

В.М. Губайдуллин, И.В. Бригадин, В.В. Зырянов, А.В. Самойлов

К ВОПРОСУ ОБ АВТООБОГАЩЕНИИ КВАЗИМИКРОННЫХ ФРАКЦИЙ ГРАНИТОВ

Инструментальными методами изучена проба распространенного техногенного сырья — гранитной пыли, образующейся при переработке гранита на одном из месторождений Карельского перешейка. Получены узкие ситовые фракции от +200 до -40 мкм, из которых выделены магнитные фракции. Фракции изучены инструментальными методами: СЭМ с ЭДС, РФА, измерена насыпная плотность. Химический состав определен рентгенофлуоресцентным анализом по основным элементам, масс-спектроскопией с индуктивно-связанной плазмой по минорным элементам. Установлен количественно фазовый состав фракций. Пыль содержит 5 основных минералов гранита: кварц, полевые шпаты — микроклин и плагиоклазы, слюды — биотит и хлоритоид. Фазовый состав слабо меняется с размером частиц. Содержание редкоземельных элементов, а также скандия, иттрия повышено в магнитных фракциях слюд, причем их максимальное содержание наблюдается в тонких фракциях. По экономическим оценкам, при комплексной переработке гранитной пыли до 90% доходов может принести главный продукт — полевошпатовый песок, если снизить содержание железа до уровня менее 1%. Очень перспективным является концентрат редкоземельных элементов с общим содержанием порядка 0,03%. Наибольший интерес представляют Y, Sc, Nd, Tm.

Ключевые слова: гранитная пыль, техногенное сырье, рациональное природопользование, комплексная переработка, фазовый состав фракций, полевошпатовый песок, редкоземельные элементы.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-190-200

Введение

Рациональное природопользование должно быть главным направлением в развитии сырьевых отраслей. Создание технологий комплексной переработки природного и техногенного сырья на основе достоверных знаний об их рыночном потенциале позволит повысить конкурентоспособность предприятий и снизить давление на окружающую среду.

РЗЭ лежат в основе множества современных материалов, на которых основан современный научно-технический прогресс. Месторождений РЗЭ мало и вдобавок они распространены крайне неравномерно по планете. Стратегиче-

ское значение ресурсов РЗЭ очевидно, особенно в связи с монополизацией этого сектора рынка Китаем. Проблемные вопросы и положение дел в этом секторе по России изложены в ресурсе [1], по миру в целом — в работе [2]. Перспективным сырьем РЗЭ могут являться тонкие отходы промышленности, включая золы уноса [3].

Одним из наиболее массовых производств в мире является добыча щебня из гранитных пород. При производстве фракций гранитного щебня образуются отходы — гранитная пыль, доля которой может достигать 10%. Размещение этих отходов в отвалах и их обслуживание

снижает эффективность предприятий горной отрасли и ухудшает окружающую среду. При наличии возможностей сухой переработки пыли на основе современных сепараторов эти отходы реально перевести в разряд техногенного сырья [3].

Реальность коммерциализации переработки техногенного сырья зависит от его экономического потенциала и определяется в первую очередь емкостью местного рынка строительных материалов. Особое значение имеет также политика государства в области рационального природопользования и охраны окружающей среды.

Наличие дорогих компонентов в техногенном сырье, например, РЗЭ, существенно улучшает перспективы комплексной переработки сырья.

Первым и необходимым этапом в решении проблемы является получение полной информации о сырье — фазовом и химическом составе фракций, которые могут быть выделены технически реализуемыми операциями физического разделения — создание паспорта сырья. Этот паспорт вместе с данными по рыночным ценам потенциальных продуктов позволяет разработать оптимальную технологическую схему переработки.

Таблица 1

Фракционный состав образца сырья

Размер фракции, мкм	Доля, %	МФ в т.ч.	Сильно МФ в т.ч.
+200	17,4	1,39	0,1
+160	18,9	1,13	0,18
+140	5,95	0,43	0,06
+125	15,3	1,06	0,15
+94	8,2	0,64	0,09
+80	7,7	0,64	0,13
+71	3,95	0,29	0,08
+64	5,35	Н.о.	
+56	3,45	Н.о.	
+40	7,7	Н.о.	
-40	6,1	Н.о.	
	100	>5,6	~0,8

В данной работе представлены результаты изучения пыли, образующейся при производстве гранитного щебня на одном из месторождений на Карельском перешейке.

Разделение и анализ фракций

Основы теории обогащения процессов, основные методы обогащения представлены в учебном пособии [5], Конкретные способы, как правило, патентуются, например [6–7]. Для тонкой пыли с размерами частиц менее 20 мкм, которая сильно осложняет сухое разделение песков, наиболее подходит техника класса Электромассклассификатор (ЭМК) [3, 7]. Вместе с другими новыми сепараторами типа трибоадгезионного с дополнительными магнитными и электрическими опциями (ТАС), непрерывного сепаратора по размерам частиц есть возможность разделения, в т.ч. селективного, в широком диапазоне размеров частиц, включая субмикронный. В данной работе было использовано стандартное ситовое разделение на фракции от +200 до -40 мкм и магнитная сепарация с помощью постоянных магнитов на основе FeNdB-сплава для получения паспорта техногенного сырья.

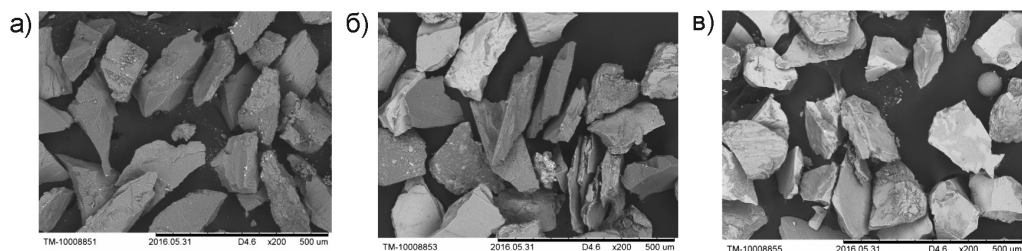


Рис. 1. СЭМ изображения фракции +125 мкм: немагнитная (а), слабомагнитная (б), магнитная (в)

Таблица 2

Характерный состав по элементам для немагнитных фракций

Элемент	Вариация содержания, вес. %
Na	1,6–1,9
Al	10,8–11,6
Si	65,9–67,2
K	16,1–12,8
Ca	1,2–2,1
Fe	3,2–5,6

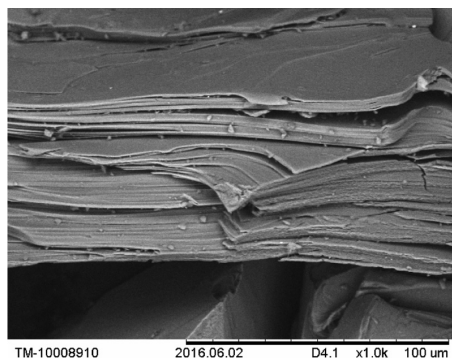


Рис. 2. Частица слюды

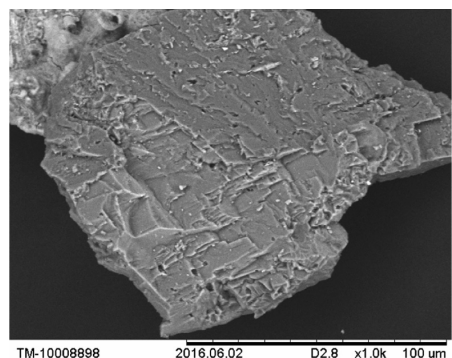


Рис. 3. Частица амфиболов в магнитной биотита в магнитной фракции +200 фракции +94

При выделении фракций менее 60 и 40 мкм были определенные трудности из-за агрегации тонких частиц, но эти проблемы легко решаются на следующем этапе при выборе оптимальной технологической схемы.

Разделение сырья

Образец техногенного сырья был разделен на фракции на ситах. Результаты ситового разделения представлены в табл. 1. Содержание магнитной фракции (МФ, включая сильномагнитную) составляет примерно 6%.

Изучение фракций СЭМ с ЭДС

На рис. 1 показаны наиболее представительные изображения сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) магнитной и немагнитной фракций +125 мкм. Угловатые частицы характерны для немагнитных фракций. Типичный состав немагнитных фракций по данным энерго-дисперсионной спектроскопии (ЭДС) представлен в табл. 2, который характерен для смеси кварца с полевыми шпатами.

Магнитные фракции представлены в основном пластинчатыми частицами с хорошо выраженной спайностью (рис. 2), хотя встречаются и угловатые частицы без выраженной текстуры (рис. 3).

Микроанализ отдельных частиц в магнитных фракциях, однородных по морфологии, свидетельствует о вероятном присутствии не только минералов слюд со значительным содержанием железа (биотита, хлоритоидов), но и амфиболов (роговой обманки). Состав частицы на

Таблица 3

Элементный состав магнитных фракций

Элемент	Вариация содержания в слабомагнитных фракциях, вес. %	Вариация содержания в магнитных фракциях, вес. %
Na	0,8–1,3	0,3–0,4
Mg	1,8–2,5	2,5–3,2
Al	11,6–12,4	12,1–13,1
Si	34,8–35,8	24,5–30,2
K	7,4–8,7	4,8–7,0
Ca	1,0–1,8	1,2–1,4
Ti	1,9–2,5	1,7–2,2
Mn	0,1–0,3	0,4–1,4
Fe	36,5–38,9	42,3–50,8
Zn	0,0–1,7	0,0–1,2

рис. 3 соответствует структурной формуле роговой обманки



Семейство амфиболов имеет уникальную особенность — все 8 основных элементов земной коры представлены в структурной формуле, что делает их чрезвычайно сложными для исследований и обеспечивает «гибкость» состава. Слабо выраженная спайность кристалла на рис. 3 также говорит в пользу роговой обманки. Из-за низкой симметрии и множества разновидностей, ведущих к уширению пиков, доказать по данным РФА наличие в песке амфиболов при их

небольшом содержании затруднительно, но роговая обманка часто встречается в гранитных породах. Типичный состав магнитных фракций представлен в табл. 3.

Рентгенофазовый анализ

На рис. 4 показана типичная дифракционная картина для немагнитных фракций. Изучение дифракционных картин показало, что в основном фазовый состав немагнитных фракций представлен кварцем и полевыми шпатами. С учетом химического состава можно полевые шпаты представить смесью микроклина KAlSi_3O_8 и плагиоклаза с составом близким к лабрадору $(\text{Ca},\text{Na})(\text{Al}_{1,5}\text{Si}_{2,5})\text{O}_8$.

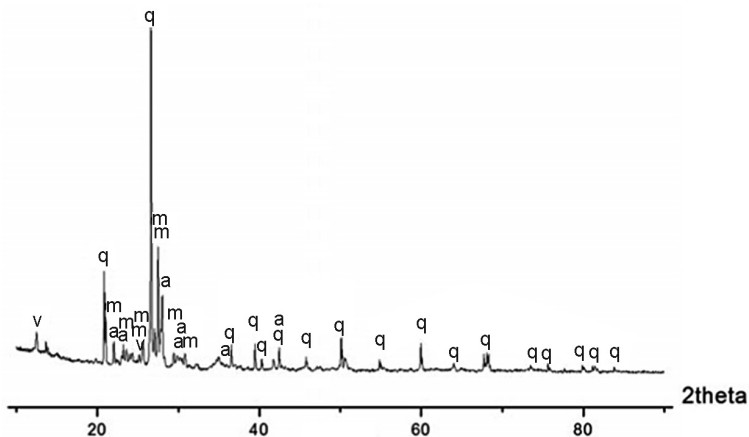


Рис. 4. Дифракционная картина (Cu излучение) немагнитной фракции +71 мкм. Показаны пики кварца q, микроклина m, полевого шпата (лабрадора) а, хлоритоида v

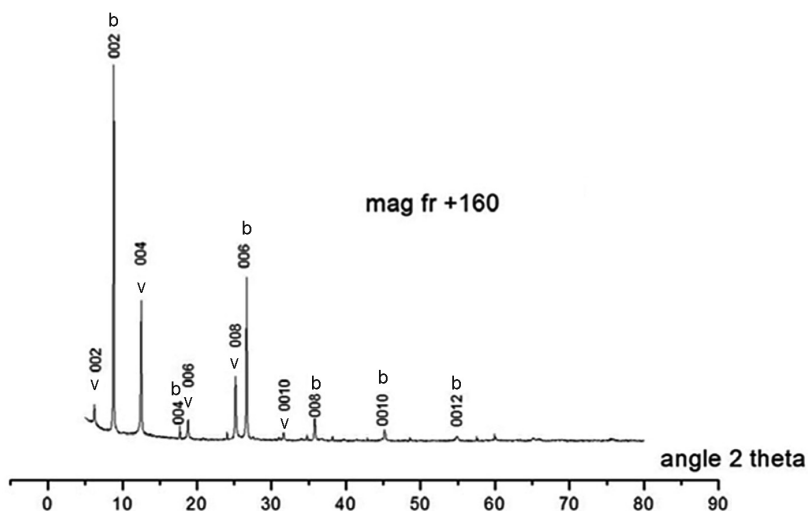


Рис. 5. Дифракционная картина магнитной фракции +160 мкм. Показаны пики биотита *b* и хлоритоида (хлорита, вермикулита) *v*

В магнитных фракциях, наряду с остатками кварца и полевых шпатов, наблюдается слоистые минералы слюд — биотит и хлоритоиды (хлорит, вермикулит, или смешанно слоистые минералы, близкие к ним).

Дифракционная картина магнитной фракции показана на рис. 5.

Химический анализ по основным элементам

Результаты рентгенофлуоресцентного анализа по основным элементам, которые использовались для расчетов фазо-

вого состава, приведены в табл. 4 (обозначения фракций приведены в табл. 5).

Высокая точность данных, продемонстрированная на рис. 6, позволяет строить корреляции между содержаниями элементов и получать важную информацию о минералах и их составе. Минимальная надежность относится к потерям при прокаливании, которые отражают процессы с разными знаками для массы — потери адсорбированной и кристаллизационной воды, дегидроксилирования, окисления Fe^{2+} .

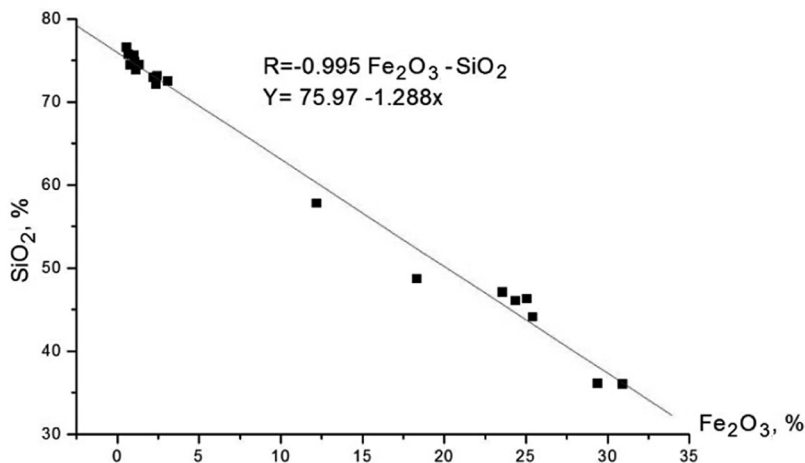


Рис. 6. Корреляция между содержаниями оксидов железа и кремния

Таблица 4

Содержание основных элементов

№	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	ппп
1	36,10	2,50	18,28	29,39	0,34	4,28	0,65	0,43	5,18	2,55
2	48,66	2,02	16,88	18,36	0,11	3,18	0,84	1,28	5,93	2,11
3	74,42	0,10	13,41	0,82	0,02	0,28	1,06	2,41	6,28	0,80
4	36,01	2,02	18,76	30,92	0,55	3,87	0,73	0,42	3,87	2,42
5	57,77	1,30	15,40	12,20	0,09	2,13	0,94	1,66	5,50	1,91
6	74,41	0,17	13,06	1,34	0,02	0,39	1,10	2,34	6,01	0,93
7	44,07	1,48	17,93	25,44	0,58	2,85	0,95	0,82	3,82	1,90
8	74,78	0,13	12,50	1,07	0,02	0,32	1,15	2,20	5,77	0,82
9	76,52	0,09	12,18	0,57	0,01	0,23	1,12	2,21	5,73	0,68
10	47,08	1,31	17,38	23,57	0,54	2,67	0,94	0,97	3,97	1,61
11	73,78	0,15	12,79	1,17	0,02	0,39	1,29	2,22	5,80	1,12
12	46,27	1,00	17,70	25,08	0,79	2,21	1,07	0,90	3,18	1,46
13	75,72	0,12	12,34	0,69	0,01	0,29	1,26	2,17	5,82	0,80
14	75,60	0,13	12,52	1,03	0,02	0,31	1,25	2,18	5,87	0,93
15	46,05	1,13	17,50	24,38	0,72	2,42	1,13	0,89	3,32	1,57
16	72,46	0,23	12,68	3,10	0,07	0,52	1,27	1,99	5,49	0,87
17	73,11	0,22	12,69	2,45	0,06	0,44	1,29	2,05	5,70	0,79
18	72,90	0,25	12,75	2,24	0,05	0,45	1,34	2,08	5,82	0,96
19	72,05	0,28	12,91	2,38	0,06	0,47	1,41	2,06	5,93	1,01

Таблица 5

Содержание минорных элементов

Образец №	1	2	3	4	9	15	19
Zr	300	300	300	200	30	300	400
Sc	40	20	20	20	<2	50	5
Y	60	20	20	70	2	200	50
La	<1	<1	<1	<1	<1	90	10
Ce	60	20	8	40	4	5	60
Pr	5	6	<1	4	<1	20	5
Nd	<1	<1	<1	<1	<1	90	10
Sm	4	3	<1	<1	<1	20	3
Eu	0,3	0,3	0,6	0,2	0,3	0,8	0,9
Gd	5	2	<0,4	4	<0,4	40	5
Tb	1	0,4	0,1	0,9	0,1	7	1
Dy	8	3	0,8	9	0,5	40	7
Ho	2	0,7	0,2	0,3	0,1	10	1
Er	8	3	0,5	10	0,3	40	5
Tm	1	0,5	0,1	2	0,05	7	0,8
Yb	<1	<1	<1	<1	<1	9	2
Lu	<1	<1	<1	<1	<1	2	<1

Химический анализ по минорным элементам

Результаты химического анализа по минорным элементам, полученные масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой (МС-ИСП), приведены в табл. 5.

В составе гранитной пыли не обнаружено благородных металлов, а также урана, тория и ряда других элементов. В магнитных фракциях наблюдается повышенное содержание РЗЭ (вместе с Y и Sc), которые ведут себя симбатно, за исключением церия [8].

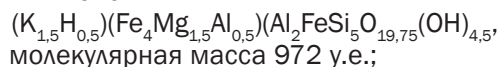
Заметное содержание РЗЭ наблюдается в образце № 19 (фракция -40) из-за того, что невозможно выделить магнитные фракции вследствие наличия тонкой пыли. Сильное концентрирование РЗЭ наблюдается в тонкой магнитной фракции. Методом корреляций не подтверждается наличие обычных для РЗЭ минералов.

В совокупности это позволяет полагать, что концентрирование РЗЭ произошло преимущественно на тонких частицах минералов слюд в результате абсорбции из водных растворов.

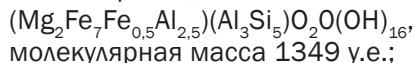
Фазовый состав фракций

Фазовый состав фракций был рассчитан количественно исходя из 5 минералов, надежно фиксируемых рентгенофазовым анализом. Состав минералов определялся итерацией на образце № 1. Определенные формулы минералов и использовались для всех фракций, включая магнитные:

- биотит



- хлоритоид



- полевой шпат микроклин $KAlSi_3O_8$, молекулярная масса 278 у.е.;

Таблица 6

Фазовый состав фракций гранитной пыли

№	Фракция	Кварц	Микроклин	Лабрадор	Биотит	Хлоритоид
1	+200 маг.	1	17	7	38	37
2	+200 слабомаг.	10	29	13	24	24
3	+200 немаг.	38	38	22	1	1
4	+160 маг.	1,5	9,5	12	41	36
5	+160 слабомаг.	20	30	18	17	15
6	+160 немаг.	37	38	22	1	2
7	+140 маг.	10	15	13	29	33
8	+140 немаг.	38	37	22	1	2
9	+125 немаг.	40	36,5	22	0,5	1
10	94–160 маг.	14	14,5	14,5	27	30
11	+94 немаг.	39	37	20	1	3
12	+80 маг.	14	12	15	27	32
13	+80 немаг.	39	37	22	1	1
14	+71 немаг.	40	36	22	1	1
15	+71 маг.	14	12	17	25	32
16	+64	37	34	22	3	4
17	+56	38	33	22	3	4
18	+40	38	33	22	3	4
19	-40	38	33	22	3	4

Таблица 7

Фазовый состав ситовых фракций

№	Размер, мкм	Доля, %	Кварц	Микроклин	Лабрадор	Биотит	Хлоритоид
1	+200	17,4	35,3	36,9	21,1	3,4	3,3
2	+160	18,9	35,5	37,0	21,6	2,6	3,3
3	+140	5,95	35,9	35,4	21,4	3,0	4,3
4	+125	15,3	38,2	35,0	21,5	2,3	3,0
5	+94	8,2	37,1	35,2	19,6	3,0	5,1
6	+80	7,7	36,9	34,9	21,4	3,2	3,6
7	+71	3,95	38,0	34,4	21,6	2,7	3,3
8	+64	5,35	37,0	34,0	22,0	3,0	4,0
9	+56	3,45	38,0	33,0	22,0	3,0	4,0
10	+40	7,7	38,0	33,0	22,0	3,0	4,0
11	-40	6,1	38,0	33,0	22,0	3,0	4,0
		100	37(1)	34,7(1,4)	21,5(0,7)	2,9(0,3)	3,8(0,6)

• натрий-кальциевый полевой шпат, близкий к лабрадору $\text{Ca}_{0,9}\text{Na}_{1,1}\text{Al}_{2,9}\text{Si}_{5,1}\text{O}_{16}$, молекулярная масса 538 у.е.;

• кварц SiO_2 .

Минеральный состав фракций определяется в несколько итераций с точностью 0,5%. Состав приведен в табл. 6.

Следует отметить, что в формуле биотита структурные позиции калия частично замещены протонами или вакантны из-за выщелачивания или изоморфного замещения при ионном обмене. Минорные примеси входят в состав минералов, но не учитывались в формуле за исключением титана, марганца, никеля, хрома, которые объединялись в виде общего содержания железа. Это обстоятельство подкрепляется высокой степенью корреляции железа с этими элементами. Полученные данные пересчитаны на фракции по размерам частиц. Хорошо видно по данным в табл. 7, что размерный фактор не проявляется — различия в доле минералов в разных фракциях сопоставимы с погрешностью количественного определения фазового состава.

Анализ результатов комплексного исследования и предложения

Некоторые закономерности при дроблении гранита

Применительно к технологии производства гранитного щебня можно отметить ряд тенденций и закономерностей. В процессе дробления гранита помимо товарных фракций щебня образуются отходы (гранитная пыль). Их доля оценивается в 0,1%. Пылевые фракции представляют собой преимущественно механическую смесь минералов, слагающих граниты — кварц, полевые шпаты, минералы слюд. Повышенное содержание РЗЭ, особенно в тонких магнитных фракциях можно назвать авто-обогащением. Этот процесс абсорбции происходил одновременно с метаморфизмом пород при воздействии природных вод с растворенными минорными элементами. Дальнейшее обогащение по РЗЭ при переработке не представляет собой сложной задачи в сравнении с обычными минералами РЗЭ из-за ассоциации с магнитными минералами и ввиду высокой селективности магнитной сепара-

ции. Вдобавок, обычные минералы, содержащие РЗЭ (монацит, ксенотим, лопарит, эвдиалит и др.), требуют больших энергетических затрат при вскрытии. Повышенное содержание циркония, иттрия и церия во фракции -40 свидетельствует о возможном присутствии акцессорного минерала циркона $Zr(Y,Ce)SiO_4$.

Установленные закономерности могут представлять значительный интерес при добыче руд, которые включают акцессорные минералы, содержащие РЗЭ и другие ценные элементы, либо находясь в зоне действия водных потоков с гранитных массивов, подвергающихся химическому выветриванию [8].

Оценка экономических показателей

Главным продуктом (до 90% доходов) при комплексной переработке гранитной пыли может являться полевошпатовый песок, если снизить содержание железа до уровня менее 1%. Выделение магнитной фракции делает остаток из кварца и полевых шпатов чистым для использования в других отраслях. Они представляют интерес как сырье для стекольной, фарфоровой и строительной индустрии [9–12]. В пользу комплексной переработки говорит и тот факт, что конкурентные производства на основе сухой технологии сепарации тонкодисперсного техногенного сырья могут быть созданы в регионах без развитой инфраструктуры.

Очень перспективным является концентрат редких элементов с общим со-

держанием порядка 0,03%. Наибольший интерес представляют иттрий, скандий, неодим, тулий. Относительная легкость предварительного магнитного обогащения и последующего химического выщелачивания РЗЭ из минералов слюды позволяет рассчитывать на относительно низкие затраты получения их концентрата для последующего разделения экстракционными химическими технологиями. Коммерческий потенциал техногенного сырья лежит в диапазоне от 60 до 465 US\$/Т (для сравнения — цена щебня тонких фракций составляет порядка 10 US\$/Т).

Выводы

1. Состав фракций гранитной пыли представлен механической смесью составляющих гранит минералов.

2. При комплексной сухой переработке гранитной пыли, не требующей значительных энергетических затрат, практически не остается отходов. Товарными продуктами являются кварцевый песок, полевошпатовый песок, магнитная фракция как предварительный концентрат РЗЭ. Коммерческий потенциал техногенного сырья оценивается в диапазоне от 60 до 465 US\$/Т, т.е. на порядок дороже основной продукции — гранитного щебня.

3. Полученный в работе паспорт техногенного сырья позволяет сформулировать техническое задание на разработку технологической схемы сухой технологии комплексной переработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Состояние и использование минерально-сырьевых ресурсов РФ*. Информационно-аналитический центр «Минерал». — М., 2013. — URL:<http://www.mineral.ru>.
2. *Mineral Commodity Summaries. Rare Earth Elements*/ U.S.Geological Survey. — 2014.
3. *Зырянов В. В., Зырянов Д. В.* Зола уноса — техногенное сырье. — М.: Маска, 2009. — 320 с.
4. *Zyryanov V. V., Kovalevski V. V., Petrov S. A., Matvienko A. A.* Nanomaterials from Shungite rocks // *Inorg. Mater.* 2012. Vol. 48, No. 11, pp. 1102–1110.
5. *Абрамов А. А.* Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых. Т.1. Обогащительные процессы и аппараты. — М.: МГУ, 2001. — 472 с.
6. *Lehtinen Larry J.* Process for wet high intensity magnetic separation with flux amplifying matrix. Patent US2013341250 (A1). 2013-12-26.

7. Зырянов В. В. Сухие методы получения и разделения порошков с использованием механических операций // Наука производству. — 2002. — Т. 2. — С. 52–57.

8. Nakajima T., Terakado Y. Rare elements in stream waters from Rokko granite area, Japan: effect of weathering degree of watershed rocks // *Geochemical Journal*. 2003, Vol. 37, pp. 181–198.

9. Vijayalakshmi M., Sekar A. S. S., Sivabharathy M., Ganesh Prabhu G. Utilization of Granite Powder Waste in Concrete Production // *Defect and Diffusion Forum*. 2012. Vol. 330, pp. 49–61.

10. Dhanapandiani S., Gnanaveli B., Ramkumar T. Utilization of granite and marble sawing powder wastes as brick materials // *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*. October 2009. Vol. 4, No. 2, pp. 147–160.

11. Venkata Avanthi Sailalasa P., Srinivasula Reddy M. A Study on Granite Saw Dust & Fly Ash Blended Geopolymer Concrete Behavior with Various NaOH Molarities // *IJSR*. September 2015. Vol. 4, No 9, pp. 733–737.

12. Elangovan G. Experimental study of concrete by partial replacement of cement with granite dust powder // *IJETS*. June 015, Vol. 2, Issue 6, pp. 22–28. **ПИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Губайдулин Виталий Мэлиссович¹ — генеральный директор,
e-mail: mail@promstroyvzryv.ru,

Бригадин Иван Владимирович¹ — кандидат технических наук,
научный консультант, старший научный сотрудник,
e-mail: IvanBrigadin2008@yandex.ru,

Зырянов Владимир Васильевич — доктор химических наук,
старший научный сотрудник, e-mail: vladinetta@gmail.com,

Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,

Самойлов Антон Викторович — генеральный директор, ООО «ЭвриТег»,

¹ ООО «Промстройвзрыв».

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 1, pp. 190–200.

V.M. Gubaydullin, I.V. Brigadin, V.V. Zyryanov, A.V. Samoylov

AUTOPROCESSING OF MICRON SIZE PARTICLES OF GRANITE

A sample of common production waste—granite dust after granite processing at a deposit at the Karelian Isthmus—is examined using the instrumental methods of analysis. Out of the obtained close-cut sieve fractions from +200 to -40 μm, magnetic fractions are recovered. These fractions are studied using SEM/EDS and XRD, and their bulk densities are measured. The chemical compositions are determined from the X-ray fluorescence analysis of major elements and by inductively coupled plasma mass spectrometry of minor elements. The quantitative phase compositions of the fractions are assessed. The dust contains 5 major minerals of granite: quartz, feldspar—microcline and plagioclases, mica—biotite and chloritoid. The phase composition slightly changes with the size of particles. The content of rare earth elements, as well as scandium and yttrium is increased in the magnetic fractions of mica, and the maximum content of rare earth elements is observed in the fine fractions. By economic estimates, in integrated processing of granite dust, up to 90% income can be brought by the main product—feldspathic sand given iron content is decreased below 1%. Very promising is the concentrate of rare earth elements at the general content of 0.03%. Of the highest interest are Y, Sc, Nd, Tm. The comparative simplicity of dissociation of mica minerals with absorbed REE promises low cost of their concentration for the further recovery of rare earth elements.

Key words: granite dust, production waste, efficient nature management, integrated processing, phase composition, feldspathic sand, rare earth elements.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-190-200

AUTHORS

Gubaydullin V.M.¹, General Director, e-mail: mail@promstroyvzryv.ru,
Brigadin I.V.¹, Candidate of Technical Sciences, Scientific Adviser,
Senior Researcher, e-mail: IvanBrigadin2008@yandex.ru,
Zyryanov V.V., Doctor of Chemical Sciences, Senior Researcher,
Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630128, Russia, e-mail: vladinetta@gmail.com,
Samoylov A.V., General Director, Everytag Ltd., 107140, Moscow, Russia,
¹ Promstroyvzryv Ltd., Saint Petersburg, Russia.

REFERENCES

1. *Sostoyanie i ispol'zovanie mineral'no-syr'evykh resursov RF*. Informatsionno-analiticheskiy tsentr «Mineral» (Condition and use of mineral resources in Russia. Mineral Information Analysis Center), Moscow, 2013, available at: <http://www.mineral.ru>.
2. Mineral Commodity Summaries. Rare Earth Elements. *U.S. Geological Survey*. 2014.
3. Zyryanov V.V., Zyryanov D.V. *Zola unosa tekhnogennoe syr'e* (Fly ash, production waste), Moscow, Maska, 2009, 320 p.
4. Zyryanov V.V., Kovalevski V.V., Petrov S.A., Matvienko A.A. Nanomaterials from Shungite rocks. *Inorg. Mater.* 2012. Vol. 48, No. 11, pp. 1102–1110.
5. Abramov A.A. *Pererabotka, obogashchenie i kompleksnoe ispol'zovanie tverdykh poleznykh iskopaemykh*. T.1. Obogatitel'nye protsessy i apparaty (Conversion, processing and integrated utilization of hard minerals, vol. 1. Dressing processes and equipment), Moscow, MGGU, 2001, 472 p.
6. Lehtinen Larry J. *Patent US2013341250 (A1)*. Process for wet high intensity magnetic separation with flux amplifying matrix. 2013.12.26.
7. Zyryanov V.V. *Nauka proizvodstvu*. 2002, vol. 2, pp. 52–57.
8. Nakajima T., Terakado Y. Rare elements in stream waters from Rokko granite area, Japan: effect of weathering degree of watershed rocks. *Geochemical Journal*. 2003, Vol. 37, pp. 181–198.
9. Vijayalakshmi M., Sekar A.S.S., Sivabharathy M., Ganesh Prabhu G. Utilization of Granite Powder Waste in Concrete Production. *Defect and Diffusion Forum*. 2012. Vol. 330, pp. 49–61.
10. Dhanapandiani S., Gnanaveli B., Ramkumar T. Utilization of granite and marble sawing powder wastes as brick materials. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*. October 2009. Vol. 4, No. 2, pp. 147–160.
11. Venkata Avanthi Sailalasa P., Srinivasula Reddy M. A Study on Granite Saw Dust & Fly Ash Blended Geopolymer Concrete Behavior with Various NaOH Molarities. *IJSR*. September 2015. Vol. 4, No 9, pp. 733–737.
12. Elangovan G. Experimental study of concrete by partial replacement of cement with granite dust powder. *IJETS*. June 015, Vol. 2, Issue 6, pp. 22–28.

FIGURES

- Fig. 1. SEM image of +125 μm fraction: nonmagnetic (a), weakly magnetic (b), magnetic (v).
Fig. 2. Mica particle.
Fig. 3. Amphibole particle in magnetic fraction of biotite: fraction +200, fraction +94.
Fig. 4. Diffraction pattern (Cu emission) of nonmagnetic fraction +71 μm . Peaks of quartz *q*, microcline *m*, feldspar (labradorite) *a*, chloritoid *v*.
Fig. 5. Diffraction pattern of magnetic fraction +160 μm . Peaks of biotite *b* and chloritoid (chlorite, vermiculite) *v*.
Fig. 6. Correlation of contents of iron and silica oxides.

TABLES

- Table 1. Fraction composition of a sample.
Table 2. Characteristic elemental composition of nonmagnetic fractions.
Table 3. Elemental composition of magnetic fractions.
Table 4. Content of major elements.
Table 5. Content of minor elements.
Table 6. Phase composition of fractions of granite dust.
Table 7. Phase composition of sieve fractions.