Статья поступила в редакцию: 23.09.2026
Статья принята к публикации: 01.10.2026
Статья опубликована: 07.11.2026

УДК 66.014

Магнитное обогащение глауконитовой руды месторождения Чанги: распределение K_2O и Fe_2O_3 между продуктами сепарации

Мирсалимова Саодат Рахматжановна
канд. хим. наук, проф.
кафедры Химической инженерии, Ферганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Фергана
Ортикова Сафие Саидмамбиевна
д-р философии, доц.
кафедры Химической инженерии, Ферганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Фергана
Турдиалиев Умид Мухтаралиевич
д-р техн. наук, проф.
кафедры Материаловедение и химическая инженерия, Андижанский государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Андижан
Орипова Зарнигор Маткулбек кизи
докторант (PhD)
кафедры Материаловедение и химическая инженерия, Андижанский государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Андижан
E-mail: zarnigorxonoripova@gmail.com

Magnetic beneficiation of glauconite ore from the Changi deposit: distribution of K_2O and Fe_2O_3 among separation products

Mirsalimova Saodat Rakhmatjanovna
candidate of Chemical Sciences, Professor
Department of Chemical Engineering, Fergana State Technical University
Republic of Uzbekistan, Fergana
Ortikova Safie Saidmambievna
PhD in Chemical Sciences, Associate Professor
Department of Chemical Engineering, Fergana State Technical University
Republic of Uzbekistan, Fergana
Turdialiyev Umid Mukhtaralievich
doctor of Technical Sciences, Professor
Department of Materials Science and Chemical Engineering, Andijan State Technical Institute
Republic of Uzbekistan, Andijan

Библиографическое описание: Магнитное обогащение глауконитовой руды месторождения Чанги: распределение K_2O и Fe_2O_3 между продуктами сепарации // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. Мирсалимова С.Р. [и др.]. 2026. 11(149). URL: https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23536

Oripova Zarnigor Matkulbek qizi
PhD Student
Department of Materials Science and Chemical Engineering, Andijan State Technical Institute
Republic of Uzbekistan, Andijan

Аннотация

В статье представлены результаты исследования магнитного обогащения глауконитовой руды месторождения Чанги в Узбекистане с целью оценки перераспределения K_2O и Fe_2O_3 между продуктами сепарации и определения возможности получения обогащенного калийсодержащего агроминерального сырья. Исходную руду предварительно сушили, дробили и измельчали, после чего выполняли ситовую классификацию и магнитное разделение с использованием постоянного неодимового магнита NdFeB. Наибольший выход после измельчения пришелся на фракцию −0,150+0,075 мм и составил 39,60 %. Химический состав исходного материала и продуктов сепарации оценивали методом рентгенофлуоресцентного анализа; дополнительно использовали энергодисперсионный анализ. Установлено, что содержание K_2O в исходной руде составляло 1,20 %, тогда как в немагнитной фракции оно повысилось до 2,14 %, что соответствует относительному увеличению концентрации примерно на 78 %. Одновременно содержание Fe_2O_3 в магнитной фракции увеличилось до 48,7 %, а в немагнитной снизилось до 38,2 % по сравнению с 47,8 % в исходном материале. Полученные результаты свидетельствуют о селективном перераспределении железосодержащих компонентов при магнитной сепарации и показывают возможность получения немагнитного продукта с повышенным относительным содержанием калия. Для окончательной оценки технологической эффективности необходимы материальный баланс, расчет извлечения компонентов и расширенная минералогическая характеристика.

Abstract

The article presents the results of magnetic beneficiation of glauconite ore from the Changi deposit in Uzbekistan, aimed at evaluating the redistribution of K_2O and Fe_2O_3 between the separation products and assessing the possibility of obtaining enriched potassium-bearing agromineral raw material. The ore was preliminarily dried, crushed and ground, followed by sieve classification and magnetic separation using a permanent NdFeB neodymium magnet. The highest yield after grinding was obtained for the −0.150+0.075 mm fraction and amounted to 39.60 %. The chemical composition of the initial material and separation products was evaluated by X-ray fluorescence analysis, with additional energy-dispersive analysis. The K_2O content in the initial ore was 1.20 %, whereas it increased to 2.14 % in the non-magnetic fraction, corresponding to an approximately 78 % relative increase in concentration. At the same time, Fe_2O_3 increased to 48.7 % in the magnetic fraction and decreased to 38.2 % in the non-magnetic fraction compared with 47.8 % in the initial material. The results indicate selective redistribution of iron-bearing components during magnetic separation and demonstrate the possibility of obtaining a non-magnetic product with an increased relative potassium content. A complete material balance, component recovery calculations and expanded mineralogical characterization are required for a final assessment of the technological efficiency of the process.

Ключевые слова: глауконит, месторождение Чанги, магнитная сепарация, оксид калия, оксид железа (III), Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА).

Keywords: glauconite, Changi deposit, magnetic separation, potassium oxide, iron (III) oxide, X-ray fluorescence (XRF) analysis.

Введение

Обеспечение сельскохозяйственных культур доступными формами калия является одной из актуальных задач современного земледелия, поскольку калий относится к основным макроэлементам питания растений и участвует в регулировании водного режима, ферментативной активности, транспорта ассимилятов и устойчивости растений к стрессовым факторам. Одновременно современное сельское хозяйство сталкивается с необходимостью повышения эффективности использования минеральных ресурсов и поиска альтернативных источников элементов питания. В этой связи возрастает интерес к природным силикатным минералам как потенциальным источникам калия для сельскохозяйственного производства. Международные исследования рассматривают глауконит как перспективный калийсодержащий агроминеральный ресурс, однако отмечают его сравнительно низкую растворимость и медленное высвобождение калия, что ограничивает непосредственную эффективность необогащенного сырья [8, 2, 9, 4].

Глауконит представляет собой калийсодержащий слоистый алюмосиликат, в структуре которого калий преимущественно находится в межслоевом пространстве. Благодаря этому глауконит может рассматриваться как источник калия пролонгированного действия. Вместе с тем природные глауконитовые руды являются полиминеральными системами и, кроме глауконита, могут содержать кварц, полевые шпаты, глинистые и железосодержащие минералы. Поэтому эффективность использования такого сырья в качестве агроминерального материала определяется не только общим содержанием K_2O, но и степенью раскрытия минеральных агрегатов, гранулометрическим составом, минеральными ассоциациями и формой нахождения калия [8, 3, 4, 9].

Современные международные исследования показывают, что предварительное физическое обогащение является одним из перспективных направлений повышения качества глауконитового сырья. В частности, дробление, измельчение, классификация по крупности и магнитная сепарация применяются для удаления пустой породы и железосодержащих компонентов и повышения относительной концентрации глауконитовой составляющей [2, 7]. На примере глауконитовых пород месторождения Bakchar было показано, что сочетание гранулометрической классификации и магнитного разделения позволяет существенно повысить содержание глауконита и K_2O в целевом продукте [7]. Аналогичные исследования глауконитового сырья Индии показали возможность повышения содержания K_2O посредством физического обогащения перед последующей химической переработкой [9].

Однако анализ современных публикаций показывает, что между физическим обогащением глауконита и его последующей химической активацией существует важная технологическая проблема. Простое кислотное выщелачивание может обеспечивать низкое извлечение калия, тогда как более высокая степень его мобилизации (повышения подвижности калия) в ряде исследований достигалась с использованием термической

обработки, кислотного выщелачивания или их комбинации [4, 7, 9]. Например, для некоторых глауконитовых пород прямое кислотное выщелачивание обеспечивало ограниченное извлечение калия, тогда как предварительная термическая активация существенно повышала степень его перехода в раствор [9, 4].

В то же время представляет интерес развитие более энергоэффективных физических методов предварительной подготовки глауконитового сырья. Исследования механической активации показывают, что интенсивное измельчение способно изменять дисперсность, удельную поверхность, структурные характеристики и катионообменные свойства глауконита, что создает предпосылки для повышения доступности калия без обязательного применения высокотемпературной обработки [3]. Таким образом, научно обоснованный выбор условий измельчения и магнитного разделения может рассматриваться как важный этап получения обогащенного калийсодержащего агроминерального сырья.

Для Узбекистана данная проблема имеет особое значение в связи с наличием местных глауконитсодержащих ресурсов, потенциал которых для получения отечественного агроминерального сырья изучен недостаточно. Одним из перспективных объектов является месторождение Чанги, расположенное в Паркентском районе Ташкентской области.По опубликованным данным, глауконитсодержащие песчаники данного месторождения характеризуются значительными запасами и сложным полиминеральным составом [1]. Наличие в руде глауконита наряду с кварцем, полевыми шпатами, глинистыми и железосодержащими компонентами обусловливает необходимость проведения предварительного обогащения перед дальнейшим использованием материала в производстве калийсодержащих и комплексных удобрений.

Несмотря на наличие международных исследований по физическому и химическому обогащению глауконитовых руд, распределение K_2O и Fe_2O_3 между продуктами магнитной сепарации именно глауконитсодержащей руды месторождения Чанги остается недостаточно изученным. В частности, представляет научный и практический интерес установить, насколько магнитное разделение позволяет удалить железосодержащую составляющую и одновременно повысить относительную концентрацию калия в немагнитном продукте. Решение этой задачи позволит обосновать возможность использования местного глауконитового сырья в качестве промежуточного агроминерального продукта.

Цель исследования — установить закономерности распределения K_2O и Fe_2O_3 между магнитной и немагнитной фракциями глауконитсодержащей руды месторождения Чанги после механической подготовки и магнитной сепарации, а также оценить перспективность использования полученной немагнитной фракции в качестве обогащенного калийсодержащего агроминерального сырья.

Материалы и методы

В качестве исходного материала использовали глауконитсодержащую руду месторождения Чанги, расположенного в Паркентском районе Ташкентской области [1]. Образец предварительно вручную отсортировали и подготовили навеску массой 200 г. Для удаления физически связанной влаги материал сушили при 105 °C. После сушки масса образца составила около 190 г, что соответствует потере примерно 5 %.

Первичное дробление выполняли на щековой дробилке J-100×100. Далее материал подвергали тонкому измельчению в ножевой мельнице IKA M20 при частоте вращения 20 000 об/мин. После измельчения проводили ситовой анализ с использованием сит 3,15; 2,50; 1,70; 0,50; 0,150 и 0,075 мм. Выход каждой фракции рассчитывали как отношение массы отдельной фракции к исходной массе анализируемой навески.

Для магнитного разделения использовали постоянный неодимовый магнит NdFeB марки N42 с поверхностной напряженностью магнитного поля около 0,5 Т. Материал распределяли тонким слоем на стеклянной поверхности, а магнит перемещали на расстоянии около 10 мм от образца в течение 5 мин при ручном перемешивании. Для повышения полноты разделения процедуру повторяли три раза. В результате получали магнитную и немагнитную фракции.

Химический состав определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (рис.), дополнительно использовали энергодисперсионный анализ [5, 6]. Особое внимание уделяли содержанию K_2O и Fe_2O_3 как показателям, характеризующим агрохимическую ценность и эффективность удаления железосодержащих компонентов. В интерпретации результатов учитывали, что спектральные методы, приведенные в исходном исследовании, имеют преимущественно полуколичественный характер.

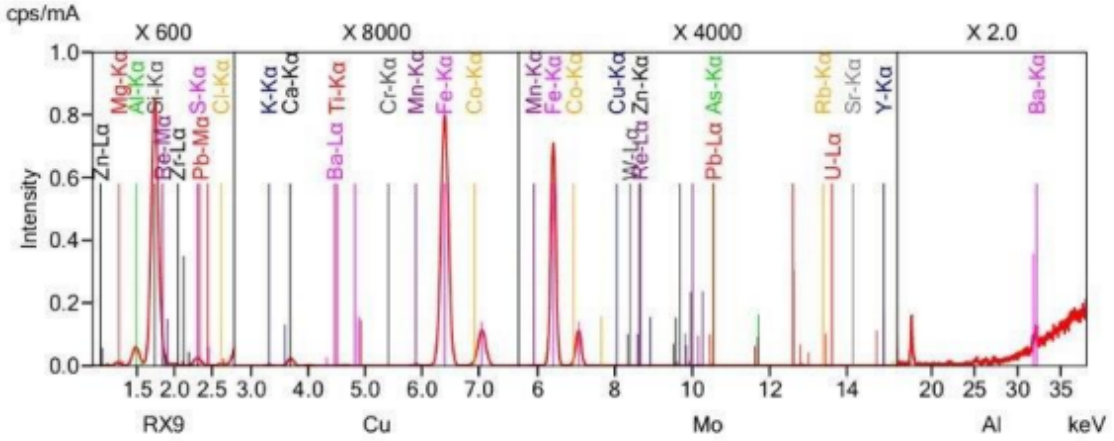


Рисунок 1. Спектральный анализ природного глауконита

Результаты и обсуждения

После измельчения руда интенсивно переходила в тонкодисперсное состояние. Наибольший выход пришелся на фракцию −0,150+0,075 мм и составил 39,60 %. Доля фракции −1,7+0,5 мм составила 18,78 %, −0,5+0,150 мм — 14,13 %, −2,5+1,7 мм — 8,03 %, −3,15+2,5 мм — 5,58 %, а фракции +3,15 мм — 12,06 %. Полученное распределение показывает, что исходный материал сравнительно легко дезинтегрируется при механическом воздействии.

Таблица 1. Значения

Фракция, мм	Масса, гр	Выход, %
+3,15	9,65	12,06
-3,15+2,50	4,4623	5,58

Фракция, мм	Масса, гр	Выход, %
-2,50+1,70	6,4235	8,03
-1,70+0,50	15,0215	18,78
-0,50+0,150	11,3013	14,13
-0,150+0,075	31,6775	39,60

Высокая доля тонкой фракции имеет технологическое значение, поскольку уменьшение размера частиц повышает степень раскрытия минеральных агрегатов и создает более благоприятные условия для последующего магнитного разделения [9,4]. В исследовании именно тонкодисперсный материал рассматривался как перспективный объект дальнейшего физико-химического анализа.

Исходная руда характеризовалась содержанием K_2O 1,20 % и Fe_2O_3 47,8 %. После магнитного разделения химический состав продуктов изменился. В магнитной фракции содержание Fe_2O_3 достигло 48,7 %, что подтверждает концентрирование железосодержащих компонентов. В немагнитном продукте содержание Fe_2O_3 составило 38,2 %, а K_2O — 2,14 %. Таким образом, целевая немагнитная фракция характеризовалась более высоким относительным содержанием K_2O по сравнению с исходным материалом и меньшим содержанием Fe_2O_3.

Таблица 2. Значения

Продукт	K_2O, %	Fe_2O_3, %	Основная характеристика
Исходная руда	1,20	47,8	Исходный полиминеральный материал
Магнитная фракция	1,20	48,7	Обогащена железосодержащими компонентами
Немагнитная фракция	2,14	38,2	Повышенное относительное содержание K_2O

Полученные данные указывают на селективный характер магнитного разделения. Повышение содержания Fe_2O_3 в магнитной фракции связано с переходом в нее железосодержащих минералов и фаз с повышенной магнитной восприимчивостью [9,4]. Одновременно снижение содержания Fe_2O_3 в немагнитной фракции свидетельствует о частичном удалении железистых компонентов из целевого продукта. Особенно важным результатом является увеличение содержания K_2O в немагнитной фракции до 2,14 %. По сравнению с исходными 1,20 % это соответствует относительному повышению концентрации K_2O примерно в 1,78 раза, или примерно на 78 %. При этом данный показатель следует трактовать как изменение концентрации в продукте, а не как извлечение всего калия из исходной руды: для расчета истинного извлечения необходимы массы исходного материала и обеих продуктов сепарации.

Снижение Fe_2O_3 с 47,8 до 38,2 % в немагнитной фракции соответствует уменьшению концентрации примерно на 9,6 процентного пункта, или приблизительно на 20,1 % относительно исходного значения. В магнитном продукте Fe_2O_3 составило 48,7 %. Это подтверждает направленное концентрирование железосодержащей составляющей магнитным методом.

С технологической точки зрения полученная немагнитная фракция представляет интерес как промежуточное агроминеральное сырье. Сохранение калия в алюмосиликатной части материала принципиально важно для дальнейшего получения удобрений пролонгированного действия. В то же время магнитная фракция не должна рассматриваться только как отход: ее повышенное содержание железа может быть основанием для отдельной оценки возможности использования в качестве железосодержащей минеральной добавки или другого функционального материала.

Следует учитывать ограничения проведенного исследования. XRF/EDS-данные характеризуют химический состав и распределение элементов, но не позволяют полностью установить кристаллические фазы. Для более строгой минералогической интерпретации необходимы XRD, SEM-EDS и, при необходимости, термический анализ. Кроме того, для количественной оценки эффективности сепарации необходимы материальный баланс, выход магнитной и немагнитной фракций, а также расчет извлечения K_2O и Fe_2O_3.

На основании полученных результатов предлагаемая последовательность подготовки глауконитовой руды может быть представлена следующим образом: исходная руда → сушка → дробление → тонкое измельчение → ситовая классификация → выбор тонкой фракции → магнитная сепарация → магнитный продукт + немагнитный продукт. Такая схема не предусматривает термического обжига и может рассматриваться как физический этап предварительного обогащения. Немагнитный продукт с повышенным содержанием K_2O может быть направлен на последующую активацию или использован как минеральная основа для получения комплексных удобрений. В соответствии с дальнейшим направлением исследований к нему могут добавляться фосфорсодержащие компоненты и азотные соединения. Однако рецептуру конечного удобрения следует оптимизировать уже после установления полного химического и минералогического состава обогащенного продукта.

Для следующего этапа целесообразно определить выход каждого продукта сепарации и составить полный материальный баланс. Это позволит перейти от сравнения концентраций к количественной оценке извлечения: определить, какая доля исходного K_2O сохраняется в немагнитном продукте и какая доля Fe_2O_3 переводится в магнитный концентрат. Такой подход существенно усилит доказательность технологической эффективности процесса.

Заключение

Исследовано магнитное обогащение глауконитовой руды месторождения Чанги. Ситовой анализ показал преобладание тонкой фракции −0,150+0,075 мм с выходом 39,60 %. Магнитная сепарация обеспечила перераспределение железосодержащих компонентов между продуктами разделения. В магнитной фракции содержание Fe_2O_3 достигло 48,7 %, тогда как в немагнитной фракции оно составило 38,2 %. Содержание K_2O в немагнитном продукте достигло 2,14 % против 1,20 % в исходной руде.

Таким образом, магнитная сепарация является перспективной предварительной операцией для повышения относительной концентрации калия и снижения содержания железа в целевой немагнитной фракции глауконитового сырья. Полученный продукт может рассматриваться как перспективная минеральная основа для дальнейшей разработки

калийсодержащих и комплексных удобрений. Для окончательной оценки эффективности процесса необходимы материальный баланс, расчет извлечения компонентов и расширенная минералогическая характеристика с применением XRD.

Список литературы

1. Beskrovny Yu. V., Veretennikov G.G., Galkina N.V., Ibadullaev S.I., Mirkhodjaev I.M. Glauconite Deposits of Changi and Prospects for Its Use. – Tashkent: Fan Publishing House, 1970. – 54 P.
2. Franzosi C., Castro L.N., Celeda A.M. Technical Evaluation of Glauconies as Alternative Potassium Fertilizer from the Salamanca Formation, Patagonia, Southwest Argentina // Natural Resources Research. – 2014. – T. 23, № 3. – P. 311–320.
3. Guggenheim S. et al. Summary of Recommendations of the AIPEA Nomenclature Committee // Clays and Clay Minerals. – 2007. – T. 55, № 6. – P. 644–648.
4. Huggett J.M. Glauconite // Encyclopedia of Geology. Vol. 3. – Amsterdam: Elsevier, 2005. – T. 3. – P. 542–548.
5. ISO 22309:2011. Microbeam Analysis – Quantitative Analysis Using Energy-Dispersive Spectrometry (EDS) for Elements with an Atomic Number of 11 (Na) or Above. – Geneva: ISO, 2011. – 22 P.
6. ISO 12677:2011. Chemical Analysis of Refractory Products by XRF – Fused Cast Bead Method. – Geneva: ISO, 2011. – 75 P.
7. Karimi E., Abdolzadeh A., Sadeghipour H.R., Aminei A. The Potential of Glauconitic Sandstone as a Potassium Fertilizer for Olive Plants // Archives of Agronomy and Soil Science. – 2012. – T. 58, № 9. – P. 983–993.
8. McRae S.G. Glauconite // Earth-Science Reviews. – 1972. – T. 8, № 4. – P. 397–440.
9. Odin G.S. Green Marine Clays: Oolitic Ironstone Facies, Verdine Facies, Glaucony Facies and Celadonite-Bearing Facies: A Comparative Study. – Amsterdam: Elsevier, 1988. – 445 P.
10. Rudmin M., Abdullayev E., Ruban A., Buyakov A., Soktoev B. Mechanochemical Preparation of Slow Release Fertilizer Based on Glauconite–Urea Complexes // Minerals. – 2019. – T. 9, № 9. – Art. 507. – P. 1–10.