

УДК 552.574 © А.Г. Комарова^{1,3}, Т.А. Чикишева^{1,2,3},
Н.Ю. Турецкая^{1,2}, 2024

UDC 552.574 © A.G. Komarova^{1,3}, T.A. Chikisheva^{1,2,3},
N.Yu. Turetskaya^{1,2}, 2024

¹ ООО НПК «Спирит», 664033, г. Иркутск, Россия

² ФГБУН «Институт земной коры СО РАН, 664033, г. Иркутск, Россия

³ ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»,
664003, г. Иркутск, Россия

✉ e-mail: cta@spirit-irk.ru

¹ LLC SPC "Spirit", Irkutsk, 664033, Russian Federation

² Institute of the Earth Crust of SB RAS, Irkutsk, 664033, Russian Federation

³ Irkutsk State University, Irkutsk, 664003, Russian Federation
✉ e-mail: cta@spirit-irk.ru

Хвосты обогащения отходов угледобычи ОФ «Краснобродская-Коксовая»: минералогический анализ и потенциально ценные компоненты*

Tailings for enrichment of coal mining wastes of the Krasnobrodskaya-Koksovaya Plant: mineralogical analysis and potentially value components

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-7-23-27>

В статье содержатся результаты минералогического анализа хвостов обогащения угольных шламов. Авторами установлено, что в данном продукте содержатся дополнительные ценные компоненты, такие как железо, титан и ванадий. Для дальнейшего обогащения данного сырья авторы рекомендуют магнитную сепарацию и химические методы обогащения для достижения комплексности переработки.

Ключевые слова: отходы угледобычи, угольные шламы, комплексная переработка минерального сырья, Кузнецкий угольный бассейн.

Для цитирования: Комарова А.Г., Чикишева Т.А., Турецкая Н.Ю. Хвосты обогащения отходов угледобычи ОФ «Краснобродская-Коксовая»: минералогический анализ и потенциально ценные компоненты // Уголь. 2024;(7):23-27.

DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-23-27.

КОМАРОВА А.Г.

Ведущий инж.-минер.
ООО НПК «Спирит»,
преподаватель кафедры
полезных ископаемых,
геохимии, минералогии и петрографии
ФГБОУ ВО «Иркутский
государственный университет»,
664003, г. Иркутск, Россия,
e-mail: kag@spirit-irk.ru

ЧИКИШЕВА Т.А.

Канд. геол.-минер. наук,
младший научный сотрудник
отдела комплексного
использования минерального сырья
ФГБУН «Институт земной коры СО РАН,
руководитель минер. группы
ООО НПК «Спирит»,
доцент кафедры полезных ископаемых,
геохимии, минералогии и петрографии
ФГБОУ ВО «Иркутский
государственный университет»,
664003, г. Иркутск, Россия,
e-mail: cta@spirit-irk.ru

* Работы выполнены в рамках комплексного научно-технического проекта при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2022-1192 «Переработка хвостов угольных обогатительных фабрик с целью получения товарного угольного концентрата» при поддержке комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации № 1144-р от 11 мая 2022 г.

ТУРЕЦКАЯ Н.Ю.

Ведущий инженер отдела комплексного использования минерального сырья ФГБУН «Институт земной коры СО РАН», руководитель группы обогащения углей и золошлаковых отходов ООО НПК «Спирит», 664033, г. Иркутск, Россия, e-mail: tny@spirit-irk.ru

Abstract

The article contains the mineralogical analysis results of enrichment tailings from coal sludge. The authors have found that this product contains additional valuable components such as iron, titanium and vanadium. For further enrichment of this raw material, the authors recommend magnetic separation and chemical enrichment methods to achieve comprehensive processing.

Keywords

Coal mining waste, coal sludge, complex processing of mineral raw materials, Kuznetsk coal basin.

For citation

Komarova A.G., Chikisheva T.A., Turetskaya N.Yu. Tailings for enrichment of coal mining wastes of the Krasnobrodskaya-Koksovaya Plant: mineralogical analysis and potentially value components. *Ugol'*. 2024;(7):23-27. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-23-27.

Acknowledgements

The work was carried out within the framework of the complex scientific and technical project of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation № 075-15-2022-1192 "Processing of coal preparation plant tailings to produce commercial coal concentrate" with the support of the complex scientific and technical programme of full innovation cycle "Development and implementation of a set of technologies in the field of exploration and production of solid minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new products of deep processing of coal raw materials with consistent reduction of ecological load on the environment and risks for the life of the population", approved by Decree of the Government of the Russian Federation No. 1144-r dated May 11, 2022.

ВВЕДЕНИЕ

Угольные шламы, которые на сегодняшний день рассматриваются только как дополнительная сырьевая база в получении топлива [1, 2], в то же время могут быть источниками ценных компонентов, таких как селен, уран, ванадий, германий, галлий, железо, алюминий, магний, редкоземельные элементы и элементы платиновой группы [3, 4, 5]. Поэтому к освоению техногенных месторождений угля стоит подходить с точки зрения комплексности их переработки.

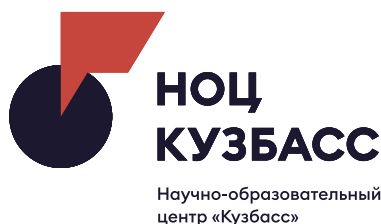
Ряд исследований, которые были проведены на отходах угледобычи, позволили разработать технологию получения угольного концентрата [6, 7, 8], но при этом получать новые хвосты обогащения, для которых необходимо искать область применения и которые несут в себе другие неорганические потенциально ценные компоненты.

Для оценки возможности дополнительного извлечения ценных компонентов из вторичных хвостов обогащения угольных шламов необходимо изучить их вещественный состав. Данная информация поможет выявить элементы, представляющие промышленный интерес, и определится с альтернативной технологией их обогащения.

Цель данной работы заключалась в минералогической оценке породной части угольных шламов на примере хвостов обогащения отходов угледобычи ОФ «Краснобродская-Коксовая».

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Объектом исследований стала технологическая проба, отобранная из отходов угледобычи ОФ «Краснобродская-Коксовая». Химический анализ исходной пробы выполнен при помощи атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-AES). Определение зольности сухого топлива исходного материала и продуктов обогащения выполнено методом ускоренного озоления. Оптико-минералогический анализ исходного сырья выполнялся по методическим рекомендациям НСОММИ стереомикроскопом Микромед MC-2-ZOOM 2CR.



РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате изучения химического состава исходного сырья были установлены следующие токсичные элементы-примеси, входящие в химический состав, а именно: мышьяк (менее 0,0005%), хром (0,0021%), магний (0,348%), ртуть (менее 0,0005%), сера (0,178%), селен (менее 0,0005%), бериллий (менее 0,0002%) и ванадий (0,0014%).

Из установленных химических элементов промышленный интерес может представлять железо, содержание которого составляет 1,44% при условии, если оно представлено рудным сырьем, а не входит в химический состав породообразующих минералов.

Из ценных элементов-примесей в состав исходного сырья также входят серебро, лантан, молибден, скандий, селен, свинец и иттрий. Массовые доли перечисленных компонентов составляют тысячные доли процентов или находятся на пределе чувствительности и промышленного интереса в попутном их извлечении не несут, поскольку это будет экономически нецелесообразно.

В результате проведения гранулометрического анализа установлено, что исходный материал в основной своей массе (53,89%) представлен тонкодисперсным материалом крупностью менее 20 мкм с зольностью сухого топлива (A^d) 40,5%. Крупность материала более 125 мкм отличается повышенным показателем A^d – 66,19%. В исходном сырье выход данного материала составляет 15,37%. В диапазоне от 20 до 125 мкм показатель A^d составляет 26,61% с выходом 30,74%. Показатель зольности исходного сырья составляет 40,18%. Предположительно, практический интерес по всем своим показателям может представлять материал, находящийся в диапазоне крупности от 20 до 125 мкм.

По разработанной предшественниками технологии [6, 7, 8], которая основывается на методе винтовой сепарации, из исследуемого материала были получены два продукта обогащения: угольный концентрат с зольностью до 20% и породный продукт (хвосты), который является хвостами вторичной переработки, где потенциально и должны сконцентрироваться минералы – носители ценного компонента, а именно железа.

Дальнейшее исследование хвостовой породной части было выполнено при помощи минералогических исследований, которые в свою очередь позволят определиться с дальнейшей технологией переработки.

Минералогический анализ породной части вторичного обогащения угольных шламов

В результате проведения гравитационного фракционирования установлено, что основная масса пробы сложена

материалом легкой фракции – 69,60%. Промежуточная и тяжелая фракции составляют 22,00 и 8,40% (табл. 1).

При проведении магнитного фракционирования тяжелой фракции установлено, что она преимущественно сложена средне- и слабомагнитным материалом – 6,19%. Сильномагнитная фракция составляет 1,76%, а немагнитная – 0,45%.

В результате проведения полуколичественного анализа хвостов обогащения было установлено, что основная масса пробы сложена углем и минеритами – 62,58% (табл. 2). Значительное количество материала пробы (21,56%) сложено карбонатами: кальцитом, доломитом и сидеритом. Также в материале пробы присутствуют кварц, полевые шпаты и глинистые минералы. Рудные минералы – магнетит и сульфиды обнаружены в материале пробы в количестве 1,76 и 0,16% соответственно. В единичных зернах визуализируются слюды, гидроксиды железа, амфиболы, пироксены, апатит, барит, шеелит, анатаз, циркон, хлорит и оливин.

Изучение рудных минералов, входящих в состав угле-содержащей пробы, производилось на двух выделенных фракциях – сильномагнитной и немагнитной с применением сканирующего электронного микроскопа MIRA3 LMH TESCAN в режиме обратнорассеянных электронов.

Результаты применения сканирующей электронной микроскопии показали, что сильномагнитная фракция сложена магнетитом. Магнетит представляет собой обломки неправильной формы, а также образует скелетные кристаллы. Наблюдаются структуры распада твердых растворов – ламели ильменита в магнетите. Часто обнаруживаются сростки магнетита с амфиболами, фаялитом и хлоритом. Все многообразие форм и сростаний магнетита представлено на рис. 1.

При изучении элементного состава магнетита (табл. 3) в нем установлены постоянные примеси Ti, Al и V (среднее содержание: 0,92; 0,76 и 1% соответственно). Содержание железа в нем колеблется от 68,31 до 70,13%.

Особую ценность магнетит из данного сырья представляет как носитель ванадия (содержание – около 1%), который относится к редким рассеянными элементам, не встречающимся в природе в свободном виде и не образующим собственных месторождений. Ванадий в основном добывается как попутный компонент из железо-титановых руд, поэтому магнетит из отходов угледобычи можно рассматривать как альтернативный источник этого элемента (см. рис. 1).

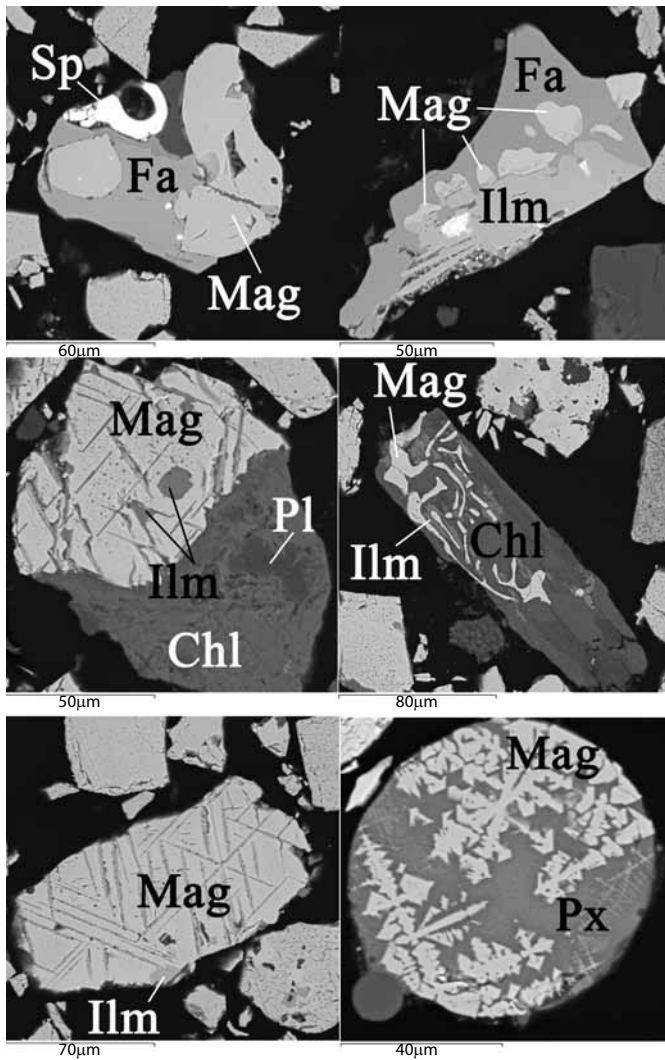
В немагнитной фракции из рудных минералов обнаружены пирит, халькопирит, галенит, сфалерит, шеелит, циркон

Таблица 1

Результаты гравитационного и магнитного фракционирования

The results of gravitational and magnetic fractionation

Фракция	Выход, %	Минералы
Легкая (< 1,5 г/см ³)	69,60	Уголь, минериты, глинистые минералы, кварц, кальцит, доломит, полевые шпаты
Промежуточная (1,5-2,89 г/см ³)	22,00	Минериты, глинистые минералы, кварц, кальцит, доломит, полевые шпаты
Тяжелая (> 2,89 г/см ³)	МФ	Магнетит, халькопирит, оливин
	ЭМФ	Сидерит, глинистые минералы
	НМФ	Сульфиды, сидерит, барит, апатит, кальцит, доломит, циркон, анатаз, минериты
Итого:	100,00	100,00

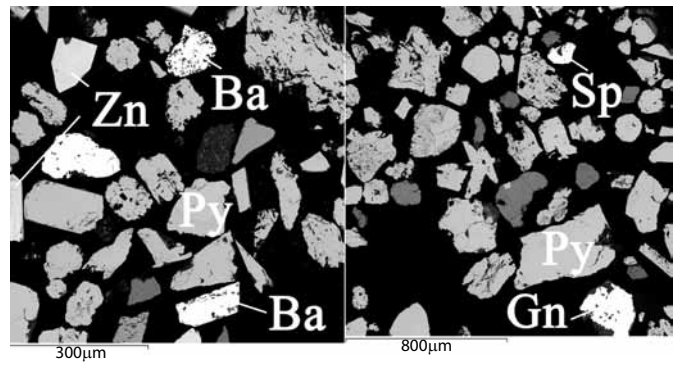


Изображения в обратнорассеянных электронах

Рис. 1. Разнообразие форм и сростаний магнетита
Fig. 1. The diversity of forms and accretions of magnetite

и барит. Минералы чаще всего представлены обломками кристаллов неправильной формы (рис. 2).

Пирит в основном представлен зернами неправильной формы, реже – фрамбоидами рассеянными в матрице смешаннослойных образований и сростаний его удлиненных кристаллов (рис. 3).



Изображения в обратнорассеянных электронах

Рис. 2. Рудные минералы немагнитной фракции: пирит (Py), галенит (Gn), сфалерит (Sp), циркон (Zn) и барит (Ba)

Fig. 2. Ore minerals of non-magnetic fraction: pyrite (Py), galena (Gn), sphalerite (Sp), zircon (Zn) and barite (Ba)

Таблица 2

Минеральный состав
Mineral composition

Компонент	Содержание, % отн.
*Чистый уголь	13,92
**Минералы	48,66
Кальцит, доломит	16,25
Сидерит	5,31
Кварц	5,02
Полевые шпаты	5,02
Слюды (биотит, мусковит, гидрослюды)	Ед. зн.
Глинистые минералы (каолинит и смешаннослойные образования гидрослюд и смектита)	3,90
Гидроксиды железа	Ед. зн.
Амфиболы, пироксены	Ед. зн.
Апатит	Ед. зн.
Барит	Ед. зн.
Магнетит	1,76
Сульфиды (пирит, халькопирит, сфалерит, галенит)	0,16
Шеелит	Ед. зн.
Анализ	Ед. зн.
Циркон	Ед. зн.
Хлорит	Ед. зн.
Фаялит	Ед. зн.
Итого:	

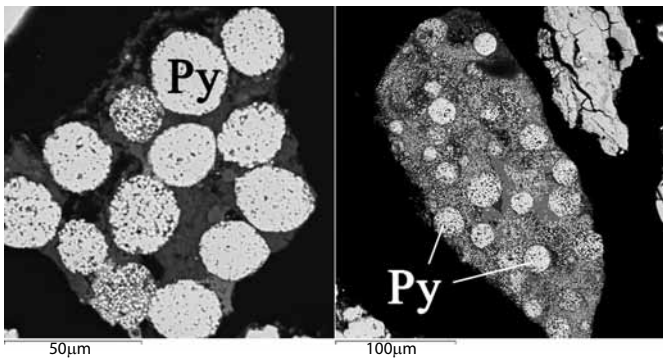
* угли чистые или слабозагрязненные

** угольные минеральные ассоциации с содержанием минеральной составляющей в зерне в среднем от 20 до 60% [3]

Таблица 3

Элементный состав магнетита
The elemental composition of magnetite

№ измерения	Fe	Ti	Al	V	O	Итого:
1	69,21	0,32	0,23	-	30,62	100,38
2	69,28	0,75	0,79	1,01	29,19	101,02
3	69,85	0,55	0,35	1,03	28,12	99,90
4	68,31	1,87	0,36	1,07	29,65	101,26
5	70,13	0,78	-	0,83	29,60	101,34
6	69,18	1,22	0,84	1,02	29,17	101,43
7	70,02	0,97	0,67	1,02	28,52	101,20



Изображения в обратнорассеянных электронах

Рис. 3. Пирит (Py)

Fig. 3. Pyrite (Py)

ВЫВОДЫ

Опираясь на полученные данные минералогического анализа хвостовой породной части, следует заключить, что из всех потенциально ценных компонентов данного сырья промышленный интерес представляет получение железа, титана и ванадия, которые входят в химический состав магнетита, титан также содержится в ильмените, который в результате распада твердого раствора образует отдельные фазы в магнетите.

Для дальнейшего обогащения данного сырья рекомендуется применить операцию магнитной сепарации с целью получения коллективного титан-магнетитового ванадийсодержащего концентрата, который возможно либо использовать как сырье для металлургического производства, либо направить его на дальнейший передел с применением наиболее глубоких химических методов обогащения для извлечения из магнетитового концентрата титана и ванадия.

Список литературы • References

1. Прокопьев Е.С., Алексеева О.Л. Оценка возможности вовлечения в переработку углеродсодержащих отходов шламохранилища западносибирского металлургического комбината // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 446-457. Prokopyev E.S., Alekseyeva O.L. Feasibility study of processing coal-bearing wastes of the sludge storage at the West Siberian Metallurgical Works. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie*. 2022;45(4):446-457. (In Russ.).
2. Новак В.И., Козлов В.А. Обзор современных способов обогащения угольных шламов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. Novak V.I., Kozlov V.A. An overview of modern methods of coal sludge preparation. *Gornyy informatsionno-analiticheskij byulleten'*. 2012. (In Russ.).
3. Dai S., Finkelman R.B. Coal as a promising source of critical elements: Progress and future prospects. *International Journal of Coal Geology*. 2018;(186):155-164. DOI: 10.1016/j.coal.2017.06.005.
4. Arbuzov S.I., Mezhibor A.M., Spears D.A. et al. Nature of tonsteins in the Azeisk deposit of the Irkutsk Coal Basin (Siberia, Russia). *International Journal of Coal Geology*. 2016;(153):99-111. DOI: 10.1016/j.coal.2015.12.001.

5. Нифантов Б.Ф., Заостровский А.Н., Занина О.П. Горно-геологическое и технологическое значение распределения ценных и токсичных элементов в кузнецких углях // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2005. № 6. С. 76-78. Nifantov B.F., Zaostrovskiy A.N., Zanina O.P. Mining, geological and technological significance of valuable and toxic elements distribution in Kuznetsk coals. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*. 2005;(6):76-78. (In Russ.).
6. Соловеев Н.П., Болотин Н.М. Применение технологии винтовой сепарации при переработке угольных шламов // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 469-480. Soloveyenko N.P., Bolotin N.M. Application of screw separation technology in coal sludge processing. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie*. 2022;45(4):469-480. (In Russ.).
7. Турецкая Н.Ю., Чикишева Т.А. Обогащение шламов угольных гидроотвалов методом винтовой сепарации // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 436-445. Turetskaya N.Yu., Chikisheva T.A. Processing of sludge from coal sludge ponds using the screw separation technique. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie*. 2022;45(4):436-445. (In Russ.).
8. Болотин Н.М. Результаты работы экологической опытно-промышленной установки на гидроотвале отходов флотации ЦОФ «Кузбасская» // Уголь. 2023. № S12. С. 46-49. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-S12-46-49. Bolotin N.M. Results of work of ecological experimental industrial installations at the flotation waste hydro disposal of the Kuzbass CEP. *Ugol'*. 2023;(S12):46-49. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-S12-46-49.

Authors Information

Komarova A.G. – Leading mineralogist engineer¹, LLC SPC “Spirit”, Irkutsk, 664033, Russian Federation, Lecturer of Department of Minerals, Geochemistry, Mineralogy and Petrography, Irkutsk State University, Irkutsk, 664003, Russian Federation, e-mail: kag@spirit-irk.ru

Chikisheva T.A. – PhD (Geology and Mineralogy), Research Associate of the Department for Integrated Use of Mineral Raw Materials, Institute of the Earth Crust of SB RAS, Irkutsk, 664033, Russian Federation, Head of Mineralogy Group, LLC SPC “Spirit”, Irkutsk, 664033, Russian Federation, Associate Professor of Department of Minerals, Geochemistry, Mineralogy and Petrography, Irkutsk State University, Irkutsk, 664003, Russian Federation, e-mail: cta@spirit-irk.ru

Turetskaya N.Yu. – Lead engineer of the Department for Integrated Use of Mineral Raw Materials, Institute of the Earth Crust of SB RAS, Irkutsk, 664033, Russian Federation, Head of Coal and Ash Waste Preparation Group, LLC SPC “Spirit”, Irkutsk, 664033, Russian Federation, e-mail: tny@spirit-irk.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 3.06.2024

Поступила после рецензирования: 16.06.2024

Принята к публикации: 25.06.2024

Paper info

Received June 3, 2024

Reviewed June 16, 2024

Accepted June 25, 2024