

Код МРНТИ 52.45.03

М.Р. Шаутинов¹, *Н.Т. Акказина¹, Ю.П. Морозов²¹Satbayev University (г. Алматы, Казахстан),²Уральский государственный горный университет (г. Екатеринбург, Россия)

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБОГАТИМОСТИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНОЙ РУДЫ КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ

Аннотация. В статье приводится информация по переработке редкоземельной руды коры выветривания месторождения Кундыбай. Особенности технологических свойств данной руды делают ее уникальной и ценной. В связи с этим возникла необходимость проведения полномасштабных научных исследований с целью изучения вещественного состава руды с установлением изменчивости распределения в них полезных компонентов и технологических свойств их переработки. Рудные минералы имеют микроскопические размеры, они распределены преимущественно внутри зерен вмещающих пород. Установлена методика технологических методов переработки данного минерального сырья на основе гравитационного обогащения с использованием разработанного центробежного гидроконцентратора.

Ключевые слова: редкоземельная руда, содержание, класс крупности, концентрат, хвосты, гравитация.

Мору қыртысындағы сирек жер кенінің байытылуын зерттеу

Аңдатпа. Ұсынылған мақалада Кундыбай кен орнының мору қыртысындағы сирек жер кенінің өңдеудің мәліметтері келтірілген. Аталған кеннің технологиялық ерекшеліктері, оны бірегей және құнды етеді. Соған сәйкес осындай кеннің заттық құрамын зерттеумен, ондағы пайдалы компоненттердің таралуының өзгеруін және олардың өңдеудегі технологиялық қасиеттерін білуге арналған толық масштабтағы ғылыми зерттеулер жүргізуге мәжбүрледі. Кендегі минералдардың размерлері микроскопиялық, олар негізінде кендегі жанасқан жыныстардың түйіршіктерінде таралған. Минералдық шикізатты өңдеудің технологиялық әдістемесі анықталды. Кенді байыту зерттелген ортадан тепкіш гидроконцентраторды қолданумен, гравитациялық байыту әдісі негізінде атқарылды.

Түйінді сөздер: сирек жер металды кен, құрамы, ірілік класс, концентрат, қалдық, гравитация.

Research on richability of rare earth ore from weathering crust

Abstract. The article provides information on the processing of rare-earth ore from the weathering crust of the Kundybay deposit. Features of technological properties of this Ore make it unique and valuable. In this regard, the need arose to conduct full-scale scientific research in order to study the material composition of ore with the establishment of variability in the distribution of useful components in them and the technological properties of their processing. Ore minerals are microscopic in size and distributed predominantly within grains of the host rock. The technique of technological methods of processing of this mineral raw material on the basis of gravity concentration with the use of developed centrifugal hydrocenter is extensively established.

Key words: rare earth ore, content, size class, concentrate, tails, gravity.

Введение

Известно, что богатые редкоземельные месторождения исчерпаны и возникла необходимость вовлекать в производство бедные или труднообогащаемые руды. К последним относятся руды кор выветривания, в которых редкоземельные элементы (РЗЭ) представлены фосфатами РЗЭ (черчитом, рабдофонитом, ксенотимом или монацитом).

Действительно, эти особенности технологических свойств исследуемой руды делают ее уникальной и ценной. Отсутствие радиоактивности является значительным преимуществом, так как это позволяет избежать дополнительных мер безопасности при добыче и переработке руды, а также обеспечивает безопасность конечного продукта. Кроме того, рыхлый песчано-глинистый гранулометрический состав руды позволяет существенно сэкономить затраты на операциях дробления и измельчения, что также является важным фактором. Наконец, необычный состав лантаноидов, включающий дефицитный иттрий, европий и другие тяжелые лантаноиды, делает эту руду особенно ценной, так как эти элементы имеют высокую стоимость и широко используются в различных отраслях промышленности.

В связи с этим возникла необходимость проведения полномасштабных научных исследований с целью изучения вещественного состава руды с установлением изменчивости распределения в них полезных компонентов и технологических свойств их переработки. Рудные минералы имеют микроскопические размеры, они распределены преимущественно внутри зерен вмещающих пород. На основе анализа ранее проведенных исследований по переработке редкоземельного сырья [1, 2] была установлена методика технологических методов переработки исследуемого минерального сырья и проведены лабораторные

исследования по гравитационному обогащению исходной редкоземельной руды. Установлена возможность гравитационного обогащения руды класса крупности более 0,10 мм.

Для проведения исследований по определению состава и свойств отобранной пробы использованы следующие методы физико-химических анализов: спектральный, минералогический, химический, рентгенофазовый анализ и растровая электронная микроскопия.

Проведены исследования по гравитационному обогащению исходной редкоземельной руды.

К редкоземельным относится группа из 17 элементов, включающая: скандий (*Sc*), иттрий (*Y*), лантан (*La*), церий (*Ce*), празеодим (*Pr*), неодим (*Nd*), прометий (*Pm*), самарий (*Sm*), европий (*Eu*), гадолиний (*Gd*), тербий (*Tb*), диспрозий (*Dy*), гольмий (*Ho*), эрбий (*Er*), тулий (*Tm*), иттербий (*Yb*), лютеций (*Lu*). Редкоземельные элементы используют в приборостроении, радиоэлектронике, машиностроении, атомной технике, химической промышленности, в металлургии и других различных отраслях. На основе *Nd, Y, Sm, Er, Eu* с *Fe-B* (боридом железа) получают сплавы с высокой намагничивающей и коэрцитивной силой для создания постоянных магнитов, используемых, в частности, в ветрогенераторах и двигателях электромобилей [3].

В настоящее время редкоземельные металлы (РЗМ) – это ключевые компоненты самых современных материалов и технологий. Неуклонный интерес к ним обусловлен широким спектром их потребления в высокотехнологичных отраслях промышленности, возрастающим спросом на мировом рынке [4].

Добываемые РЗМ используются в производстве мощных постоянных магнитов, катализаторов для крекинга нефти, синтеза каучука, также для выпуска каталитических фильтров-нейтрализаторов выхлопных газов автотранспорта, люминофоров для мониторов и энергосберегающих ламп.

Уникальные свойства РЗМ служат основой для реализации современных передовых технологий в металлургии, приборостроении, машиностроении, радиоэлектронике, химической и оборонной промышленности и т.д.

Руды, содержащие минералы редкоземельных элементов (РЗЭ), обычно подвергают гравитационному обогащению для выделения тяжелых минералов – монацита, ксенотима, эвксенита и других [5, 6].

Объектом исследования является минеральное сырье месторождения Кундыбай, которое находится в Костанайской области Казахстана [7]. Основную ценность в коре выветривания представляют вторичные редкоземельные минералы бастнезит, черчит и рабдофонит. Черчит – самый распространенный минерал на месторождении. Рабдофонит по составу является близким аналогом черчита ΣTR_2O_3 – 42,57%, для него характерно повышенное содержание иттрия (4,76%).

Материалы и основные методы

Для проведения исследований по определению состава и свойств руды Кундыбайского месторождения была отобрана представительная проба руды. Использованы следующие методы физико-химических анализов: спектральный, минералогический, химический, рентгенофазовый анализ и растровая электронная микроскопия.

Атомно-эмиссионный качественный спектральный анализ проб исследуемой руды и продуктов обогащения проводили на дифракционном спектрографе ДФС-13, минералогический анализ с использованием микроскопа МИН-8 (проходящий свет) и инвертированного микроскопа Deica (отраженный свет); рентгенофазовый анализ на аппарате D8 Advance (Bruker).

В состав минералого-технологических исследований входили следующие процедуры: изучение гранулометрического и минералогического состава исследуемого минерального сырья; процесс обесшламливания глинистой фракции руды; гравитационное обогащение на основе фракционного анализа и гравитационной обогатимости.

В работе исследованы методы химического, минералогического и гранулометрического анализов; экспериментальные исследования обогатимости отобранной представительной пробы редкоземельного минерального сырья на основе гравитационного метода обогащения.

Результаты и их обсуждение

Исследование выполнены на отобранной представительной пробе редкоземельного минерального сырья. Проба массой 155 кг была продроблена и измельчена до крупности 2,5 мм. Полученный продукт крупностью 2,5-0,0 мм перемешивался и сокращался методом квартования на две части весом 77,5 кг каждая. Одну часть весом 77,5 кг перемешивали и сокращали на две равные части весом 38,7 кг. Одна часть весом 38,7 кг подвергалась фракционному ана-

лизу. Вторая часть подвергалась гравитационному обогащению на разработанном виброцентробежном чашевом аппарате [8].

Вторую часть весом 77,5 кг повторно перемешивали и сокращали на две части весом 38,7 кг каждая. Одну часть брали на минералогический, рентгенофазовый и другие анализы, другую часть перемешивали и сокращали на две части весом 19,3 кг. Одну часть брали на ситовой и седиментационный анализы, другую использовали для проведения флотационных опытов.

Содержание суммы редкоземельных элементов (Σ РЗЭ) в исследуемой пробе руды по результатам химического анализа составляет 320,45 г/т. Содержание отдельных РЗЭ в пробе руды, г/т: **Dy** – 9,175; **Er** – 3,93; **Eu** – 0,874; **Gd** – 6,8; **Ho** – 1,03; **La** – 48,0; **Lu** – 0,6; **Nd** – 26,09; **Pr** – 41,8; **Sm** – 3,89; **Tb** – 0,722; **Tm** – 6,524; **Y** – 14,12; **Yb** – 2,78; **Ce** – 155,765. Из редкоземельных элементов в исследуемой руде больше всего содержится церия – 155,765 г/т, несколько в меньшем количестве можно отметить **La**, **Pr**, **Nd** и **Y**.

Гранулометрический анализ дробленной до -2,5 мм руды показал, что 70,65% Σ РЗЭ содержится в тонких классах -0,02+0,01 мм, -0,01+0,005 мм, 0,005+0 мм. Суммарный выход этих классов составляет 32,65%. Среднее содержание Σ РЗЭ по этим классам – 667 г/т.

По результатам ИКС-анализа в пробе руды содержатся следующие основные минералы: каолинит – $Al_4(OH)_8 [Si_4O_{10}]$, кварц $\alpha-SiO_2$, анортит $Ca[Al_2Si_2O_8]$, альбит $Na[AlSi_3O_8]$, кальцит $CaCO_3$, мусковит $KAl_2[(OH, F)_2AlSi_3O_{10}]$, рутил TiO_2 , ильменит $FeTiO_3$.

В целом распределение содержаний Σ РЗЭ по классам крупности в исследуемой руде имеет неравномерный характер. Наименьшее содержание Σ РЗЭ наблюдается в самых крупных классах и наиболее высокие содержания в тонких классах крупности. Содержание Σ РЗЭ в классе крупностью 80-40 мм составил 22,055 г/т, а в классах крупностью 0,02-0,01 мм и 0,01-0,05 мм соответственно составили 609,981 г/т и 821,597 г/т. Общий выход данных классов крупности 31,49% со средним содержанием суммы РЗЭ 694,318 г/т и общим извлечением Σ РЗЭ 68,229%. Это позволяет утверждать, что большая часть РЗЭ концентрируется в классе крупностью 0,02-0,005 мм.

Выход самого тонкого класса крупностью менее 5 мкм составил всего 1,14%. Однако в данном классе крупности наблюдается наиболее высокое содержание Σ РЗЭ, которое составило 890,639 г/т, при извлечении РЗЭ 3,168%.

Наличие высокого количества шламистой фракции (более 30% от руды) позволило сделать вывод, что данную руду невозможно подвергать процессам обогащения без предварительной дешламации.

Процесс дешламации осуществляется на разработанном в КазНУТУ им. К.И. Сатпаева ультразвуковом аэрогидродешламаторе (УАГД) [9-10], позволяющем вывести из процесса до 90% тонкого глинисто-шламистого материала крупностью (-2 мм). Схема УАГД представлена на рис. 1.

Процесс дешламации исходного сырья осуществляется в последовательно раздельных камерах УАГД. В турбулентном противотоке воздушных и водяных струй (камера 1) осуществляется разделение из пульпы грубых сростков

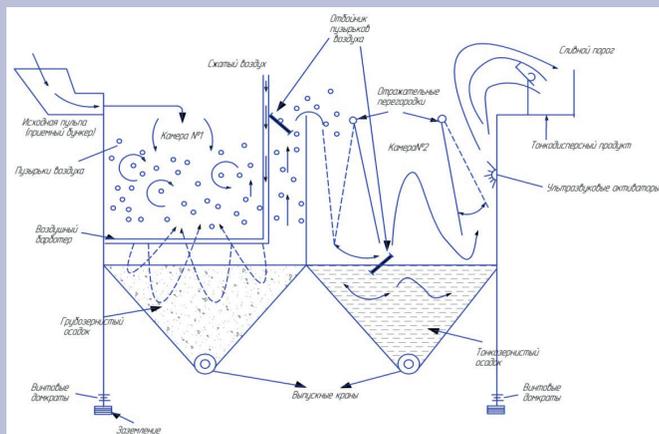


Рис. 1. Схема УАГД.
Сурет 1. УАГД сұлбасы.
Figure 1. UAGD Schematic.

и тяжелых минералов, затем в последующей камере 2 за счет ультразвуковой активации ламинарного потока пульпы происходит разделение тонких и тонкодисперсных частиц. Гидравлическая классификация в аппарате осуществляется в непрерывных по переменному исходящим-восходящим, криволинейно текущих потоках и происходит от крупного класса к мелкому.

В первой камере большое значение имеет размер и плотность разделяемых частиц, во второй камере главным является размер и форма частиц и характер их строения, в сливе – размер частиц. За счет аэрации пульпы в первой камере происходит минерализация пузырьков воздуха, закрепление на них тонкодисперсных шламистых (глинистых) частиц при движении пузырька снизу-вверх и падении частицы вниз. Во-второй, ультразвуковая активация разрушает пузырьки воздуха и вскрывает («очищает») зерна от пленок и корок других минералов, выполняет тонкую дезинтеграцию (1-10 мкм) минеральной взвеси и способствует осаждению более крупных зерен. В слив дешламатора поступает тонко дезинтегрированный, очищенный (облагороженный) материал, пригодный для гидрометаллургической переработки и гравитационно-флотационного обогащения.

Перемешивание пульпы и разделение твердых частиц осуществляется барботированием, т.е., пропусканием через пульпу мелких пузырьков воздуха. Для этого в первой камере установлен воздушный барботер, представляющий собой три горизонтально расположенные скрепленные между собой трубы ($d=21$ мм) с 56 отверстиями ($d=1$ мм) в нижней части каждой. Благодаря чему воздух из отверстий преодолевает одинаковое гидравлическое сопротивление и равномерно выходит из отверстий, что способствует лучшему перемешиванию осадка в конической воронке, а нижнее расположение отверстий предохраняет их от засорения песком. Воздух подается под давлением. Частицы плохо смачиваемых водой минералов (сера, тальк, графит, сульфиды, в ряде случаев самородные металлы) прилипают к пузырькам воздуха и всплывают вместе с ними на поверхность пульпы. Хорошо смачиваемые водой частицы, окруженные прочной гидратной оболочкой, не прилипают к пузырькам воздуха и остаются в водной среде.

Кстати, добавление в пульпу реагентов вспенивателей (сосновое масло и др.), обеспечивает устойчивость и длительность существования в пульпе пузырьков воздуха.

Выпуск осевшего осадка осуществляется с помощью шаровых кранов, расположенных в конических днищах камер, слив отправляется через сливной порог, через который удаляются шламы.

Разделение песков в УАГД восходящих потоках воды осуществляется в камерных классификаторах, производительность которых рассчитывается по показателям работы последней камеры, из которой удаляются в слив тонкие частицы. При большом содержании тонких шламов из-за недостаточной площади осаждения (зеркала воды) частиц в последней камере снижается производительность классификации. Обесшламливание в УАГД производится по граничной крупности 0,04 мм.

Необходимая крупность руды для проведения укрупненно-лабораторных испытаний, определенная предварительными исследованиями, составила 2,5 мм.

Согласно рис. 2 пробу исходной руды крупностью $-80+0,0$ мм дробили и измельчали до крупности 2,5 мм. Полученный класс крупности $-2,5+0,0$ мм направляли на дешламацию в УАГД с целью отделения шламистой фракции $-0,1+0,0$ мм. Полученные два класса крупности $-2,5+0,1$ мм и $-0,1+0,0$ мм направлялись на опыты по гравитационному обогащению.

Перед проведением укрупненно-лабораторных испытаний руду, дробленную до 2,5 мм, подвергали дешламации по классу крупности $-0,1+0,0$ мм. Результаты дешламации представлены в таблице 1.

Таблица 1
Результаты дешламации руды дробленной до 2,5 мм
Кесте 1
2,5 мм дейін ұнтақталған кенді дешламациялау нәтижелері

Table 1
Results of desliming of ore crushed to 2.5 mm

Класс крупности, мм	Выход, %	Содержание $\Sigma P3Э$, г/т	Извлечение $\Sigma P3Э$, %
- 2,5 + 0,1	53,75	108,09	18,88
- 0,1 + 0,0	41,25	534,02	81,12
Руда	100	307,78	100

По результатам дешламации средневзвешенное содержание $\Sigma P3Э$ в исследуемой пробе руды составило 307,78 г/т, таблица 1.

Анализ результатов дешламации исходной руды, дробленной до 2,5 мм, приведенных в таблице 1, показывает, что выход класса $-2,5+0,1$ мм составил 53,75% с содержанием $\Sigma P3Э$ 108,09 г/т при извлечении 18,88%.

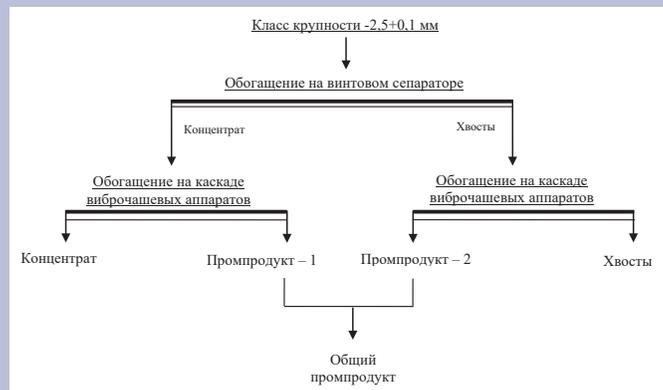
Выход класса $-0,1+0,0$ мм составил 41,25% с содержанием $\Sigma P3Э$ 534,02 г/т при извлечении 81,12%.

Следует отметить, что содержание $\Sigma P3Э$ в классе крупности $-2,5+0,0$ мм практически в три раза ниже, чем содержание $\Sigma P3Э$ в руде и имеет низкое извлечение $\Sigma P3Э$ в данный класс (18,88%). Отсюда можно констатировать,

что основное количество $\Sigma P3Э$ извлекается в класс крупности $-0,1+0,0$ мм (81,12%) и в нем наблюдается повышенное содержание $\Sigma P3Э$ по отношению к содержанию $\Sigma P3Э$ в исходной руде в 1,73 раза (534,02 г/т).

Проведены укрупненно-лабораторные испытания по гравитационному обогащению тонкодисперсных частиц редкоземельных элементов из исследуемой руды с использованием разработанного виброцентробежного чашевого аппарата различной производительности.

Схемы обогащения в гравитационных аппаратах представлены на рис. 2.



**Рис. 2. Схема обогащения класса $-2,5+0,1$ мм.
Сурет 2. $-2,5+0,1$ мм кластың байыту сұлбасы.
Figure 2. The grade enrichment scheme is $-2,5+0,1$ mm.**

Обогащение класса $-2,5+0,1$ мм на винтовом сепараторе и разработанном виброцентробежном чашевом аппарате.

Виброкашевый аппарат по своим конструктивным параметрам и принципу действия является аналогом разработанных гидроконцентраторов [11]. Отличительная особенность аппарата: отсутствие подачи дополнительной воды в чашу (ротор) концентратора, высокая степень концентрации (до 200) полезных компонентов в продуктах обогащения и возможность работы с малыми пробами исследуемого материала. Разрыхление материала в постели чаши концентратора осуществляется за счет ее вибрации (3000-6000 кол/мин).

Гравитационное обогащение исследуемой руды осуществлялось на разработанной укрупненной технологической установке, представленной на рисунках 3, 4.

Обогащение класса $-2,5+0,1$ мм на винтовом сепараторе осуществлялось при следующих параметрах: отношение $J:T=3:1$.

Доводка концентрата винтового сепаратора в виброкашевом аппарате осуществлялась при следующих параметрах: отношение $J:T=3:1$, частота вращения чаши 500 об/мин.

Фотография используемого в исследованиях виброцентробежного аппарата представлена на рис. 5.

Результаты обогащения класса $-2,5+0,1$ мм представлены в таблице 2.

Анализ результатов укрупненно-лабораторных испытаний гравитационного обогащения класса крупностью $-2,5+0,1$ мм (таблица 2, рис. 2) показывает возможность



вид сверху

**Рис. 3. Винтовой сепаратор.
Сурет 3. Винтті сепаратор.
Figure 3. Screw Separator.**



**Рис. 4. Каскад виброкашевых аппаратов.
Укрупненная технологическая установка.
Сурет 4. Дірілді табакшалы аппарат.
Ірілендірілген технологиялық қондырғы.
Figure 4. Cascade of vibrocash machines.
Enlarged technological installation.**

получения концентрата, двух пром/продуктов (промпродукт – 1 и промпродукт – 2) и хвостов.

Выход концентрата составил 3,76% от руды (7,00% от класса) с содержанием $\Sigma P3Э$ 640,68 г/т, при извлечении $\Sigma P3Э$ 7,83% от руды (41,47% от класса).

Выход промпродукта – 1 составил 8,17% от руды (15,2% от класса) с содержанием $\Sigma P3Э$ 122,61 г/т при извлечении $\Sigma P3Э$ 3,25% от руды (17,21% от класса). Выход промпро-



Рис. 5. Виброцентробежный чашевый аппарат.
Сурет 5. Дірілді ортадан тепкіш табақшалы аппарат.
Figure 5. Vibrating centrifugal bowl machine.

дукта – 2 составил 9,48% от руды (17,45% от класса) с содержанием $\Sigma P3Э$ 95,15 г/т, при извлечении $\Sigma P3Э$ 2,90% от руды (15,36% от класса). Выход общего промпродукта (промпродукт – 1 плюс промпродукт – 2) составил 17,55% от руды (32,65% от класса) с содержанием $\Sigma P3Э$ 107,93 г/т, при общем извлечении $\Sigma P3Э$ 6,15% от руды (32,57% от класса).

Выход хвостов обогащения класса крупностью $-2,5+0,1$ мм составил 32,44% от руды (60,35% от класса) с содержанием $\Sigma P3Э$ 46,44 г/т при извлечении $\Sigma P3Э$ 4,90% от руды (25,96% от класса).

Обогащение класса $-0,1+0,0$ мм на вибrotchашевом аппарате.

Обогащение класса $-0,1+0,0$ мм на вибrotchашевом аппарате осуществлялось при следующих параметрах: отношение $Ж:Т=3:1$, частота вращения чаши 500 об/мин.

Технологические показатели, получаемые по схеме, в таблице 3.

Полученные результаты укрупненно-лабораторных испытаний гравитационного обогащения класса крупностью $-0,1+0,0$ (таблица 3) показывают возможность получения концентрата и хвостов.

Так выход концентрата составил 11,05% от руды (23,89% от класса) с содержанием $\Sigma P3Э$ 1053,76 г/т, при извлечении $\Sigma P3Э$ 37,83% от руды (46,63% от класса).

Выход хвостов обогащения класса крупностью $-0,1+0,0$ мм составил 35,2% от руды (76,11% от класса) с содержанием $\Sigma P3Э$ 378,53 г/т при извлечении $\Sigma P3Э$ 43,29% от руды (53,37% от класса). По содержанию

Таблица 2

Результаты обогащения класса $-2,5+0,1$ мм

Кесте 2

$-2,5+0,1$ мм кластың байыту нәтижелері

Table 2

Grade enrichment results $-2.5+0.1$ mm

Наименование продукта	Выход, % от		Содержание $\Sigma P3Э$, %	Извлечение $\Sigma P3Э$, % от	
	класса	руды		класса	руды
Концентрат	7,00	3,76	640,68	41,47	7,83
Промпродукт – 1	15,2	8,17	122,61	17,21	3,25
Промпродукт – 2	17,45	9,48	95,15	15,36	2,90
Общий промпродукт	32,65	17,55	107,93	32,57	6,15
Хвосты	60,35	32,44	46,44	25,96	4,90
Класс $-2,5+0,1$ мм	100	53,75	108,09	100,0	18,88
Класс $-0,1+0,0$ мм	-	46,25	534,02	-	81,12
Руда	-	100,0	307,78	-	100,0

Таблица 3

Показатели обогащения класса $-0,1+0,0$ мм

Кесте 3

$-0,1+0,0$ мм кластың байыту көрсеткіштері

Table 3

Grade enrichment values $-0.1+0.0$ mm

Наименование продукта	Выход, % от		Содержание $\Sigma P3Э$, %	Извлечение $\Sigma P3Э$, % от	
	класса	руды		класса	руды
Концентрат	23,89	11,05	1053,76	46,63	37,83
Хвосты	76,11	35,2	378,53	53,37	43,29
Класс $-0,1+0,0$ мм	100,0	46,25	534,02	100,0	81,12
Класс $-2,5+0,1$ мм	-	53,75	108,09	-	18,88
Руда	-	100,0	307,78	-	100,0

Таблица 4
Оптимальные технологические показатели укрупненно-лабораторных испытаний по обогащению исходной руды, дробленной до 2,5 мм – баланс металла

Кесте 4
2,5 мм-ге дейін ұсатылған бастапқы кенді байыту бойынша кең ауқымды зертханалық сынақтардың оңтайлы технологиялық көрсеткіштері – металдар балансы

Table 4
Optimal technological indicators of enlarged laboratory tests on beneficiation of initial ore crushed to 2.5 mm – metal balance

Наименование продукта	Выход, %	Содержание Σ РЗЭ, г/т	Извлечение, %
Концентрат кл. 2,5-0,1 мм	3,76	640,68	7,83
Концентрат кл. 0,1-0,0 мм	11,05	1053,76	37,83
Общий концентрат кл. 2,5-0,0 мм	14,81	948,89	45,66
Промпродукт – 1 кл. 2,5-0,1 мм	8,17	122,61	3,25
Промпродукт – 2 кл. 2,5-0,1 мм	9,48	95,15	2,90
Общий промпродукт кл. 2,5-0,1 мм	17,55	107,93	6,15
Хвосты – промпродукт кл. 0,1-0,0 мм	35,2	378,53	43,29
Общий промпродукт кл. 2,5-0,1 мм плюс хвосты – промпродукт кл. 0,1- 0,0 мм	52,75	208,5	49,44
Хвосты кл. 2,5-0,1 мм	32,44	46,44	4,90
Руда	100,0	307,78	100,0

Σ РЗЭ данные хвосты необходимо считать промпродуктом.

Оптимальные результаты укрупненно-лабораторных испытаний по обогащению руды, дробленной до 2,5 мм, приведены в таблице 4.

Согласно приведенному балансу металлов, выход общего гравитационного концентрата при обогащении руды крупностью 2,5-0,0 мм составил 14,81% со средним содержанием Σ РЗЭ 948,89 г/т и извлечением Σ РЗЭ 45,66%.

Выход общего промпродукта кл. -2,5+0,1 мм, объединенного с хвостами кл. -0,1+0,0 мм, составил 52,75% со средним содержанием Σ РЗЭ 208,5 г/т и извлечением 49,44%.

Хвосты выделяются из класса -2,5+0,1 мм, выход их составил 32,44% со средним содержанием Σ РЗЭ 46,44 г/т и извлечением 4,90%.

Полученный промпродукт обогащения необходимо подвергать дополнительной концентрации с целью повышения содержания Σ РЗЭ. В случае его объединения с хвостами обогащения всех классов крупности, их общий выход составил 85,19% со средним содержанием Σ РЗЭ 146,79 г/т и общим извлечением 54,34%.

Заключение

1. Произведен отбор представительной пробы редкоземельной руды коры выветривания.

2. На основе изучения нахождения полезных компонентов в исследуемой руде, проведены исследования по гравитационной обогатимости.

Анализ результатов гранулометрического состава – средневзвешенное содержание Σ РЗЭ элементов в пробе

руды составило 307,73 г/т. Наибольший выход и извлечение наблюдается в самом тонком классе крупностью 0,1-0,0 мм. Его выход составил 48,81% с содержанием Σ РЗЭ 511,44 г/т при извлечении 81,121%.

3. Полученные результаты по изучению фракционного состава руды показали, что исследуемая руда и в частности классы крупности крупнее 0,10 мм возможно обогащать с использованием гравитационных процессов.

4. Для обесшламливания руды использован разработанный ультразвуковой аэрогидродешламатор.

5. Гравитационное обогащение исследуемой руды осуществлялось с использованием виброцентрибежного чашевого аппарата.

6. На основании приведенного баланса металлов выход общего гравитационного концентрата при обогащении руды крупностью 2,5-0,0 мм составил 14,81% со средним содержанием Σ РЗЭ 948,89 г/т и извлечением Σ РЗЭ 45,66%.

7. Результаты исследований могут быть использованы в технологических процессах переработки как труднообогатимых редкоземельных руд коры выветривания, так и других руд. Изготовленные гравитационные аппараты по улавливанию тонкодисперсных частиц редкоземельных минералов, а также ультразвуковой аэрогидродешламатор для удаления шламистых частиц готовы к использованию в промышленных условиях.

Благодарность

Данная статья написана по результатам научно-исследовательских работ по проекту AP23488914 «Разра-

ботка технологии количественной оценки тонкодисперсного золота в природных и техногенных объектах и оценка перспектив его обнаружения на территории Казахстана» в рамках грантового финансирования на

2024-2026 годы, руководитель проекта к.т.н., профессор Шаутинов М.Р. Исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Suli L.M. Обзор технологии переработки редкоземельных минералов. / L.M. Suli, W.H.W. Ibrahim, B.A. Aziz, M.R. Deraman, N.A. Ismail. // Бюллетень исследований в области химической инженерии. 2017. Т. 19. С. 20-35 (на английском языке)
2. Koen Binnemans. Переработка редкоземельных металлов: критический обзор. / Koen Binnemans, PeterTom Jones, Bart Blanpain, Tom Van Gerven, Yongxiang Yang, Allan Walton, Matthias Buchert. // Журнал «Чистое производство». 2013. Т.15. С. 1-22 (на английском языке)
3. Юшина Т.И. Обзор рынка РЗМ и технологий переработки редкоземельного сырья. / Т.И. Юшина, И.М. Петров, С.И. Гришаев, С.А. Черный. // ГИАБ. 2015. №1. С. 577-605 (на русском языке)
4. Cheng S.K. Последние разработки в области обогащения и металлургии редкоземельных металлов: обзор. / S.K. Cheng, W.B. Li, Y.X. Han, Y.S. Sun, P. Gao, X.L. Zhang. // Журнал «Редкие элементы». 2023. С. 629-642 (на английском языке)
5. Nzeh N.S. et al. Физическое обогащение тяжелых минералов – Часть 1: Обзор современного состояния литературы по методам гравитационного обогащения. // Heliyon. 2023. Т. 9. Вып. 8. Ст. №e18919 (на английском языке)
6. Kutari A. Разработка процесса извлечения редкоземельных металлов из минерала монацита: обзор. / A. Kutari, R. Panda, M.K. Jha, J.R. Kumar, J.Y. Lee. // Инженерное дело в области добычи полезных ископаемых. 2015. Т. 79. С. 102-115 (на английском языке)
7. Ниязов А.Р. Геологическая записка «Кундыбайское титан-иттрий- редкоземельное месторождение (Республика Казахстан, Костанайская область)». Фонды АО «Кундыбай», 2010, 15 с. (на русском языке)
8. Инновационный патент РК №30418 от 15.10.2015. Виброцентробежный чашевый аппарат периодического действия. / В.В. Перегудов, М.Р. Шаутинов, Г.А. Ожогин, И.Ю. Мотовилов. НИИС (на русском языке)
9. Акказина Н.Т. Распределение суммы редкоземельных элементов в исследуемой руде коры выветривания. // Материалы XXVIII международной научно-технической конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья», Екатеринбург, 2023. – С. 201-206 (на русском языке)
10. Шаутинов М.Р. Гранулометрический состав и характер распределения редкоземельных элементов руды коры выветривания. / М.Р. Шаутинов, Ш.А. Телков, А.Б. Бегалинов, И.Ю. Мотовилов, Н.Т. Акказина. // Горный журнал Казахстана. 2013. №1-2. С. 88-93 (на русском языке)
11. Пат. 25645 РК. Центробежный гидроконцентратор. / Ш. Байысбеков, М.Р. Шаутинов, В.В. Перегудов, А.Н. Божко, Ю.Г. Сажин, Н.Т. Акказина; заявл. 29.04.2011; опубл. 16.04.2012. Бюлл. №4. 4 с. (на русском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Suli L.M. Сирек жер минералдарды өңдеу технологиясына шолу. / L.M. Suli, W.H.W. Ibrahim, B.A. Aziz, M.R. Deraman, N.A. Ismail. // Химиялық инженерияны зерттеу бюллетені. // 2017. Т.19. Б. 20-35 (ағылшын тілінде)
2. Koen Binnemans. Сирек жер элементтерді өңдеу, сыны шолу. / Koen Binnemans, PeterTom Jones, Bart Blanpain, Tom Van Gerven, Yongxiang Yang, Allan Walton, Matthias Buchert. // «Таза өндіріс» журналы. 2013. Т. 15. Б. 1-22 (ағылшын тілінде)
3. Юшина Т.И. СЖМ нарығына шолу және сирек жер шикізатын қайта өңдеу технологиялары. / Т.И. Юшина, И.М. Петров, С.И. Гришаев, С.А. Черный. // ГИАБ. 2015. №1. Б. 577-605 (орыс тілінде)
4. Cheng S.K. Сирек жер элементтерін байыту және металлургия саласындағы соңғы әзірлемелері: шолу. / S.K. Cheng, W.B. Li, Y.X. Han, Y.S. Sun, P. Gao, X.L. Zhang. // «Сирек элементтер» журналы. 2023. Б. 629-642 (ағылшын тілінде)
5. Nzeh N.S. et al. Ауыр минералдарды физикалық байыту. 1 – бөлім: Гравитациялық байыту әдістері бойынша әдебиеттің қазіргі жағдайына шолу. // Heliyon. 2023. Т. 9. Шығ. 8. Мақ. №e18919 (ағылшын тілінде)
6. Kutari A. Монацит минералынан сирек жер металдарын бөліп алу үрдісін жасақтау: шолу. / A. Kutari, R. Panda, M.K. Jha, J.R. Kumar, J.Y. Lee. // Байыту саласындағы инженерия. 2015. Т. 79. Б. 102-115 (ағылшын тілінде)

7. Ниязов А.Р. Геологиялық жазба «Құндыбай титан-итрий-сирек жер кен орны (Қазақстан Республикасы, Қостанай облысы)». АҚ «Құндыбай» қоры, 2010. 15 б. (орыс тілінде)
8. ҚР инновациялық патент №30418 15.10.2015 ж. Табақшалы ортадан тепкіш үзілімді жұмыс істейтін аппарат. / В.В. Перегудов, М.Р. Шаутинов, Г.А. Ожогин, И.Ю. Мотовилов. НИИС (орыс тілінде)
9. Акказина Н.Т. Мору қыртысындағы кендегі сирек жер элементтерінің қосынды таралуын зерттеу. // «Кен және техногендік шикізатты өңдеудің ғылыми негіздері мен практикасы» XXVIII халықаралық ғылыми-техникалық конференциясы, Екатеринбург, 2023, – Б. 201-206 (орыс тілінде)
10. Шаутинов М.Р. Мору қыртысындағы кеннің сирек жер элементтерінің гранулометриялық құрамы мен таралу сипаттамасы. / М.Р. Шаутинов, Ш.А. Телков, А.Б. Бегалинов, И.Ю. Мотовилов Н.Т. Акказина. // Қазақстанның тау-кен журналы. 2013. №1-2. Б. 388-93 (орыс тілінде)
11. Пат. 25645 ҚР. Ортадан тепкіш гидроконцентратор. / Ш. Байысбеков, М.Р. Шаутинов, В.В. Перегудов, А.Н. Божко, Ю.Г. Сажин, Н.Т. Акказина; өтінім берген күні 29.04.2011; шыққан. 16.04.2012. Бюлл. №4. 4 с. (орыс тілінде)

REFERENCES

1. Suli L.M. A Review of Rare Earth Mineral Processing Technology. / Suli L.M., Ibrahim W.H.W., Aziz B.A., Deraman M.R., Ismail N.A. // Chemical Engineering Research Bulletin. 2017. V. 19. P. 20-35 (in English)
2. Koen Binnemans. Recycling of rare earths: a critical review. / Koen Binnemans, Peter Tom Jones, Bart Blanpain, Tom Van Gerven, Yongxiang Yang, Allan Walton, Matthias Buchert. // Journal of Cleaner Production. 2013. V. 51. P. 1-22 (in English)
3. Yushina T.I. Obzor rynka RZM i tekhnologii pererabotki redkozemel'nogo syr'ya. / T.I. Yushina, I.M. Petrov, S.I. Grishaev, S.A. Chernyi. // GIAB. 2015. №1. С. 577-605 [Yushina T.I. Review of the REM market and technologies for processing of rare earth raw materials. / T.I. Yushina, I.M. Petrov, S.I. Grishaev, S.A. Chernyi. // GIAB. 2015. №1. P. 577-605] (in Russian)
4. Cheng S.K. Recent process developments in beneficiation and metallurgy of rare earths: A review. / Cheng S.K., Li W.B., Han Y.X., Sun Y.S., Gao P., Zhang X.L. // J. Rare Earths. 2023. P. 629-642 (in English)
5. Nzeh N.S. et al. Physical beneficiation of heavy minerals – Part I: A state of the art literature review on gravity concentration techniques. // Heliyon. 2023. V. 9. Issue 8. Art.№e18919 (in English)
6. Kumari A. Process development to recover rare earth metals from monazite mineral: a review. / Kumari A., Panda R., Jha M.K., Kumar J.R., Lee J.Y. // Miner. Eng. 2015. V. 79. P. 102-115 (in English)
7. Niyazov A.R. Geologicheskaya zapiska «Kundybaiskoe titan-itrii- redkozemel'noe mestorozhdenie (Respublika Kazakhstan, Kostanaiskaya oblast')». Fondy AO «Kundybai», 2010, 15 s. [Niyazov A.R. Geological note «Kundybay titanium-yttrium-rare earth deposit (Republic of Kazakhstan, Kostanay region)». Fonds of JSC «Kundybay», 2010, 15 p.] (in Russian)
8. Innovatsionnyi patent RK №30418 ot 15.10.2015. Vibrotsentrobezhnyi chashevyi apparat periodicheskogo deistviya. / V.V. Peregudov, M.R. Shautenov, G.A. Ozhogin, I.Yu. Motovilov. NIIS [Vibrating centrifugal bowl batch apparatus. Innovation patent RK №30418 from 15.10.2015. / V.V. Peregudov, M.R. Shautenov, G.A. Ozhogin, I.Yu. Motovilov. NIIS] (in Russian)
9. Akkazina N.T. Raspredelenie summy redkozemel'nykh elementov v issleduemoi rude kory vyvetrivaniya. // Materialy XXVIII mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoj konferentsii «Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya», Ekaterinburg, 2023. – С. 201-206 [Akkazina N.T. Distribution of the sum of rare-earth elements in the studied ore of the weathering crust. // XXVIII International Scientific and Technical Conference «Scientific bases and practice of processing of ores and technogenic raw materials», Ekaterinburg, 2023. – P. 201-206] (in Russian)
10. Shautenov M.R. Granulometricheskii sostav i kharakter raspredeleniya redkozemel'nykh elementov rudy kory vyvetrivaniya. / M.R. Shautenov, Sh.A. Telkov, A.B. Begalinov, I.Yu. Motovilov, N.T. Akkazina. // Gornyi zhurnal Kazakhstana. 2013. №1-2. S. 88-93 [Shautenov M.R. Granulometric composition and character of distribution of rare-earth elements of weathering crust ore. / M.R. Shautenov, Sh.A. Telkov, A.B. Begalinov, I.Yu. Motovilov, N.T. Akkazina. // Mining Journal of Kazakhstan. 2013. №1-2. P. 88-93] (in Russian)
11. Pat. 25645 RK. Tsentrobezhnyi gidrokonsentrator. / Sh. Baiysbekov, M.R. Shautenov, V.V. Peregudov, A.N. Bozhko, Yu.G. Sazhin, N.T. Akkazina; zayavl. 29.04.2011; opubl. 16.04.2012. Byull. №4. 4 s. [Pat. 25645 RK. Centrifugal hydro concentrator. / Sh. Baiysbekov, M.R. Shautenov, V.V. Peregudov, A.N. Bozhko, Yu.G. Sazhin, N.T. Akkazina; 29.04.2011; published 16.04.2012. Bulletin №4. 4 p.] (in Russian)

Сведения об авторах:

Шаутинов М.Р., к.т.н., профессор кафедры «Металлургия и обогащение полезных ископаемых» Горно-металлургического института им. О.А. Байконурова, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), m.shautenov@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-0266-3882>
Акказина Н.Т., магистр технических наук, докторант кафедры «Горное дело», Горно-металлургического института им. О.А. Байконурова, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), n.akkazina@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-9042-6130>
Морозов Ю.П., д.т.н., профессор кафедры «Обогащение полезных ископаемых», Уральский государственный горный университет (г. Екатеринбург, Россия), tails2002@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0554-5176>

Авторлар туралы мәліметтер:

Шаутинов М.Р., т.ғ.к., «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасының профессоры, Ө.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен-металлургия институты, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)
Акказина Н.Т., техника ғылымдарының магистры, «Тау-кен ісі» кафедрасының докторанты, Ө.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен-металлургия институты, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)
Морозов Ю.П., т.ғ.д., «Пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасының профессоры, Урал мемлекеттік тау-кен университеті (Екатеринбург қ., Ресей)

Information about the authors:

Shautenov M., Candidate of Technical Sciences, Professor of «Metallurgy and Mineral Processing» department, Mining and Metallurgical Institute after named O.A. Baikonurov, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)
Akkazina N., Master of Technical Sciences, Doctoral student of «Mining» department, Mining and Metallurgical Institute after named O.A. Baikonurov, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)
Morozov Yu., Doctor of Technical Sciences, Professor of «Mineral Processing» department, Ural State Mining University (Ekaterinburg, Russia)

МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

СПТОКРАНЫ

СПЕЦТЕХНИКА И ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

18-20 марта 2025 г.
 УВК Тимирязев центр

СПТОКРАНЫ

WWW.CRANE-EXPO.RU

