



Вещественный состав отходов угледобычи обогатительной фабрики «Прокопьевскуголь» и перспектива применения метода винтовой сепарации для их обогащения

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

¹ Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия; chikishevatyana@mail.ru

² НПК «Спирит», Иркутск, Россия

³ Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

Статья содержит информацию о вещественном составе угольных шламов обогатительной фабрики «Прокопьевскуголь». Материал на 75.54 % представлен полифазными агрегатами угля, глинистых минералов, кварца и карбонатов с разным количественным соотношением компонентов. Показатель зольности исходного сырья составляет 32.5 %.

Определен продуктивный диапазон крупности для данного сырья – от 0.04 до 1 мм. Установлено, что сырье представляет практический интерес в получении угольного концентрата методом винтовой сепарации. В результате проведения технологических испытаний из угольных шламов винтовой сепарацией был получен угольный концентрат с показателем зольности сухого топлива 10.95 %.

Ключевые слова: Кузнецкий угольный бассейн, угольные шламы, винтовая сепарация, минералого-технологическая оценка сырья, отходы углеобогащения

Material composition of coal mining waste from the Prokopyevskugol Processing Plant and the prospect of using the screw separation method for their enrichment

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

¹ Institute of the Earth Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

² Research and production company «Spirit», Irkutsk, Russia

³ Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

The article contains information about the material composition of coal sludge of the Prokopyevskugol Processing Plant. The material is 75.54 % represented by polyphase aggregates of coal, clay minerals, quartz and carbonates with different quantitative ratios of components. The ash content of the feedstock is 32.5 %. The productive size range for this raw material has been determined – from 0.04 to 1 mm. We found that the raw materials were of practical interest in obtaining coal concentrate by screw separation. Our technological tests resulted in coal concentrate with an ash content of 10.95 % of dry fuel from coal sludge by screw separation.

Keywords: Kuznetsk coal basin, coal sludge, spiral separation mineralogical and technological assessment of raw materials, coal enrichment waste

Введение

Для многих исследователей задача вовлечения в повторную переработку отходов угледобычи на сегодняшний день вызывает особый интерес, поскольку по своим качественным характеристикам отходы не уступают добываемому природному минеральному сырью (Чикишева и др., 2023). Также данный вопрос давно входит в экологическую повестку и не теряет своей актуальности (Behera, Sahu, 2023; Дамба, Станис 2015; Зиновьева и др., 2022; Качурин и др., 2015; Киреев, 2022). В связи с этим ученые пытаются разрабатывать и внедрять технологии, которые могли бы минимизировать экологическую нагрузку, при этом дополнительно извлекая сырьё, потенциально пригодное для ряда

различных отраслей промышленности. Проведенные ранее исследования (Прокопьев, Алексеева, 2022; Соловеев, Болотин, 2022; Турецкая, Чикишева, 2023) показали, что одним из экологически чистых методов обогащения является винтовая сепарация: в процессе своей работы она не требует применения каких-либо реагентов, но необходимо учитывать, что данный метод основывается на разделении минералов по плотности, форме, размерам зёрен и не всегда может быть применим, поэтому технология переработки в основном базируется на данных о вещественном составе.

Цель данной работы заключалась в изучении вещественного состава отходов угледобычи ОФ «Прокопьевскуголь», оценке перспективы применения метода винтовой сепарации на исследуемом сырье.

Для цитирования: Турецкая Н. Ю., Чикишева Т. А., Комарова А. Г. Вещественный состав отходов угледобычи обогатительной фабрики «Прокопьевскуголь» и перспектива применения метода винтовой сепарации для их обогащения // Вестник геонаук. 2024. 12(360). С. 47–52. DOI: 10.19110/geov.2024.12.5

For citation: Turetskaya N. Yu., Chikisheva T. A., Komarova A. G. Material composition of coal mining waste from the Prokopyevskugol Processing Plant and the prospect of using the screw separation method for their enrichment. Vestnik of Geosciences, 2024, 12(360), pp. 47–52, doi: 10.19110/geov.2024.12.5

Материалы и методы

Объект исследований — угольные шламы ОФ «Прокопьевскуголь».

Определение химического состава исходной пробы выполнено с использованием метода атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой. Определение показателя зольности сухого топлива в исходной пробе и продуктах обогащения выполнено методом ускоренного озоления.

Минеральный состав пробы и оценка содержаний каждого минерала в пробе были определены с помощью методов оптико-минералогического анализа по методическим рекомендациям НСОММИ (Оптико-минералогический..., 2012) с применением бинокулярного стереомикроскопа «Микромед МС-2-ZOOM 2CR». Изучение микрокомпонентов угля в шлифах и аншлифах выполнялось по межгосударственным стандартам (ГОСТ: 9414.1-94, 9414.2-93, 9414.3-93).

Определение несгораемых фаз в углях проводилось с применением сканирующего электронного микроскопа MIRA3 LMN TESCAN в центре коллективного пользования «Изотопно-геохимические исследования» ИГХ СО РАН в режиме обратнорассеянных электронов (аналитик А. Г. Чуешова).

Результаты и обсуждение

В результате проведения химического анализа было установлено, что в составе угольных шламов присутствуют следующие токсичные элементы-примеси (Крылов, 2017): мышьяк (менее 0.0005 %), хром (0.0021 %), магний (0.193 %), ртуть (менее 0.0005 %), сера (0.231 %), селен (менее 0.0005 %), бериллий (менее 0.0002 %) и ванадий (0.0046 %). Содержания ценных элементов-примесей, таких как серебро, лантан, молибден, скандий, селен, свинец и иттрий, составляют тысячные доли процентов или вовсе находятся на пределе порога обнаружения измерительного прибора.

Выход тонкодисперсного материала крупностью менее 0.071 мм в исходной пробе составляет 42.64 % (рис. 1). Из них на материал менее 0.02 мм приходит-

ся 25.29 % с показателем зольности сухого (A^d) топлива, равного 55.6 %. Выход материала крупностью от 0.02 до 0.04 мм составляет 3.85 % с показателем A^d , равным 35 %. В диапазон крупности от 0.04 до 1 мм распределяется материал с показателем A^d , варьирующим от 17.6 до 25 %. Выход данного диапазона равен 66.82 %. В материале более 1 мм с выходом 4.05 % показатель A^d соответствует среднему значению — 54 %.

При проведении оптико-минералогического анализа было установлено, что основная масса пробы сложена на 75.54 % углём. Также в материале присутствует кварц (11.03 %), глинистые минералы (7.07 %), обломки пород (3.67 %) и полевые шпаты (2.41 %). В десятых и сотых долях процента присутствуют слюды, сульфиды, гидроксиды железа и карбонаты. Магнетит, апатит, рутил, барит и амфиболы наблюдаются в единичных зёрнах.

Из анализа распределения угля следует, что значительная доля угля приходится на крупность от 0.25 до 0.5 мм (18.97 %). В материале пробы крупностью от 0.04 до 0.125 мм находится 43.92 % угля, а в материале менее 0.02 мм — 14.87 %.

В ходе проведения микроскопического исследования углей в проходящем свете было установлено, что породами, вмещающими уголь, являются алевролиты и аргиллиты. Обломочная часть алевролитов представлена в основном кварцем, редко полевыми шпатами. Структура алевролитовая крупнозернистая, цемент закрытый поровый, слюдисто-глинистый. Аргиллит состоит преимущественно из каолинита и гидрослюд. Структура пелитовая.

Анализ углесодержащих обломков показал, что они представлены углистыми и углисто-глинистыми породами. По форме компонентов выделяются плосчатые (рис. 2, а, b, d), волокнообразные и линзовидные (рис. 2, с) разновидности (Столбова, 2013). Цвет мацералов в основном чёрный, реже коричневый и тёмно-коричневый, что свидетельствует о высокой степени фюзенизации.

Микроскопическое исследование образцов углей в отраженном свете показало, что они представлены углистыми породами с различным соотношением микрокомпонентов. Микроскопически по визуальн

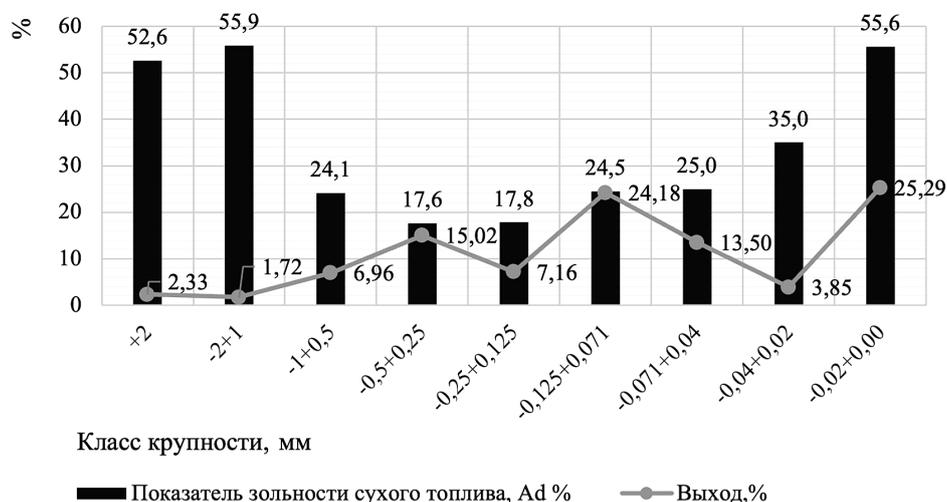


Рис. 1. Гранулометрический анализ исходного сырья с показателями зольности сухого топлива в классах крупности
Fig. 1. Granulometric analysis of the raw material with indicators of ash content by size classes

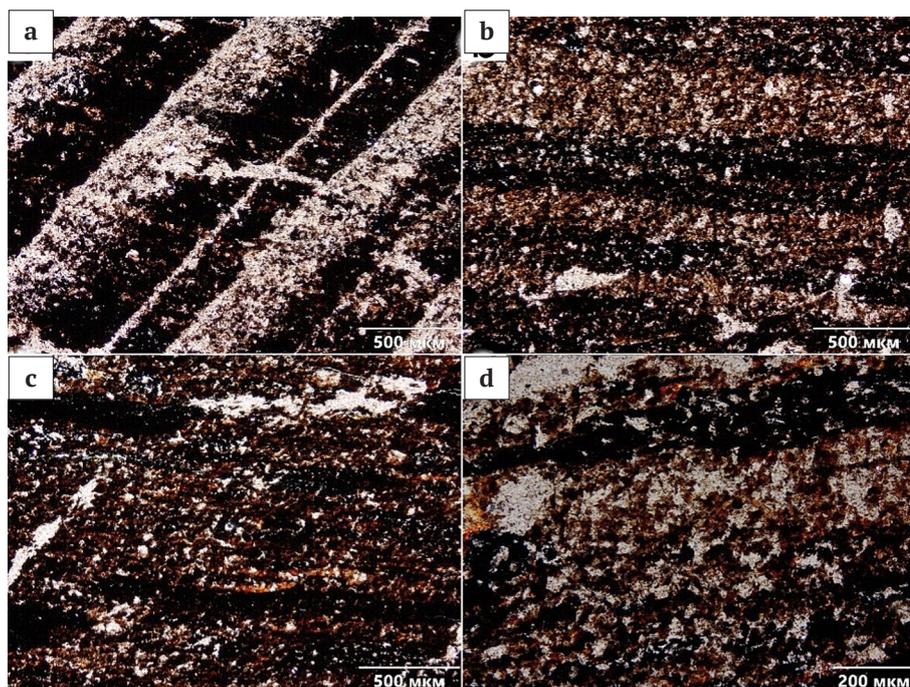
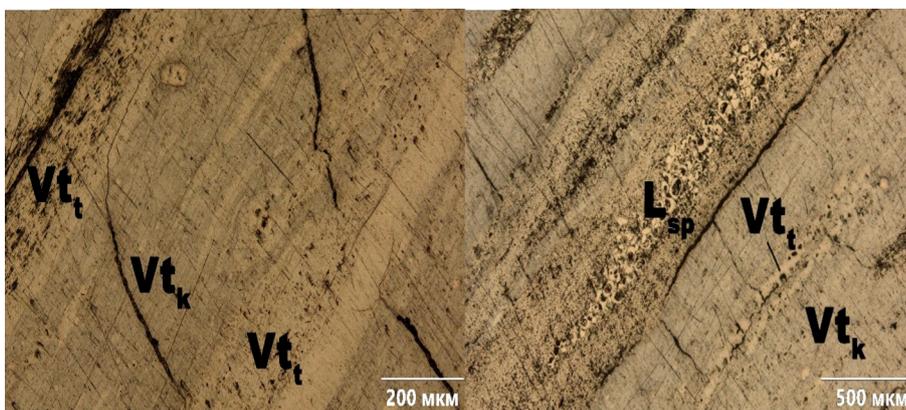


Рис. 2. Микрофотографии каустобиолитов, прозрачный шлиф, анализатор включен

Fig. 2. Micrographs of caustobiolites, thin section, polarization: XPL

Рис. 3. Фрагмент (микрофотография) аншлиф-брикета: Vt_t — теллинит, Vt_k — коллинит, L_{sp} — споринит. Отраженный свет, анализатор выключен

Fig. 3. A polished (microphotographs) briquette fragment: Vt_t — tellinite, Vt_k — collinite, L_{sp} — sporinite. Reflected light, PPL



блюдаемым признакам было выделено три группы мацералов — витринит (теллинит, коллинит), липтинит (споринит), инертинит (фюзенит и склеротинит), а также минеральные составляющие. Мацералы имеют разную степень сохранности клеточной структуры. Бесструктурные мацералы образуют скопления и слагают полосы, структурные разновидности рассеяны в коллините (рис. 3). Минеральными составляющими выступают глинистые минералы, сульфиды железа, карбонаты, минералы кремнезема и прочие минеральные включения.

При исследовании аншлифов с помощью сканирующего электронного микроскопа установлено, что в исследуемых образцах угля содержится значительное количество минеральных включений: кварца, каолинита, полевых шпатов, сидерита, апатита, пирита, халькопирита, барита, рутила и др.

Минеральная матрица представлена преимущественно каолинитом. Каолинит заполняет клеточные полости, встречается в виде линз, прослоек, тонкодисперсных частиц (рис. 4), а также выступает цементирующим веществом во вмещающей уголь породе. Зачастую наблюдаются микропереслаивания угля и минеральных агрегатов, содержащих каолинит и кварц.

Во вмещающих уголь породах наблюдаются обособления кварца, хлоритов и полевых шпатов, в ред-

ких случаях — амфиболов и турмалинов. В составе цементирующей массы отмечаются выделения мусковита.

На изображениях общего вида образцов в обратнорассеянных электронах (рис. 5) чётко прослеживается переслаивание чистого или слабозагрязнённого угля ($\rho < 1/5 \text{ г/см}^3$ (Столбова, 2013) с полифазными агрегатами угля, глинистых минералов, кварца и карбонатов, количество минеральных примесей в таких агрегатах составляет 20–60 %, $\rho = 1.5\text{—}2.0 \text{ г/см}^3$ (Столбова, 2013).

Анализируя вышеизложенные данные, следует заключить, что исследуемый материал относится к техногенному сырью первой группы (Ожогина и др., 2018). Изучаемые отходы представляют промышленный интерес с точки зрения получения дополнительного топлива, поскольку на 75.54 % сложены углистыми и углесто-глинистыми породами. Ценные элементы-примеси, входящие в химический состав пробы, составляют тысячные доли процента или находятся на пределе порога обнаружения измерительного прибора, поэтому значимости для попутного извлечения они не имеют.

Материал крупностью более 1 мм содержит в себе несгораемые фазы, представленные неорганическим веществом, о чём свидетельствуют высокие по-

Рис. 4. Фрагменты аншлиф-брикета (микрофотографии):
Kln — каолинит; Qz — кварц; уголь — чёрное

Fig. 4. Fragments of polished briquette (microphotographs):
Kln — kaolinite; Qz — quartz; coal — black

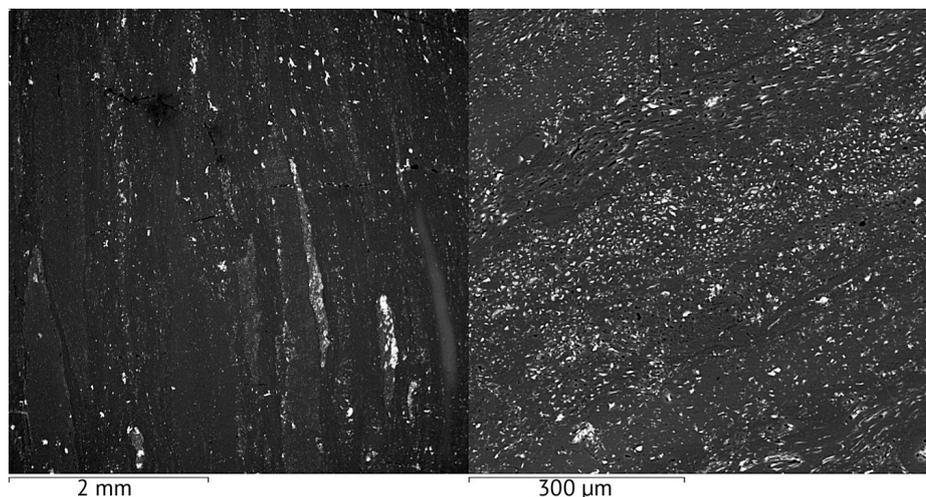
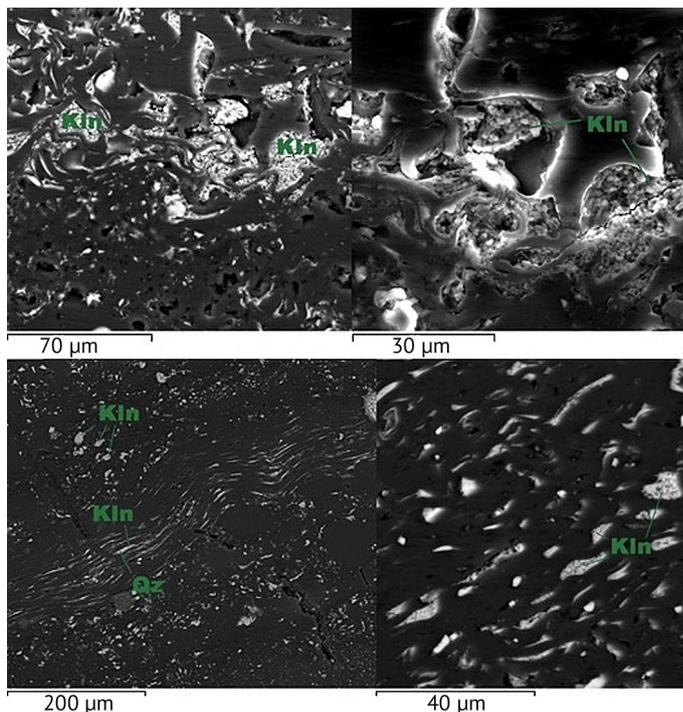


Рис. 5. Фрагменты аншлиф-брикета (микрофотографии). Белое и светло-серое — минеральная матрица, чёрное — уголь. Изображение в обратнорассеянных электронах

Fig. 5. Fragments of polished briquette (micrographs). White and light gray — Mineral matrix, black — coal. Image in backscattered electrons

казатели зольности, макро- и микроскопические исследования. Также в материале присутствует высокозольный, труднообогатимый для многих физических методов материал крупностью менее 0.04 мм. В диапазоне крупности от 0.04 до 1 мм показатель зольности сухого топлива составляет 22.29 %, в связи с чем его можно считать рабочим классом для процесса обогащения.

На основании полученных данных на исследуемом сырье были проведены технологические испытания. Предварительно из обогатительного процесса был выведен материал крупностью более 1 мм при помощи операции грохочения. Тонкодисперсный материал менее 0.04 мм из подрешётного продукта грохота был удалён гидроциклоном. Дальнейшее обогащение песков гидроциклона выполнено на винтовом сепараторе. Поскольку во время обогащения угля на винтовом аппарате происходит обратное обогащение, т. е. концентрация углистых и углисто-глинистых пород осуществляется в бортовой части рабочей поверхности жёлоба винтового аппарата, для получения наиболее чистого продукта были проведены две стадии винтовой сепарации: основная на песках гидроциклона

и перечистная на угольном продукте основной винтовой сепарации. В результате по технологической схеме (рис. 6) удалось получить угольный концентрат с показателем зольности сухого топлива 10.95 %. Выход продукта составляет 41,15 %.

Заключение

Исследования угольных шламов ОФ «Прокопьевскуголь» показали, что промышленный интерес они имеют только с точки зрения получения дополнительного топлива, поскольку ценные элементы-примеси, входящие в химический состав, составляют тысячные доли процентов. Содержание угля составляет 75.54 %, большая часть которого распределяется в диапазон крупности от 0.04 до 1 мм, с показателем зольности сухого топлива в нём 22.29 %. Угледержащие обломки представлены углистыми и углисто-глинистыми породами. Во вмещающих уголь породах наблюдаются обособления кварца, хлоритов и полевых шпатов. В составе цементующей массы отмечаются выделения мусковита. Преимущественно минеральная матрица представлена каолинитом. Обогащение методом винтовой

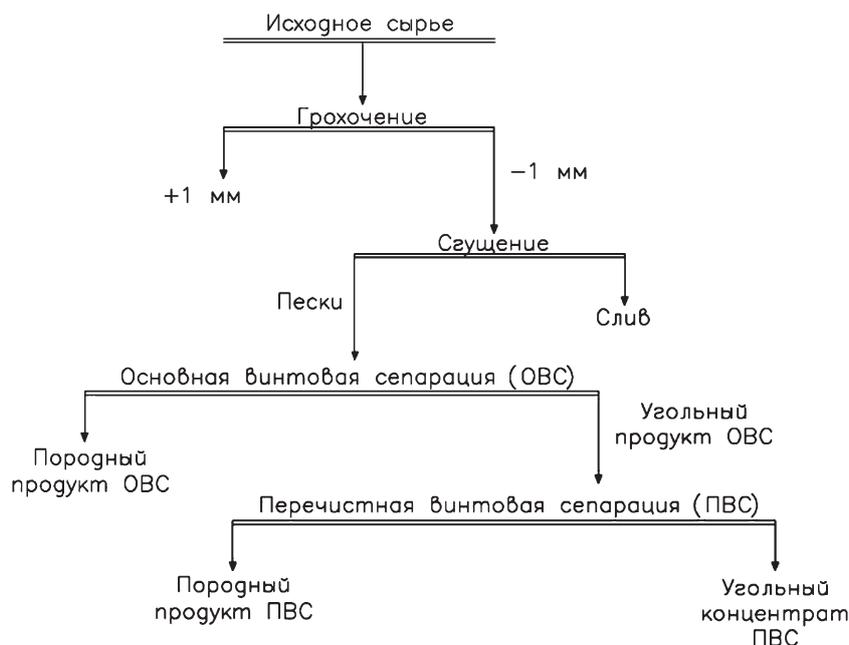


Рис. 6. Технологическая схема обогащения угольных шламов ОФ «Прокопьевскуголь»

Fig. 6. Technological scheme of coal sludge enrichment at the Prokopyevskugol coal processing plant

сепарации позволило получить угольный концентрат с выходом 41.15 % и показателем зольности 10.95 %.

Результаты исследований подтверждают перспективность применения метода винтовой сепарации в обогащении угольных шламов. Угольный продукт, который удалось получить из угольных шламов, может быть пригоден для использования в энергетической промышленности.

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.

Литература/ References

Дамба А., Станис Е. В. Использование комплексной геоэкологической оценки в экологическом аудите при разработке угольных месторождений Монголии // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2015. № 2. С. 100–106.
Damba A., Stanis E. V. The use of comprehensive geoecological assessment in environmental audit in the development of coal deposits in Mongolia. Bulletin of the Russian Peoples' Friendship University. Series: Ecology and life safety, 2015, No. 2, pp. 100–106. (in Russian)

Зиновьева О. М., Колесникова Л. А., Меркулова А. М. и др. Анализ экологических проблем в угледобывающих регионах // Уголь. 2022. № 10. С. 62–67.

Zinov'eva O. M., Kolesnikova L. A., Merkulova A. M. et al. Analysis of environmental problems in coal mining regions. Coal, 2022, No.10, pp. 62–67. (in Russian)

ГОСТ 9414.1-94 (ИСО 7404-1-84). Уголь каменный и антрацит. Методы петрографического анализа. Часть 1. Словарь терминов. М.: Изд-во стандартов, 1995. 23 с.

GOST 9414.1-94 (ISO 7404-1-84). Hard coal and anthracite. Methods of petrographic analysis. Part 1. Glossary of terms. Moscow: Publishing house of standards, 1995, 23 p. (in Russian)

ГОСТ 9414.2-93 (ИСО 7404-2-85). Уголь каменный и антрацит. Методы петрографического анализа. Часть 2. Метод подготовки образцов угля. М.: Изд-во стандартов, 1995. 18 с.

GOST 9414.2-93 (ISO 7404-2-85). Hard coal and anthracite. Methods of petrographic analysis. Part 2. Method of preparation of coal samples. Moscow: Publishing house of standards, 1995, 18 p. (in Russian)

ГОСТ 9414.3-93 (ИСО 7404-3-84). Уголь каменный и антрацит. Методы определения групп мацералов. М.: Изд-во стандартов, 1995. 12 с.

GOST 9414.3-93 (ISO 7404-3-84). Hard coal and anthracite. Methods of petrographic analysis. Part 3. Methods for determination of maceral groups. Moscow: Publishing house of standards, 1995, 12 p. (in Russian)

Качурин Н. М., Воробьев С. А., Чистяков Я. В. и др. Экологические последствия закрытия угольных шахт Кузбасса по газодинамическому фактору и опасности эндогенных пожаров на отвалах // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19. № 4. С. 54–58.

Kachurin N. M., Vorob'ev S. A., Chistyakov Ya. V. et al. Environmental consequences of the closure of Kuzbass coal mines due to the gas-dynamic factor and the dan-



- ger of endogenous fires on dumps. Ecology and industry of Russia, 2015, V. 19, No. 4, pp. 54–58. (in Russian)
- Киреев С. А. Современное состояние и экологическая оценка влияния породных отвалов предприятий угольной промышленности // Известия Тульского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2022. № 1. С. 62–71.
- Kireev S. A. Current state and environmental impact assessment of waste dumps of coal industry enterprises. Proc. Tula State University. Earth Sciences, 2022, No. 1, pp. 62–71. (in Russian)
- Крылов Д. А. Негативное влияние элементов-примесей от угольных ТЭС на окружающую среду и здоровье людей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12. С. 77–87. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-77-87
- Krylov D. A. Negative impact of impurity elements from coal-fired thermal power plants on the environment and human health. Mining information and analytical bulletin, 2017, No. 12, pp. 77–87. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-77-87 (in Russian)
- Ожогина Е. Г., Котова О. Б., Якушина О. А. Горнопромышленные отходы: минералогические особенности // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 6. С. 43–49. DOI: 10.19110/2221-1381-2018-6-43-49
- Ozhogina E. G., Kotova O. B., Yakushina O. A. Mining waste: mineralogical features. Vestnik of Institute of Geology Komi SC UB RAS, 2018, No. 6, pp. 43–49. DOI: 10.19110/2221-1381-2018-6-43-49 (in Russian)
- Оптико-минералогический анализ шлиховых и дробленых проб: Методические рекомендации № 162 / Научный совет по методам минералогических исследований (НСОММИ). М.: ВИМС, 2012. 23с.
- Optical and mineralogical analysis of concentrate and crushed samples: Methodological recommendations No. 162. Scientific Council on Methods of Mineralogical Research (NSOMMI). Moscow: VIMS, 2012, 23 p. (in Russian)
- Прокопьев Е. С., Алексеева О. Л. Оценка возможности вовлечения в переработку углеродсодержащих отходов шламохранилища Западно-Сибирского металлургического комбината // Наука о земле и недропользовании. Иркутск. 2022. № 4. С. 446–457. DOI:10.21285/2686-9993-2022-45-4-446-457.
- Prokop'ev E. S., Alekseeva O. L. Assessment of the possibility of involving in the processing of coal-containing waste from the sludge storage facility of the Western Siberian Metallurgical Plant. Science of Earth and Subsoil Use. Irkutsk, 2022, No. 4, pp. 446–457. DOI:10.21285/2686-9993-2022-45-4-446-457. (in Russian)
- Соловеев Н. П., Болотин Н. М. Применение технологии винтовой сепарации при переработке угольных шламов // Наука о земле и недропользовании. 2022. № 4. С. 469–480. DOI:10.21285/2686-9993-2022-45-4-469-480.
- Soloveenko N. P., Bolotin N. M. Application of screw separation technology in the processing of coal sludge. Science of earth and subsoil use. Irkutsk, 2022, No. 4, pp. 469–480. DOI:10.21285/2686-9993-2022-45-4-469-480. (in Russian)
- Столбова Н. Ф., Исаева Е. Р. Петрология углей: учеб. пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 77 с.
- Stolbova N. F., Isaeva E. R. Petrology of coals: a tutorial. Tomsk: Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2013, 77 p. (in Russian)
- Турецкая Н. Ю., Чикишева Т. А. Перспективы получения товарного продукта из отходов флотации угольных фабрик // Уголь. 2023. № 9. С. 95–99. DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-9-95-99
- Turetskaya N. Yu., Chikisheva T. A. Prospects for obtaining a commercial product from flotation waste of coal factories. Coal, 2023, No. 9, pp. 95–99. DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-9-95-99 (in Russian)
- Чикишева Т. А., Комарова А. Г., Прокопьев С. А., Прокопьев Е. С., Алексеева О. Л. Минералого-технологическая оценка отходов углеобогатительной фабрики «Краснобродская-Коксовая» // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения: Сб. ст. по материалам докл. XV Росс. семинара по технолог. минералогии / Под ред. В. В. Щипцова, Е. Н. Световой; Институт геологии КарНЦ РАН. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2023. С. 43–46. DOI: 10.17076/TM15_57
- Chikisheva T. A., Komarova A. G., Prokopyev S. A., Prokopyev E. S., Alekseeva O. L. Mineralogical and technological assessment of waste from the Krasnobrodskaya-Koksovaya coal processing plant. Technological mineralogy in assessing the quality of mineral raw materials of natural and technogenic origin: Proc. 15th Russian seminar on technological mineralogy. Edited by V. V. Shchiptsov, E. N. Svetova; Institute of Geology, Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences. Petrozavodsk: KarRS RAS, 2023. pp. 43–46. DOI: 10.17076/TM15_57 (in Russian)
- Behera B., Sahu H. B. Coal mine waste characterization and defluoridation property / B. Behera, H. B. Sahu // https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13244 / Heliyon 9. 2023.

Поступила в редакцию / Received 8.10.2024