение 1,84 м/сут.) можно утверждать, что пески-отсевы дробления гранита этому условию не соответствуют.

#### 4. Обсуждение и заключение

По ходу исследования качественных свойств песков и их влияния на фильтрационные свойства, по мере сравнения природных песков и песков-отсевов дробления гранита установлено, что пески-отсевы дробления гранита уступают природным пескам из-за негативного влияния на фильтрацию следующего ряда показателей: завышенное содержание пылевидных частиц (фракции менее 0,05 мм), неоднородность по зерновому составу, высокие показатели лещадности и содержания слоистых силикатов. Завышение значений перечисленных показателей является следствием технологического процесса дробления, учитывая также, что песок-отсев дробления гранита является вторичным продуктом, накапливая в своей массе продукта пылевидные частицы и зёрна слабых составляющих гранита — биотита и хлорита — в большем процентном содержании по сравнению с исходной горной массой или щебёночной продукцией.

В то же время свойства песков-отсевов дробления могут быть улучшены за счёт применения специальных технологических приёмов, способствующих получению зёрен кубовидной формы, а также использования операции промывки песков с целью удаления фракции зёрен менее 0,05 мм.

#### Список литературы

1. СП 288.1325800.2016. Дороги лесные. Правила проектирования и строительства. М.: Минстрой России, 2016. 108 с.
2. Функционирование временных лесовозных дорог в зимний и межсезонный периоды (на примере Республики Карелия) / К. В. Хорошилов, В. К. Катаров, Т. А. Гаврилов [и др.] // Resources and Technology. 2019. Т. 16, № 2. С. 59—75. EDN: QGKJRN.
3. Катаров В. К., Рожин Д. В., Сюнёв В. С. Оптимальное проектирование сети лесных дорог: от методов к решениям // Resources and Technology. 2023. Т. 20, № 3. С. 32—47.

4. Оноприенко Н. Н., Сальникова О. Н., Лютенко А. О. Особенности проявления коэффициента фильтрации в областях его практического применения // Сборник Международной научно-технической конференции «Наукоёмкие технологии и инновации (XXV Научные чтения)». Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2023. С. 1329—1332.
5. Смирнов-Туманов Я. С., Панченко Н. М. Результаты исследования фильтрационных свойств комбинированной щебёночно-песчаной смеси // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2018. Т. 10, № 2. С. 338—345. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-338-345.
6. Кузнецова Т. В. Морозное пучение грунтов как природное явление // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство. 2016. № 1. С. 193—196.
7. Influence of particle and grain size on sand filtration: Effect on head loss and turbidity / R. M. B. Khelladi, A. C. Fellah, M. Pontié [et al.] // Aquatic Science and Technology. 2020. No. 2. P. 36—50. DOI: <https://doi.org/10.5296/ast.v8i2.17512>.
8. Slow Sand Filtration Performance: A Systematic Investigation on the Influence of Uniformity Coefficient (Cu) / A. K. Anggraini, E. Grotelüschen, A. Silva [et al.] // Conference: 13th IWA Specialized Conference on Small Water and Wastewater Systems & 5th IWA Specialized Conference on Resources — Oriented Sanitation. 2016.
9. Яковлева А. А., Константинова М. В., Гусева Е. А. Характеристики прибрежных песков на территории Вьетнама // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46, № 3. С. 306—314. DOI: <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-3-306-314>. EDN: KVLBYX.
10. Bruno Moreno Ramos da Silva, Rafael Kopschitz Xavier Bastos, Pedro Kopschitz Xavier Bastos. Comparison of crushed rock sand and natural river sand as filter media for rapid filtration // Water Supply. 2021. No. 1. P. 401—411. DOI: <https://doi.org/10.2166/ws.2020.311>.
11. Карасева Н. С., Мирошкин А. К. Расчётный метод определения коэффициента фильтрации песков // Транспортное строительство. 2018. № 10. С. 17
12. Брагарь Е. П., Рачков Д. В., Пронозин Я. А. Риски использования пылеватых песков в качестве искусственных оснований // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (60). С. 86—94. DOI: 10.52170/1815-9265\_2022\_60\_86.
13. Elkin I. S., Istomin I. B. Study wetting coal dust fraction of particles of surfactant solutions // J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol. 2017. No. 10(8). P. 975—984. DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-8-975-984.
14. Викторов С. Д., Качанов А. Н. Оценка условий образования и размеров микрочастиц при разрушающих воздействиях на образцы горных пород // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и точные науки. 2013. Т. 18, № 4-2. С. 1683—1684.
15. Исследование деформации гранита при одноосном сжатии / Л. А. Вайсберг, Е. Е. Каменева, Ю. Г. Пименов [и др.] // Горный журнал. 2015. № 4. С. 50—54.
16. 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.
17. Методические рекомендации по применению и обогащению отсеков дробления и разнопрочных каменных материалов для дорожного строительства. М.: СоюздорНИИ, 1987. 77 с.

## References

1. SP 288.1325800.2016. Forest roads. Design and construction rules. Moscow, Ministry of Construction of Russia, 2016. 108 p. (In Russ.)
2. Khoroshilov K. V., Katarov V. K., Gavrilov T. A., Kolesnikov G. N. Functioning of temporary logging roads in winter and off-season periods (on the example of the Republic of Karelia). *Resources and Technology*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 59—75. EDN: QGKJRN. (In Russ.)
3. Katarov V. K., Rozhin D. V., Sunev V. S. Optimal design of the forest road network: from methods to solutions. *Resources and Technology*, 2023, vol. 20, no. 3, pp. 32—47. (In Russ.)
4. Onoprienko N. N., Salnikova O. N., Lyutenko A. O. Features of the manifestation of the filtration coefficient in the areas of its practical application. *Proc. Int. scientific and technical. conf. «High-tech technologies and innovations (XXV Scientific Readings)»*. Belgorod, Publishing house of BSTU named after V. G. Shukhov, 2023, pp. 1329—1332. (In Russ.)
5. Smirnov-Tumanov Ya. S., Panchenko N. M. Results of the study of the filtration properties of a combined crushed stone-sand mixture. *Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of Maritime and River Fleet*, 2018, vol. 10, no. 2, pp. 338—345. doi: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-338-345. (In Russ.)
6. Kuznetsova T. V. Frost heaving of soils as a natural phenomenon. *Traditions and innovations in construction and architecture. Construction*, 2016, no. 1, pp. 193—196. (In Russ.)
7. Khelladi R. M. B., Fella A. C., Pontié M., Guellil F. Z. Influence of particle and grain size on sand filtration: Effect on head loss and turbidity. *Aquatic Science and Technology*, 2020, no. 2, pp. 36—50. doi: <https://doi.org/10.5296/ast.v8i2.17512>.
8. Anggraini A. K., Grotelüschen E., Silva A., Fuchs S. Slow Sand Filtration Performance: A Systematic Investigation on the Influence of Uniformity Coefficient (Cu). *Conference: 13th IWA Specialized Conference on Small Water and Wastewater Systems & 5th IWA Specialized Conference on Resources — Oriented Sanitation*. 2016.
9. Yakovleva A. A., Konstantinova M. V., Guseva E. A. Characteristics of coastal sands in Vietnam. *Earth Sciences and Subsoil Use*, 2023, vol. 46, no. 3, pp. 306—314. doi: <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-3-306-314>. EDN: KVLBYX. (In Russ.)
10. Bruno Moreno Ramos da Silva, Rafael Kopschitz Xavier Bastos, Pedro Kopschitz Xavier Bastos. Comparison of crushed rock sand and natural river sand as filter media for rapid filtration. *Water Supply*, 2021, no. 1, pp. 401—411. doi: <https://doi.org/10.2166/ws.2020.311>.
11. Karaseva N. S., Miroshkin A. K. Calculation method for determining the filtration coefficient of sands. *Transport construction*, 2018, no. 10, p. 17. (In Russ.)
12. Bragar E. P., Rachkov D. V., Pronozin Ya. A. Risks of using silty sands as artificial foundations. *Bulletin of the Siberian State Transport University*, 2022, no. 1 (60), pp. 86—94. doi: 10.52170/1815-9265\_2022\_60\_86. (In Russ.)
13. Elkin I. S., Istomin I. B. Study wetting coal dust fraction of particles of surfactant solutions, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2017, no. 10 (8), pp. 975—984. doi: 10.17516/1999-494X-2017-10-8-975-984.
14. Viktorov S. D., Kachanov A. N. Assessment of the conditions of formation and sizes of microparticles under destructive effects on rock samples. *Bulletin of Tambov University. Series: Natural and exact sciences*, 2013, vol. 18, no. 4-2, pp. 1683—1684. (In Russ.)

15. Weisberg L. A., Kameneva E. E., Pimenov Yu. G., Abrosimov A. A. Study of granite deformation under uniaxial compression. *Mining magazine*, 2015, no. 4, pp. 50—54. (In Russ.)
16. Weisberg L. A., Kameneva E. E., Aminov V. N. Assessment of technological capabilities for managing the quality of crushed stone during the disintegration of building rocks. *Construction materials*, 2013, no. 11, pp. 30—34. (In Russ.)
17. *Methodological recommendations for the use and enrichment of crushed stone screenings and different-strength stone materials for road construction*. Moscow, SoyuzdorNII, 1987. 77 p. (In Russ.)