

УДК 622.7

ГРАВИТАЦИОННАЯ И МАГНИТНАЯ СЕПАРАЦИЯ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО  
ПЕГМАТИТА С КАРЬЕРА ВАДИ-ЭЛЬ-ШЕЙХ, ЕГИПЕТ

Мохаммед Ф. Раслан<sup>1</sup>, Шериф Харбиш<sup>2</sup>, Мона М. Фавзи<sup>1</sup>,  
Мохаммед М. Эль Дабе<sup>1</sup>, Май М. Фази<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Управление ядерными материалами Египта,  
E-mail: mml\_fawzy@yahoo.com, Магистраль Каир-Суэц, г. Эль Маади, Египет  
<sup>2</sup>Суэцкий университет, 43518, г. Эль Салам, Египет

В ходе минералогического анализа сыпучих образцов пегматита обнаружено наличие тяжелых полиметаллических минералов с массовой долей 7.59%: эвксенита, фергусонита, алланита, ксенотима, ураноторита и циркона. Рассмотрено применение магнитного сепаратора высокой интенсивности совместно с этапами гравитационной предварительной концентрации на вибростоле для извлечения редких металлов из образцов гранитоидного пегматита с карьера Вади-эль-Шейх. Результаты магнитной сепарации проверены путем точного магнитного измерения свойств чистых одиночных минералов в кристаллической форме с помощью вибромагнитометра.

*Минерализация редких металлов, физическая концентрация, вибромагнитометр, пегматит с карьера Вади-эль-Шейх*

DOI: 10.15372/FTPRPI20210216

Гранитоидный пегматит добыт из карьера Вади-эль-Шейх, расположенного в Восточной пустыне Египта. Рассматриваемая область покрыта серыми гранитами, среди которых встречаются фельзитовые и базальтовые жилы, множество постмагнитных пегматитов. Детальная геологическая, структурная и петрографическая характеристика пегматита представлена в [1], минералогический состав пегматита с карьера Вади-эль-Шейх — в [2]. Пегматит содержит экономически ценные полиметаллические минералы: эвксенит (Y, Ca, Ce, U, Th)(Nb, Ta, Ti)<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, фергусонит YNbO<sub>4</sub>, алланит (Ca, REE, Th)<sub>2</sub>(Fe<sup>2+</sup>, Al)<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub>(OH), ксенитом YPO<sub>4</sub>, ураноторит и циркон ZrSiO<sub>4</sub>. Также в нем имеются пустые минералы (кварц, полевошпат, слюда и оксиды железа в форме магнетита).

В ходе исследований обнаружено наличие минерализаций редких металлов в граните-пегматите, включая оксиды Nb–Ta и циркона [3–12]. Большая часть полиметаллических минералов обогащается сочетанием отдельных операций, таких как гравитационная концентрация, магнитная сепарация и пенная флотация. В случае с минерализациями редких металлов

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Управления ядерных материалов Арабской Республики Египет.

наиболее эффективны гравитационная концентрация и магнитная сепарация. Гравитационная концентрация используется для отделения полезных частиц с относительно высокой удельной плотностью путем удаления пустых частиц с малой удельной плотностью, например кварца или полевого шпата. В рамках обогащения минералов магнитная сепарация преследует две цели: удаление ферромагнитных минералов (магнетит) с помощью магнитных сепараторов низкой интенсивности и концентрация требуемых парамагнитных минералов (ильменит, рутил, вольфрамит, моназит, ксенотим, хромит, фергусонит и алланит) с помощью магнитных сепараторов высокой интенсивности [13–19]. Физическое обогащение образца полиметаллического минерализованного пегматита с карьера Вади-эль-Шейх выполнено с целью получения концентрата с высоким содержанием минералов, который может применяться в качестве сырья для химического извлечения экономически ценных элементов, необходимых в разных отраслях промышленности [20, 21].

Цель настоящей работы — исследование магнитных свойств редкометаллических и пустых минералов, входящих в состав пегматита с карьера Вади-эль-Шейх, с помощью вибромагнитометра. Полученные данные использовались при магнитной сепарации высокой интенсивности совместно с предварительной концентрацией редких ценных минералов и удалением пустых минералов на вибростоле.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходным материалом служил пегматит из гранитоидов карьера Вади-эль-Шейх, содержащий редкие металлы. Он измельчался до фракции с верхней границей 1 мм в щековой дробилке. Минералогическим анализом содержания тяжелых минералов в сыпучем образце пегматита установлена массовая доля тяжелых металлов (7.59%). Чистые мономинеральные образцы, используемые для измерений вибромагнитометром, получены отделением в тяжелой жидкости-бромформе (удельная плотность  $2.89 \text{ г/см}^3$ ). Зерна чистого минерала извлекались вручную из тяжелой фракции под бинокулярным микроскопом. Некоторые зерна анализировались рентгеновской дифракцией с помощью генератора рентгеновского излучения Philips PW3710/31 и дифрактометром с автоматическим изменением образцов PW1775 (21 позиция).

Магнитные свойства материала измерялись вибромагнитометром, спроектированным специально для определения разницы между магнитными свойствами минералов как функции интенсивности наведенного магнитного поля путем получения петли гистерезиса. В работе использовался вибромагнитометр LakeShore серии 7300. Измерения проводились в Национальном исследовательском центре Египта.

Образцы каждого чистого, вручную отобранного минерала, массой 29–89 мг помещались в камеру вибромагнитометра и подвергались синусоидальной вибрации перпендикулярно наведенному магнитному полю. В результате в измерительных катушках возникало напряжение, пропорциональное магнитному моменту образца, наряду с сигналом от датчика Холла, измеряющего наведенное магнитное поле. Эти сигналы преобразовывались для создания петли магнитного гистерезиса между 2 и  $-2 \text{ Тл}$ . Эта же процедура проводилась с пустой камерой до измерения образцов минерала с целью учета магнитного влияния от образца.

Непосредственный выходной параметр вибромагнитометра — магнитный момент образца, конвертируемый в намагничивание при делении на объем образца. Значения магнитной индукции преобразуются в интенсивность магнитного поля с помощью постоянной магнитной проницаемости вакуума  $12.566 \cdot 10^{-7} \text{ НА}^{-2}$  [16, 22]. На рис. 1 представлено типовое поведение диа-

магнетиков, парамагнетиков и ферромагнетиков. Диамагнитный материал из-за невыровненных магнитных диполей сопротивляется по линиям наведенного магнитного поля, в результате наблюдается небольшая отрицательная линейная вариация намагничивания при увеличении наведенного магнитного поля [23, 24]. Парамагнитный материал показывает положительное линейное увеличение намагничивания, так как более интенсивное наведенное магнитное поле способствует образованию большего количества диполей в материале по линии [24]. Намагничивание ферромагнитного материала резко возрастает при относительно низкой интенсивности наведенного поля, пока не достигает точки насыщения, после которой увеличение интенсивности данного поля минимально влияет на намагничивание (рис. 1).

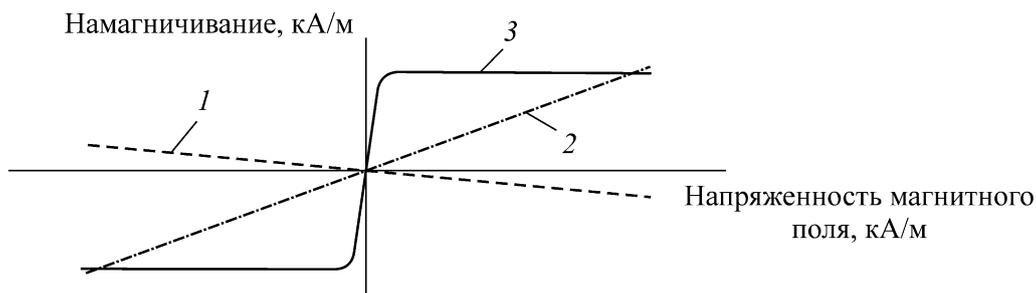


Рис. 1. Результаты измерения намагничивания вибромагнитометром для диамагнитных (1), парамагнитных (2) и ферромагнитных (3) материалов

Объяснение столь быстрого увеличения намагничивания заключается в том, что магнитные диполи в ферромагнитном материале способны взаимодействовать друг с другом. При этом образуются магнитные области, позволяющие быстро выстраивать в линию магнитные диполи при относительно низкой интенсивности магнитного поля [23]. Плато намагничивания, возникающее после насыщения намагничиванием ферромагнитного материала, характеризуется крайне низкой способностью дальнейшего выстраивания диполей в линии, так как магнитные области уже выстроились. Насыщение намагничиванием представляет собой характеристику ферромагнитного материала и используется для определения ферромагнитной фракции при сочетании пара- и ферромагнитных материалов [24, 26].

Мономинеральные образцы эвксинита, алланита и циркона экспериментально анализировались вибромагнитометром для определения магнитного поведения данных материалов перед концентрацией образцов пегматита. Также анализировались мономинеральные образцы пустых минералов (кварц, полевой шпат и магнетит).

Методика концентрации пегматита включает в себя два этапа: гравитационная концентрация на лабораторном вибростоле Уилфли и магнитная сепарация на сухом магнитном сепараторе высокой интенсивности подъемного типа Карпко модель MLH (13) III-5. Различные размерные фракции тяжелых минералов и их продукты после концентрации определялись с помощью анализа сепарации в тяжелой жидкости. Первый этап заключался в предварительной концентрации, второй — в магнитной сепарации, позволяющей получать окончательный концентрат.

Гравитационная концентрация осуществлялась для отделения легких пустых минералов и получения концентрата тяжелых минералов. Оптимальное значение исходной пульпы для вибростола составляет 25 % твердого вещества от всей массы. Вибростол использовался для концентрации разных тяжелых минералов (касситерит, магнетит, колумбит, слюда, барит, циркон),

а также с меньшей эффективностью материалов, содержащих золото (серебро, торий и уран). Вибростолы применяются в переработке утилизированной электроники для извлечения ценных металлов [27]. Концентрация на столе характеризуется такими параметрами, как скорость подачи, плотность вымывающей воды, плотность исходной пульпы, угол наклона деки, диапазон амплитуды размера частиц, форма частиц и форма деки. Магнитная сепарация проводится для отделения парамагнитных или слабомагнитных материалов от немагнитных.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Подготовка подходящего материала для обогащения — предварительный и важный этап получения максимальной эффективности используемого оборудования. Размер частиц исходного материала играет ключевую роль при сепарации. С увеличением размера частиц уменьшается ее эффективность [27–31]. Корректная степень свободы — фактор успеха обработки минералов [32]. Для уменьшения размера частиц образцов до верхней границы 1 мм выполнено управляемое измельчение (дробление и помол) сыпучего пегматита. Пегматит измельчался в щековой дробилке и шаровой мельнице. Частицы размером < 1 мм помещались в обесшламливающий конус. Обесшламленные частицы с фракцией < 1 мм высушивались и просеивались через сита с размерами ячеек 1000, 700, 500, 250, 125, 45 мкм. На рис. 2 показано распределение частиц пегматита по размеру. Видно, что  $d_{80}$  и  $d_{50}$  составляют 900 и 500 мкм.

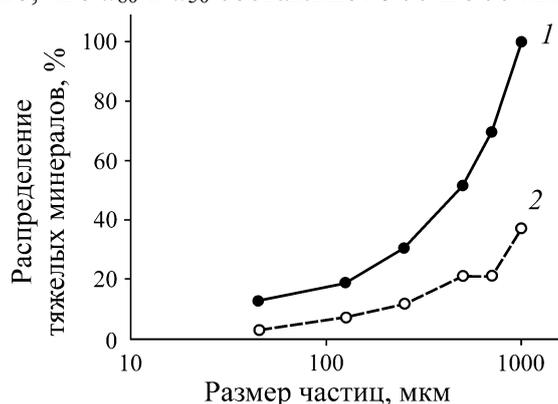


Рис. 2. Распределение частиц исходных образцов по размеру и их связь с кумулятивной долей просеивания (1) и распределением тяжелых минералов (2)

Вспомогательные образцы (50 г) на каждой фракции > 45 мкм подверглись жидкой сепарации с помощью бромформа (удельная плотность 2.89 г/см<sup>3</sup>) для оценки содержания тяжелых минералов. Тяжелые продукты жидкой сепарации промывались ацетоном, высушивались и взвешивались. Просмотр под микроскопом тяжелых продуктов жидкой сепарации (тяжелых и легких фракций) подтвердил выполнение хорошей чистой сепарации, т. е. размерная фракция тяжелых продуктов – 1000 + 700 мкм все еще содержит закрытые частицы кварца полевого шпата, но для практической цели сепарации общая степень свободы достигнута. Легкие фракции (удельная плотность < 2.89 г/см<sup>3</sup>) состоят в основном из кварца и полевого шпата, тяжелые — из эвксенита, фергусонита, алланита, ксенотима, ураноторита, циркона и магнетита.

На рис. 2 и в табл. 1 приведены результаты анализа распределения частиц по размеру, а также распределение тяжелых минералов по размерным фракциям. Измельчение позволило сохранить большую часть исходной массы (91.78%) в диапазоне фракций – 1000 + 45 мкм при максимально возможном сокращении мелких частиц – 45 мкм. Выявлено, что 97.36% от исходного содержания тяжелых металлов сохранено в 91.78% массы в рассматриваемом размерном диапазоне. Содержание тяжелых минералов уменьшается с сокращением размера подачи.

ТАБЛИЦА 1. Гранулометрический анализ и анализ распределения тяжелых минералов по разным размерным фракциям, %

Размерная фракция, мкм	Массовая доля	Кумулятивная доля просеивания	Содержание тяжелых минералов	Распределение тяжелых минералов
– 1000 + 700	30.48	100.00	9.10	36.50
– 700 + 500	18.16	69.52	8.60	20.55
– 500 + 250	21.04	51.36	7.60	21.08
– 250 + 125	11.72	30.32	7.50	11.59
– 125 + 45	10.38	18.60	5.50	7.50
Обесшламленный материал – 1000 + 45	91.78	—	7.38	97.23
– 45	3.90	8.22	5.50	2.77
Шлам	4.32	4.32	—	—
Исходный материал	100.00	0.00	7.59	100.00

Гранитоидный пегматит с карьера Вади-эль-Шейх имеет грубую кристаллическую форму, его частицы хорошо отделены друг от друга при размере – 1000 мкм, т. е. предрасположены к обогащению, и обычная гравитационная концентрация на вибростоле способна отделить легкие пустые частицы кварца и полевого шпата от тяжелых.

Для получения основного концентрата тяжелых минералов обесшламленные фракции – 1000 + 700, – 700 + 500, – 500 + 250, – 250 + 125 и – 125 + 45 мкм отдельно друг от друга помещались на вибростол Уилфли с целью минимизировать количество сыпучих легких пустых минералов и получить чистый концентрат тяжелых минералов для каждой фракции. Данная операция оптимизирована за счет уменьшения подачи сырья и воды, уменьшения наклона деки, уменьшения длины хода и скорости движения деки. Окончательный концентрат и хвосты обогащения каждой фракции собирались, просушивались и взвешивались. С помощью бромформа выполнялась жидкостная сепарация образцов каждой фракции для оценки состава тяжелых минералов и расчета распределения. Установлено, что в состав концентрата входят эвксенит, фергусонит, алланит, ксенотим, ураноторит, циркон и магнетит, в хвосты — кварц и полевой шпат.

В табл. 2 представлен баланс вещества, полученный в результате концентрации каждой фракции. Результаты размерной фракции – 1000 + 750 мкм показали, что содержание тяжелых минералов возросло с 9.1 до 51.76 % при массовой доле 4.54 %, т. е. 30.97 из 36.50 % тяжелых минералов сохранено в концентрате, с другой стороны, 5.43 % тяжелых минералов осталось в хвостах. Очевидно, что размерная фракция – 125 + 45 мкм наиболее эффективна для гравитационной концентрации, так как доля тяжелых минералов увеличилась с 5.50 до 81.25 % (6.84 из 7.50 % тяжелых минералов сохранено в концентрате с долей извлечения 91.2 % при массовой доле 0.64 %).

На рис. 3 показаны графики намагничивания как функции интенсивности магнитного поля выбранных чистых минералов, представляющих пустые минералы, входящие в состав пегматита (магнетит, кварц и полевой шпат). Магнетит проявляет отчетливые ферромагнитные свойства с высоким магнитным насыщением (36.551 ЭМЕ/г, ЭМЕ — электромагнитная единица).

ТАБЛИЦА 2. Результаты гравитационной концентрации на вибростоле образца пегматита, %

Размерная фракция, мкм	Продукт концентрации	Массовая доля	Содержание тяжелых металлов	Распределение тяжелых металлов
– 1000 + 700	Концентрат	4.54	51.76	30.97
	Хвосты	25.94	1.60	5.53
	Сырье	30.48	9.10	36.50
– 700 + 500	Концентрат	1.34	87.31	15.41
	Хвосты	16.82	2.30	5.14
	Сырье	18.16	8.60	20.55
– 500 + 250	Концентрат	1.98	63.13	16.47
	Хвосты	19.06	1.84	4.61
	Сырье	21.04	7.60	21.08
– 250 + 125	Концентрат	0.96	76.04	9.61
	Хвосты	10.76	1.40	1.98
	Сырье	11.72	7.50	11.59
– 125 + 45	Концентрат	0.64	81.25	6.84
	Хвосты	9.74	0.56	0.66
	Сырье	10.38	5.50	7.50

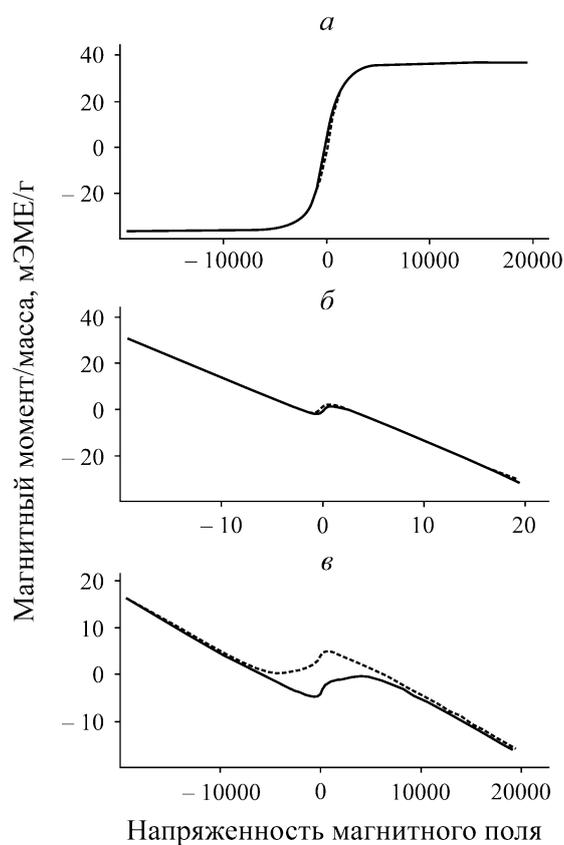


Рис. 3. Влияние напряженности наведенного магнитного поля на поведение чистых мономинеральных кристаллов магнетита (а), кварца (б) и полевого шпата (в) при измерении вибромагнитометром

На рис. 4 представлены результаты измерения для парамагнитных минералов эвксенита, фергусонита и алланита. Основной тренд для данных минералов — линейный и имеет сходство с типовым парамагнитным трендом на рис. 1. Парамагнетизм минералов связан с содержанием в них редкоземельных элементов, обладающих набором электронов на подуровне 4f и имеющих неуравновешенные магнитные моменты, влияющие на материал с некой степенью намагничивания [15]. Магнитная предрасположенность отдельных редкоземельных элементов рассчитана в [33] и используется для прогноза магнитной предрасположенности редкоземельных минералов, в основе которых лежат их химические свойства и кристаллографическая структура. В [15] показано, что редкоземельные элементы от гадолиния до эрбия обладают наибольшей магнитной предрасположенностью среди всех лантаноидов.

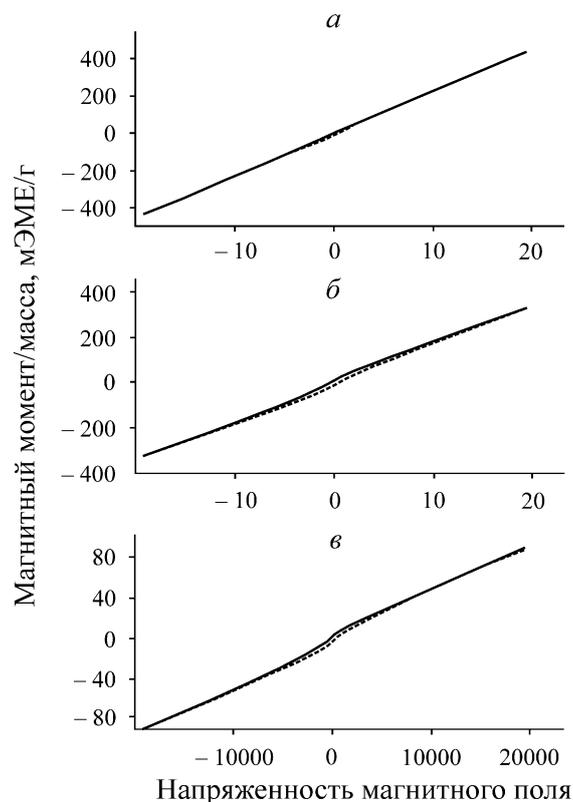


Рис. 4. Влияние напряженности наведенного магнитного поля на поведение парамагнитных минералов: эвксенита (а), алланита (б) и циркона (в) при измерении вибромагнитометром

Для получения чистого концентрата парамагнитных минералов (эвксенита, фергусонита, алланита, ксенотима и циркона) после гравитационной концентрации выполнена магнитная сепарация с помощью сухого магнитного сепаратора высокой интенсивности подъемного типа Карпко (модель МЛН (13) III-5). Магнитная сепарация также использовалась для отделения ферромагнитного минерала (магнетита) и оставшихся диамагнитных материалов (кварца и полевого шпата) после гравитационной концентрации. Сепарация осуществлялась при среднем воздушном зазоре между поверхностью ротора и намагниченным полем 1.5 см и токе магнитного поля 3.0 А. Скорость магнитного ролика 100 об./мин, скорость подачи 400 г/мин. В данном типе сухого сепаратора магнитные материалы поднимаются с помощью магнитных сил

в противоположном гравитации направлении, в отличие от других сепараторов, где магнитная сила сонаправлена с гравитацией. В данном сепараторе установлен вибрирующий механизм, осуществляющий подачу материала горизонтально через область регулируемого магнитного поля, где магнитная сила прикладывается к частицам перпендикулярно их движению. Преимущество этого принципа — получение магнитных продуктов высокой чистоты, а также возможность отделения нескольких магнитных материалов.

В табл. 3 приведены результаты баланса вещества после магнитной сепарации пяти размерных фракций образца пегматита с карьера Вади-эль-Шейх. Результаты размерной фракции – 1000 + 700 мкм показали, что содержание тяжелых минералов увеличилось с 51.76 (гравитационный концентрат) до 56.34 % (магнитная фракция при массовой доле 4.10 %). Это означает, что в магнитном концентрате сохранено 30.44 % тяжелых минералов из 30.97 % и около 0.53 % тяжелых минералов осталось в немагнитной фракции.

ТАБЛИЦА 3. Результаты магнитной сепарации образца пегматита сухим магнитным сепаратором высокой интенсивности подъемного типа, %

Размерная фракция, мкм	Продукт концентрации	Массовая доля	Содержание тяжелых минералов	Распределение тяжелых минералов
– 1000 + 700	Магнитная фракция	4.10	56.34	30.44
	Немагнитная фракция	0.44	9.80	0.53
	Гравитационный концентрат	4.54	51.76	30.97
– 700 + 500	Магнитная фракция	1.20	96.67	15.28
	Немагнитная фракция	0.14	10.30	0.13
	Гравитационный концентрат	1.34	87.31	15.41
– 500 + 250	Магнитная фракция	1.80	68.33	16.21
	Немагнитная фракция	0.18	9.30	0.26
	Гравитационный концентрат	1.98	63.13	16.47
– 250 + 125	Магнитная фракция	0.86	83.72	9.48
	Немагнитная фракция	0.10	10.00	0.13
	Гравитационный концентрат	0.96	76.04	9.61
– 125 + 45	Магнитная фракция	0.59	88.14	6.79
	Немагнитная фракция	0.05	7.40	0.05
	Гравитационный концентрат	0.64	81.25	6.84

С целью отделения экономически ценных парамагнитных минералов от ферромагнитных и диамагнитных и разделения магнитного концентрата на три фракции использовались токи магнитного поля 0.1, 1.5 и 3.0 А (табл. 4). Исследование с помощью микроскопа первой магнитной фракции (ток 0.1 А) показало, что в ее состав в основном входит магнетит, имеющий массовую долю 5.3 % от конечного концентрата. Вторая магнитная фракция получена при токе 1.5 А и содержит эвксенит, фергусонит, алланит, ксенотим — сильные парамагнитные минералы, отделяющиеся при данном токе. Циркон и ураноторит входят в состав магнитной и немагнитной фракции при 3.0 А. Оставшиеся в гравитационном концентрате кварц и полево-шпат образуют немагнитную фракцию после магнитной сепарации при токе 3.0 А.

ТАБЛИЦА 4. Распределение магнитных фракций образца пегматита в зависимости от тока магнитного поля, %

Размерная фракция, мкм	Массовая доля магнитной фракции			
	Всего	Ток магнитного поля, А		
		0.1	1.5	3.0
– 1000 + 700	4.10	0.22	2.50	1.38
– 700 + 500	1.20	0.08	0.72	0.40
– 500 + 250	1.80	0.10	1.33	0.37
– 250 + 125	0.86	0.08	0.64	0.14
– 125 + 45	0.59	0.10	0.42	0.07
Итого	8.55	0.58	5.61	2.36
Распределение магнитной фракции	78.20	5.30	51.32	21.58

В табл. 5 приведен баланс вещества при разных процессах физического обогащения пегматита с карьера Вади-эль-Шейх. Окончательный гравитационный концентрат содержит 58.38 % тяжелых минералов с долей извлечения 79.30% при массовой доле 9.46% обесшламленной фракции – 1000 + 45 мкм, включающей 7.38% тяжелых минералов. Согласно результатам состава и баланса вещества магнитной сепарации, окончательный концентрат содержит 58.38% тяжелых минералов с долей извлечения 78.20% при массовой доле 8.55% гравитационного концентрата с размером частиц – 1000 + 45 мкм. На рис. 5 показана схема обогащения образца пегматита.

ТАБЛИЦА 5. Баланс вещества разных продуктов физического обогащения пегматита, %

Процедура	Продукт	Массовая доля	Содержание тяжелых минералов	Распределение тяжелых минералов
Обесшламление, просеивание	Обесшламленный продукт (– 1 + 0.045)	91.78	7.38	97.23
	Шлам, крайне мелкие частицы (– 0.045)	8.20	5.50	2.77
	Исходный образец	99.98	7.59	100.00
Гравитационная концентрация	Концентрат	9.46	58.38	79.30
	Хвосты	82.32	1.52	17.92
	Сырье (– 1 + 0.045)	91.78	7.38	97.23
Магнитная сепарация	Магнитная фракция	8.55	63.63	78.20
	Немагнитная фракция	0.91	8.79	1.10
	Гравитационный концентрат	9.46	58.38	79.30

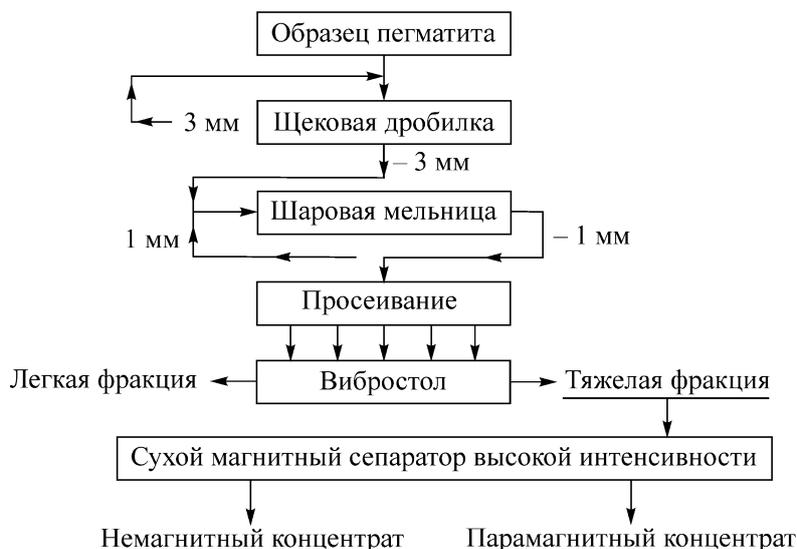


Рис. 5. Предлагаемый процесс отделения редких металлов и минералов из образца пегматита

**ВЫВОДЫ**

Сочетание предварительной гравитационной концентрации на вибростоле с сухой магнитной сепарацией высокой интенсивности позволяет успешно получать концентрат тяжелых парамагнитных полиметаллических минералов в форме магнитного концентрата. Измерения эвксенита, алланита, магнетита, циркона, кварца и полевого шпата (общие тренды, показывающие магнитное поведение и магнитуду намагничивания) вибромагнитометром способствовали изучению методов отделения экономически ценных парамагнитных полиметаллических минералов от диамагнитных и ферромагнитных пустых минералов при разных силах тока магнитного поля. В состав окончательного магнитного концентрата вошло 63.63 % тяжелых минералов с окончательной долей извлечения 78.20 % при массовой доле 8.55 % при исходном содержании тяжелых минералов в образце пегматита 7.59 %.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **El Dabe M. M.** A new occurrence of polymetals mineralized pegmatites in the older granites, Wadi El Sheih area, Central Eastern Desert, Egypt, *Al Azhar Science Magazine*, 2017.
2. **Kharbish S. M., Raslan M. F., Fawzy M. M., El Dabe M. M., and Fathy M. M.** Occurrence of polymetallic mineralized pegmatite of Wadi El Sheih granite, Central Eastern Desert, Egypt, 2020, Under Ppublication.
3. **Matsubara S., Kato A., and Matsuyama F.** Nb–Ta minerals in a lithium pegmatite from Myokenzan, Ibaraki Prefecture, Japan, *Mineralogical J.*, 1995, Vol. 17. — P. 338–345.
4. **Hanson S. L., Simons W. B., Falster A. U., Foord E. E., and Lichte F. E.** Proposed nomenclature for samarskite-group minerals: new data on ishikawaite and calciosamarskite, *Mineralogical Magazine*, 1999, Vol. 63. — P. 27–63.
5. **Ercit T. S.** REE-enriched granitic pegmatites. In *Rare Element Geochemistry and Ore Deposits*, Geological Association of Canada, Short Course Notes, 2005, Vol. 17. — P. 257–296.
6. **William S. B., Hanson S. L., and Falster A. U.** Samarskite-Yb: a new species of the samarskite group from the Little Pasty pegmatites, Jefferson County, Colorado, *Can. Mineral*, 2006, Vol. 44, No. 5. — P. 1119–1125.
7. **Pal D. C., Mishra B., and Bernhardt H. J.** Mineralogy and geochemistry of pegmatite-hosted Sn-, Ta-, Nb- and Zr-Hf bearing minerals from the southeastern part of the Bastar-Malkangiri pegmatite belt, Central India, *Ore Geology Reviews*, 2007, Vol. 30. — P. 30–55.
8. **Raslan M. F.** Mineralogical and minerallurgical characteristics of samarskite-Y, columbite and zircon from stream sediments of the RasBaroud area, Central Eastern Desert, Egypt, *The Scientific Papers of the institute of Mining of the Wroclaw University of Technology*, Wroclaw, Poland, *J. Min. and Geol.*, 2009, No. 126, XII. — P. 179–195.
9. **Raslan M. F., El-Shall H. E., Omar S. A., and Daher A. M.** Mineralogy of polymetallic mineralized pegmatite of Ras Baroud granite, Central Eastern Desert, Egypt, *J. Mineralogical and Petrological Sci.*, 2010, Vol. 105, No. 3. — P. 123–134.
10. **Raslan M. F., Mona M. Fawzy, and Abu-Khoziem H.** Mineralogy of mineralized pegmatite of Ras Mohamed granite, Southern Sinai, Egypt, *Int. J. of Geol., Earth and Environmental Sci.*, 2017, Vol. 7, No. 1. — P. 65–80.
11. **Raslan M. F. and Mona M. Fawzy.** Mineralogy and physical upgrading of fergusonite-Y and Hf-zircon in the mineralized pegmatite of Abu Dob granite, Central Eastern Desert, Egypt, *Tabbin Institute for Metallurgical Studies (TIMS bulletin)*, 2018, Vol. 107. — P. 52–65.

12. **Mona M. Fawzy, Mahdy N. M., and Mabrouk S.** Mineralogical characterization and physical upgrading of radioactive and rare metal minerals from Wadi Al-Baroud granitic pegmatite at the Central Eastern Desert of Egypt, *Arabian J. of Geosciences*, 2020, Vol. 13. — P. 413.
13. **Gupta C. K. and Krishnamurthy N.** Extractive metallurgy of rare earths, *Int. Materials Rev.*, 1992, Vol. 37, No. 5. — P. 197–248.
14. **Zhang J. and Edwards C.** A Review of rare earth mineral processing technology, 44<sup>th</sup> Annual Meeting of the Canadian Miner. Proc., 2012. — P. 79–102.
15. **Jordens A., Cheng P., and Waters E.** A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals, *J. Min. Eng.*, 2013, Vol. 41. — P. 97–114.
16. **Jordens A., Marion C., Kuzmina O., and Waters K. E.** Physicochemical aspects of allanite-(Ce) flotation, *J. Rare Earths*, 2014, Vol. 32, No. 5. — P. 476–486.
17. **Abaka-Wood G. B., Addai-Mensah J., and Skinner W.** Review of flotation and physical separation of rare earth element minerals, 4<sup>th</sup> UMaT Biennial Int. Min. and Miner. Conf., 2016, MR. — P. 55–62.
18. **Raslan M. F. and Mona M. Fawzy.** Comparative mineralogy and magnetic separation characteristics of Nb–Ta oxide minerals from rare-metal pegmatite and stream sediments, Eastern Desert and Sinai, Egypt, *Int. J. of Innovative Sci., Eng. and Technol.*, 2017, Vol. 4, Issue 4. — P. 130–146.
19. **Mona M. Fawzy.** Surface characterization and froth flotation of Fergusonite using a combination of anionic and nonionic collectors, *Physicoch. Probl. of Miner. Proc.*, 2017, Vol. 54, No. 3. — P. 677–687.
20. **Samusev A. L.** Influence of acids on extraction efficiency of zirconium and rare earth metals in Eudialyte concentrate leaching, *J. Min. Sci.*, 2019, Vol. 55, No. 6. — P. 984–994.
21. **Chanturia V. A., Bunin I. Zh., Ryazantseva M. V., Chanturia, E. L., Samusev A. L., Koporulina E. V., and Anashkina N. E.** Intensification of Eudialyte concentrate leaching by nanosecond high-voltage pulses, *J. Min. Sci.*, 2018, Vol. 54, No. 4. — P. 646–655.
22. **Sheridan R. S.** Optimisation of HDDR processing parameters of sintered NDFEB magnets (PhD thesis), School of Metallurgy and Materials, University of Birmingham, 2014.
23. **Jiles D.** Introduction to magnetism and magnetic materials, Chapman and Hall, London, 1990.
24. **Waters K. E., Rowson N. A., Greenwood R. W., and Williams A. J.** Characterising the effect of microwave radiation on the magnetic properties of pyrite, *Separation and Purification Technol.*, 2007, Vol. 56. — P. 9–17.
25. **Jordens A.** The beneficiation of rare earth element-bearing minerals, Min. and Mater. Eng. Department, PhD Thesis, McGill University, Montreal, Canada, 2016. — 223 p.
26. **Al-Ali S., Wall F., Sheridan R., Pickles J., and Pascoe R.** Magnetic properties of REE fluorocarbonate minerals and their implications for minerals processing, *Miner. Eng.*, 2019, Vol. 131. — P. 392–397.
27. **Wills B. A. and Finch J. A.** Wills' mineral processing technology, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2016.
28. **Taggart A. F.** Hand book of mineral dressing and industrial minerals, John Wiley and Sons, Inc. New York, London, Sydney, 1944.
29. **Jones M. P.** Mineral dressing tests on the extraction of columbite and other heavy minerals from the Olegi younger granite, *Rec. Geol. Surv.*, Nigeria, 1960.
30. **Pryor E. J.** Mineral processing, Applied Science publishers Limited, Third Edition, London, 1974.
31. **Gaudin A. M.** Principles of mineral dressing, TATA McGraw Hill publishing Co. Ltd., New Delhi, 1980.
32. **Wills B. A. and Napier-Munn T. J.** Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery, Elsevier Sci. and Technol. Books, 2006.
33. **Ito S., Yotsumoto H., and Sakamoto H.** Magnetic separation of monazite and xenotime-(Y), *Proc. of the Int. Conf. on Rare Earth Minerals and Minerals for Electronic Uses*, eds. Siribumrungsukha B., Arrykul S., Sanguansai P., Pungrassami T., Sikong L., Kooptarnond K., Prince Songkla University, Hat Yai, THA, 1991. — P. 279–299.

*Поступила в редакцию 10/VIII 2020*

*После доработки 18/XI 2020*

*Принята к публикации 15/III 2021*