

Направления рационального и комплексного использования минеральных ресурсов недр при открытых горных работах

© 2023. В. С. Коваленко¹, д. т. н., профессор,
В. П. Мешалкин^{2, 3, 4}, академик РАН, зав. кафедрой,
А. В. Колесников³, к. т. н., доцент, с. н. с.,

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
119049, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4,

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет),
190013, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 26,

³Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,
125047, Россия, г. Москва, Миусская площадь, д. 9,

⁴Институт общей и неорганической химии имени Н. С. Курнакова РАН,
119991, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 31,
e-mail: artkoles@list.ru

В статье излагаются основные направления рационального и комплексного использования минеральных ресурсов недр и пути их реализации при открытом способе разработки месторождений. Выявляются проблемы, которые препятствуют дальнейшей целесообразной переработке отходов. Анализируется достигнутый опыт и перспективы комплексного освоения месторождений руд чёрных и цветных металлов, горно-химического сырья и угля. Рассматривается проблема комплексного использования углей в промышленности с целью извлечения редких элементов (в частности, германия и скандия) из минеральной составляющей. Особое внимание обращается на специфику перехода на малоотходные, ресурсосберегающие технологии горного и обогащательного производства, на их эффективность и экологическую безопасность на многих горных предприятиях. Исследуются направления утилизации отходов горно-обогащательных производств и пути их использования для внутренних нужд предприятия, на примере использования вскрышных пород Лебединского горно-обогащательного комбината. Приводятся рекомендации по вовлечению в разработку техногенных месторождений и некондиционного минерального сырья с использованием физико-химических способов извлечения полезных компонентов. Отмечается, что до настоящего времени не удалось выстроить комплексную систему рационального освоения минерально-сырьевой базы страны, что так необходимо для сохранения невозобновляемых природных ресурсов недр и успешной реализации задач Национального проекта «Экология». Особая роль при этом должна быть отведена научным исследованиям по разработке экоинновационных технологий добычи и переработки полезных ископаемых.

Ключевые слова: рациональное освоение недр, комплексное использование минерального сырья, техногенные месторождения, отходы, физико-химические способы извлечения.

Directions of rational and integrated use of mineral resources of the subsoil in open-pit mining

© 2023. V. S. Kovalenko¹ ORCID: 0000-0001-5675-3288^{*}

V. P. Meshalkin^{2, 3, 4} ORCID: 0000-0001-6956-6705^{*}, A. V. Kolesnikov³ ORCID: 0000-0002-4586-6612^{*}

¹National Research Technological University "MISIS",
4, Leninsky Prospekt, Moscow, Russia, 119049,

²St. Petersburg State Technological Institute (Technical University),
26, Moskovsky Prospekt, St. Petersburg, Russia, 190013,

³D. I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology,
9, Miusskaya Square, Moscow, Russia, 125047,

⁴N. S. Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry
of the Russian Academy of Sciences,
31, Leninsky Prospekt, Moscow, Russia, 119991,
e-mail: artkoles@list.ru

The aim of the work is to study the methods of rational subsurface use in open-pit mining. The article outlines the main directions of rational and integrated use of mineral resources of the subsurface and the ways of their implementation in the open method of field development. The problems that prevent further expedient waste processing are identified. The achieved experience and prospects of complex development of deposits of ferrous and non-ferrous metals, mining and chemical raw materials and coal are analyzed. The problem of complex utilization of coals in industry in order to extract rare elements (in particular germanium and scandium) from the mineral component is considered. Special attention is paid to the specifics of transition to low-waste, resource-saving technologies of mining and enrichment production, to their efficiency and environmental safety at many mining enterprises. The directions of waste disposal of mining and processing industries and ways of their use for the internal needs of the enterprise, namely the use of overburden rocks of the Lebedinsky mining and processing plant, are investigated. Recommendations for the involvement in the development of man-made deposits and substandard mineral raw materials using physico-chemical methods for extracting useful components are given. It is noted that a comprehensive system of rational development of the country's mineral resource base has not been built to date. This system is of great importance for the preservation of non-renewable natural resources of the subsoil and the successful implementation of the tasks of the National Project "Ecology". A special role should be given to scientific research on the development of eco-innovative technologies for mining and processing of minerals.

Keywords: rational development of mineral resources, integrated use of mineral raw materials, man-made deposits, waste, physico-chemical extraction methods.

Из недр ежегодно извлекаются огромные объёмы горных пород, исчисляемые десятками миллиардов тонн. Интенсивная деятельность человека ведёт к истощению содержащихся в недрах запасов полезных ископаемых, к структурному, гидрогеологическому и химическому изменению недр. Эти причины обуславливают необходимость рационального недропользования. Решение этой проблемы в настоящее время сводится к более полному и качественному извлечению из недр полезных ископаемых и комплексному использованию минерального сырья. В этом направлении имеются определённые успехи как практического, так и научного порядка. Вместе с тем по оценке специалистов при современной технологии добычи полезных ископаемых и извлечения полезных компонентов лишь порядка 3–5% от всего объёма извлекаемых из недр горных пород реализуется в виде готовой продукции различных производств, а остальное (95–97%) является отходами [1]. Актуальность этой проблемы возрастает по мере увеличения объёмов добываемых из недр минеральных ресурсов и ухудшения горно-геологических и горнотехнических условий разработки многих месторождений.

Цель работы – поиск методов рационального недропользования при ведении открытых горных работ.

Основные направления рационального недропользования при открытых горных работах

Рациональное и комплексное освоение месторождений полезных ископаемых и добываемого минерального сырья является в современных условиях основой рационального недропользования при открытых горных

работах, на долю которого приходится более 80% от общего объёма добываемых полезных ископаемых.

В настоящее время можно выделить несколько направлений рационального и комплексного освоения месторождений полезных ископаемых и использования минеральных ресурсов недр (рис. 1) [2–7].

Рациональное использование минеральных ресурсов включает:

- полное извлечение и использование полезных компонентов из извлекаемых недр горных пород;

- отдельную выемку и отдельное складирование временно неиспользуемого минерального сырья (не кондиционного и временно не востребованного полезного ископаемого) с целью возможного использования в будущем.

В целях реализации первого направления принимаются следующие технические, технологические и организационные мероприятия:

- снижение потерь и разубоживания добываемых полезных ископаемых;

- стабилизация качества добываемых полезных ископаемых, поступающих потребителям или на пункт переработки или обогащения;

- увеличение комплексности и полноты извлечения полезных компонентов из балансовых и забалансовых запасов и попутно добываемых полезных ископаемых обогатительными и другими средствами переработки;

- переработка пород и заскладированных бедных руд, лежалых хвостов обогащения, формирование и разработка техногенных месторождений и т. д.

После реализации выше отмеченных мероприятий остаются отходы в виде «пустых» горных пород (не содержащих, как считается сегодня, полезных компонентов), неконди-

ционных попутно добываемых полезных ископаемых (содержащих полезные компоненты в недопустимо малом количестве или в низком их качестве) и отходов переработки и обогащения полезных ископаемых, в которых полезные компоненты остались в таких количествах, составе и виде, извлечение которых технологически затруднено и не является пока экономически целесообразным.

Следующее важнейшее направление рационального недропользования заключается в возможно более полном, экономически целесообразном и экологически безопасном использовании отходов для различных целей.

Хорошо известно, что отходы являются одним из ключевых последствий осуществления практически любой хозяйственной деятельности человека. Экологические проблемы создаются как промышленными отходами, так и коммунальными. В 2020 г. на территории Российской Федерации (РФ) образовалось 6959,3 млн т отходов. За период с 2010 по 2020 гг. совокупная масса отходов, образованных в РФ, увеличилась в 1,9 раза [8]. Источником наибольшего объёма отходов в 2020 г. стала добывающая промышленность, на которую приходится 91,5% от общего объёма. Причём доля данной отрасли сохраняет устойчивый рост объёмов образования отходов.

В принципе, можно использовать всё, что мы извлекаем из недр, но, очевидно, не сейчас, а в будущем. Проблема состоит: в отсутствии нужных потребителей на месте; отсутствии или неотработанности, а также дороговизне технологии переработки отходов и, соответственно, в высокой стоимости произведённой вторичной продукции; нехватке средств и нужных специалистов для организации побочного производства; высоких транспортных тарифах и т. п. Всё это приводит к тому, что большую часть отходов приходится складировать, занимая огромные площади. В этой связи в задачи рационального недропользования входит временное размещение отходов в отвалах или в специальных складах, формируя их как техногенные месторождения минерального сырья – продукции, которая найдёт применение в будущем [9].

Опыт комплексного использования минерального сырья

Комплексное использование минеральных ресурсов рассматривается в двух аспектах: использование месторождений полезных ископаемых и комплексное использование добываемого минерального сырья.

Реализация на практике этих направлений позволяет в значительной степени решить проблему рационального использования невозобновляемых минеральных ресурсов недр. Извлечение сопутствующих полезных компонентов из добываемой горной массы позволяет организовать промышленное производство многих необходимых видов продукции. Иногда общая экономическая эффективность извлечения сопутствующих веществ превышает ценность основного полезного ископаемого. Так, например, ценность попутно получаемой продукции медной промышленности составляет 40% [4]. Использование вскрышных пород в некоторых случаях позволяет сократить добычу сырья для производства щебня, извести, стекла, кирпича, керамических изделий, что обеспечивает экономию средств и позволяет сохранить земли, которые были бы нарушены деятельностью специализированных предприятий по добыче минерального сырья для строительных материалов. Это стало уже аксиомой сегодняшнего дня, но ограниченным воплощением на практике.

Известно, что большинство месторождений полезных ископаемых являются комплексными, в которых кроме основных имеется большое число сопутствующих компонентов. Железным рудам сопутствуют: Ti, V, Co, Ni, Cu, Au, Pt, апатит, Ge, P, S, B, Ta, Nb, Zr. В рудах некоторых месторождений железа содержание цветных и редких металлов больше, чем в месторождениях для добычи собственно этих металлов. Медным рудам сопутствуют: Zn, Mo, Pb, Fe, S, Au, Ag, Cd, Os, Se, Te, Bi, Ge; никелевым: Cu, S, Co, Au, Ag, Ge, Y, Se, Te; свинцово-цинковым: Cu, Sn, Bi, Ba, Au, Ag, S, Cd, In, Se, Te, Ta, Ge; вольфрамомолибденовым: Cu, Bi, S, Sn, Au; флюоритовым: Pb, Ba, Zn, Ag, Au, Re, Sc, Be, Se, Te, Ge; оловянным: Cu, Pb, Zn, W, Bi, S, Ag, In, Cd, Ge.

В горнодобывающей промышленности имеется немало примеров комплексного использования месторождений руд чёрных и цветных металлов, но в целом эта проблема решается медленно. Так, в цветной металлургии попутно с 12 профилирующими металлами (Al, Cu, Ni, Co, Pb, Zn, W, Mo, Au, Hg, Sn, Sb) из руд можно извлекать ещё порядка 60–65 полезных компонентов, в том числе благородные металлы, редкоземельные элементы. Уже сегодня из руд цветных металлов на обогатительных фабриках получают до 3–4 видов концентратов, а на металлургических заводах попутно извлекают многие полезные компоненты руд цветных и редких металлов.

Однако степень их извлечения недостаточна, более половины полезных компонентов не извлекаются вообще из-за отсутствия технологических извлечений, дороговизны или ограниченного спроса на местах добычи и переработки минеральных ресурсов.

Объектом комплексного использования должны являться также апатито-нефелиновые руды месторождений фосфатного сырья в Хибинах, в которых представлена чуть ли не половина элементов периодической системы [4, 10]. Основной минерал разрабатываемых месторождений – апатит, относительное количество которого в рудах колеблется в пределах от 16–20% в бедных типах руд до 70–75% – в наиболее богатых. Ценность его обусловлена наличием фосфора (17%), редкоземельных металлов и фтора. Относительное количество нефелина в рудах составляет 16–70%. Основной полезный компонент в нём – глинозём (около 32%). Практический интерес представляют оксиды натрия и калия, а также галлий, рубидий и цезий.

Основная ценность титанита – присутствие в нём титана (содержание диоксида титана достигает 41%), имеются небольшие

включения ниобия и тантала. В титаномагнетитах главные полезные компоненты – ванадий и железо, диоксид титана с содержанием от 13 до 20%. Что касается эгирина и полевых шпатов, то они до недавнего времени промышленного интереса не представляли, хотя также содержат ряд полезных компонентов.

В Кольском филиале РАН получены результаты, позволяющие приблизиться к почти безотходной переработке апатито-нефелиновых руд. Если при полном извлечении апатита и частично нефелина коэффициент использования руд не превышает 65%, то при переработке всего нефелина он повышается до 82% [4].

Таким образом, апатито-нефелиновые руды являются потенциальным сырьевым источником для многих отраслей народного хозяйства (рис. 1).

Следует при этом отметить, что в настоящее время разработаны ещё не все эффективные технологии извлечения всех перечисленных полезных компонентов из апатито-нефелиновых руд, но за ними будущее.

Что касается каменных и бурых углей, то, как показывают исследования и опыт наи-

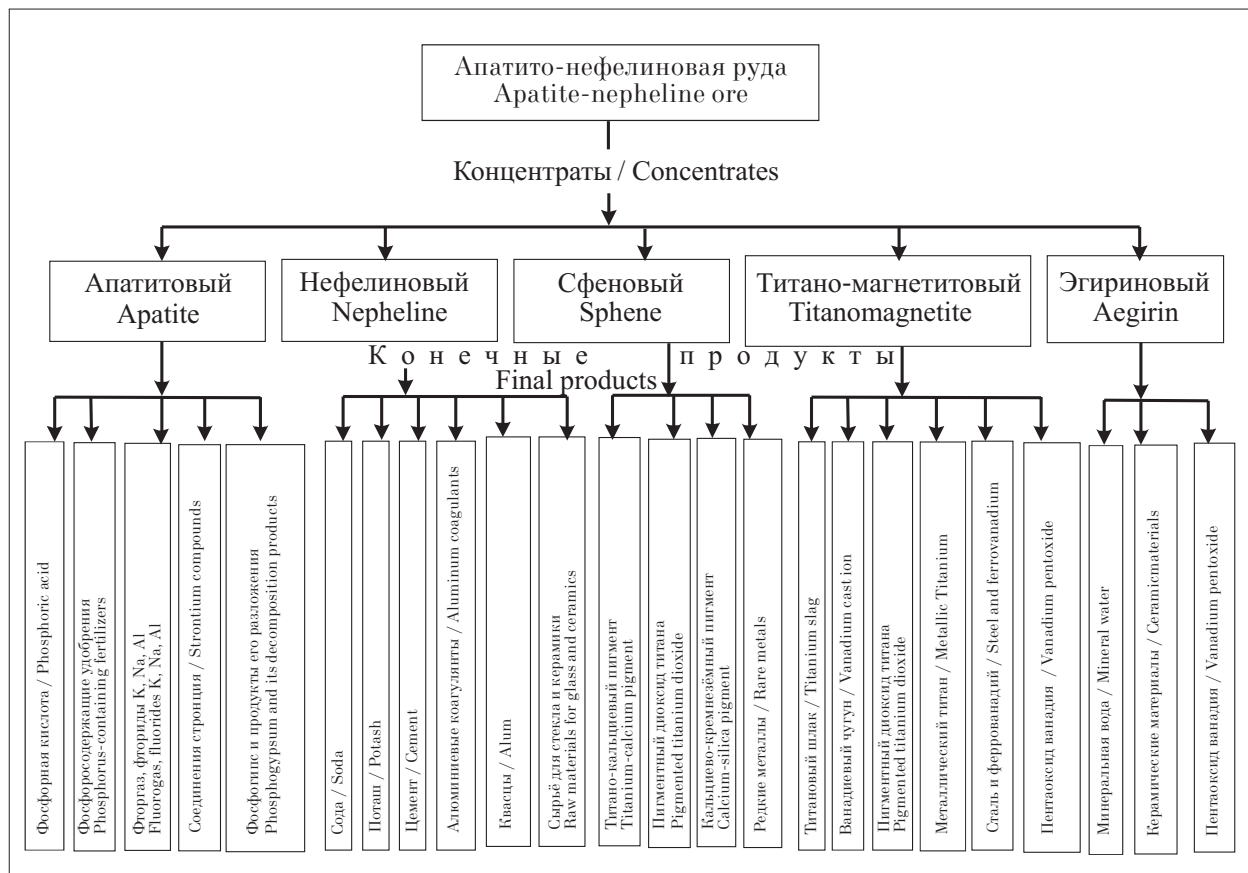


Рис. 1. Направления комплексной переработки апатито-нефелиновой руды
Fig. 1. Directions of complex processing of apatite-nepheline ore

более развитых угледобывающих стран, на современном этапе развития должно быть не просто наращивание объемов угледобычи, но и глубокая переработка углей с получением большого ассортимента угольной продукции с новыми потребительскими свойствами [11–18].

В настоящее время в РФ основной объем угля используется в энергетике и коксовании, частично – для газификации и полукоксования, получения обогащенного топлива для бытовых нужд (газ, жидкие продукты, брикеты), в кирпичном и цементном производстве. В ограниченных объемах уголь используется для производства углеродных коагулянтов и адсорбентов, углеграфитовых изделий, углещелочных реагентов, карбидов кремния и кальция, термоантрацита и термографита, горного воска. Более 80% каменноугольного кокса идет для выплавки чугуна, другие продукты коксования используются в химической промышленности, цветной металлургии, строительной индустрии, железнодорожном транспорте, дорожном строительстве [19].

Одной из актуальных проблем комплексного использования углей является промышленное извлечение редких элементов из минеральной составляющей. По результатам геологических исследований установлено, что наиболее контрастные аномалии в углях месторождений Сибири образуют Se, As, Sr, Mo, Be, Co, Au, Sb, U, Ge, Nb, Y, Zr, Hf, Hg, Cd.

Наиболее привлекательными для первоочередного освоения на сибирских месторождениях угля являются германий и скандий. Запасы последнего могут обеспечить современное мировое потребление этого металла в течение нескольких десятилетий.

Другая перспективная область применения углей – это электрофлотационная технология извлечения растворимых органических компонентов, где активированные угли используются в качестве коагулянтов и сорбентов [16–18, 20, 21].

Установлено, что от одного продукта в угольной отрасли можно произвести более 130 видов химических полупродуктов и более 5000 видов продукции смежных отраслей [11].

Ожидается, что применение новейших технологий извлечения полезных компонентов позволит в обозримой перспективе ускорить решение проблемы комплексного использования не только угля, но и других полезных ископаемых и продуктов их пере-

работки. Это чрезвычайно важно также и с позиций экологической безопасности горно-перерабатывающих производств.

Опыт утилизации вскрышных пород и отходов обогащения

Общее количество утилизированных и обезвреженных отходов в РФ в 2020 г. составило 3429 млн т или 48,9% от общей массы образованных отходов. Для сравнения, в 2016 г. этот показатель достигал 61%. Наибольшую долю по видам экономической деятельности составили утилизация и обезвреживание отходов, образуемых при добыче угля. Их объем в 2020 г. составил 2971 млн т или 46,7% от общей массы образованных отходов в добывающих отраслях [8].

Распределение объема отходов, образовавшихся в РФ, по федеральным округам неравномерное. На восточные регионы приходилось порядка 50% от всего объема отходов, представленных в основном вскрышными породами и отходами обогащения полезных ископаемых. Поэтому в сложившейся ситуации отходы горно-обогатительных производств должны максимально подлежать комплексному использованию и утилизации. Наиболее распространенные направления утилизации отходов горно-обогатительных производств:

- использование отходов для внутренних нужд предприятий;
- производство строительных материалов и промышленных изделий с реализацией продукции внешним потребителям;
- использование в сельском хозяйстве (производство раскислителей почвы, удобрений, использование отходов для улучшения структуры почв и т. д.);
- использование в качестве земляных масс (для восстановления техногенных ландшафтов, строительства площадок для промышленных и гражданских объектов и ограждающих дамб, засыпки выработанного пространства карьеров и шахтных провалов и т.д.);
- использование в качестве закладочного материала при подземной и повторной открытой разработках.

В первую очередь отходы стараются использовать на самом предприятии для собственных нужд. Область их применения в основном касается основных и вспомогательных технологических процессов, обустройства горного и обогатительного производства, строительных работ и рекультивации нарушенных земель (рис. 2).

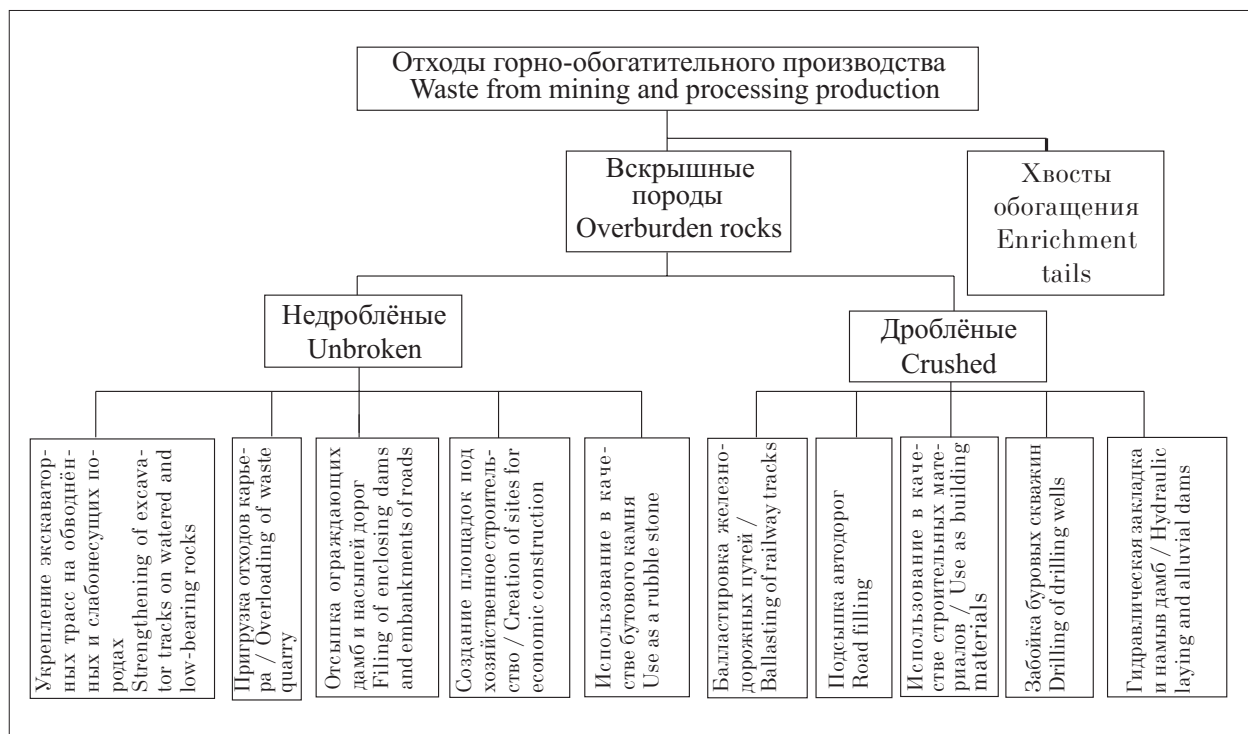


Рис. 2. Пути использования отходов горно-обогатительного производства для внутренних нужд предприятия
Fig. 2. Ways of using waste mining and processing production for the internal needs of the enterprise

Таблица / Table

Направления использования вскрышных пород Лебединского горно-обогатительного комбината
Directions of use of overburden rocks of Lebedinsky mining and processing enterprise

Вскрышные породы Overburden rocks	Использование вскрышных пород Use of overburden rocks
Кристаллические сланцы, амфиболиты Crystal shales, amphibolites	Щебень марки 800–1200 для автомобильных дорог, асфальтобетон, каменное литье, керамические изделия Crushed stone of the 800–1200 brand for highways, asphalt concrete, stone casting, ceramic products
Кварцито-песчаники, кварцевые порфиры Quartzite-sandstones, quartz porphyry	Щебень марок 1000–1200 для тяжёлых бетонов Crushed stone grades 1000–1200 for heavy concrete
Четвертичные глины Quaternary clays	Кирпич, керамзит, черепица, минеральная вата, добавки при производстве цемента Bricks, expanded clay, tiles, mineral wool, additives in the production of cement
Мел Chalk	Известь, цемент, мел молотый, мел для подкормки скота и птицы, гранулированные удобрения, известковая мука, в производстве стекла, керамических изделий и красок Lime, cement, ground chalk, chalk for feeding livestock and poultry, granular fertilizers, lime flour, in the production of glass, ceramic products and paints
Пески Sands	Силикатный кирпич, стеновые блоки, ячеистый бетон, стекло, строительные пески. После обогащения как формовочные и строительные добавки при производстве керамических изделий и кирпича Silicate bricks, wall blocks, cellular concrete, glass, building sands. After enrichment as molding and building additives in the production of ceramic products and bricks

Кроме того, из вскрышных пород и продуктов переработки полезных ископаемых возможно производство многообразных строительных материалов для внешнего потребителя. Безусловно, к ним предъявляются более повышенные (нормативные) требования, что с успехом выдерживается на многих отечественных карьерах. В качестве примера можно привести железорудные предприятия Курской магнитной аномалии (КМА, например, Лебединского горно-обогатительного комбината). Все извлекаемые из недр горные породы данного месторождения уже давно рассматриваются специалистами в качестве потенциального сырья для различных отраслей промышленности, а также в качестве минеральных добавок в сельскохозяйственном производстве (табл.).

В настоящее время вскрышные породы используются в качестве сырья для производства щебня, силикатных стеновых изделий, силикатного кирпича, формовочных песков и строительного песка.

На базе железорудных карьеров КМА построены цементный и известковый заводы, заводы по производству щебня (5 млн м³), силикатного кирпича (100 млн шт. в год), керамзитового гравия, минеральных пигментов и других материалов. Горнорудные предприятия КМА отгружают цементным, известковым заводам и другим организациям ежегодно свыше 5,5 млн м³ мела, около 1,5 млн м³ песка, около 1 млн м³ щебня и свыше 100 тыс. м³ высокоглинозёмной элювиальной глины. Однако использование попутно добываемых пород в народном хозяйстве составляет по разным данным от 3 до 10%. Многочисленными исследованиями подтверждены возможность и экономическая целесообразность создания новых мощностей с доведением коэффициента использования вскрышных пород и отходов обогащения до 15% от общего объёма их образования [4].

В угольной промышленности угледержащие (15–20%) отходы являются эффективным сырьём для различных отраслей промышленности. Они позволяют резко сократить расход топлива и традиционного сырья при производстве строительных материалов, глинозёма, сернокислого алюминия, кремнеалюминиевых сплавов, карбидкремниевых и других огнеупорных и кислотостойких материалов. Наибольшее количество отходов углеобогащения (около 20–25 млн м³ в год) может быть применено для производства аглопитрита (пористого заполнителя лёгких бетонов) и строительной керамики.

Часто на карьерах отходы, особенно вскрышные породы, представлены смесью литологических разновидностей, что усложняет и удорожает производство строительных материалов. Поэтому наиболее целесообразно использовать такие отходы в качестве земляных масс, в том числе для выравнивания рельефа местности, рекультивации нарушенных земель, для замены земляного грунта при строительстве ограждающих дамб, транспортных коммуникаций и других инженерных сооружений.

В настоящее время в нашей стране свыше 50% вскрышных пород, попутно вовлекаемых в разработку, направляются для засыпки собственного выработанного пространства, соседних отработанных карьеров и шахтных провалов. Аналогичный опыт используется в Китае для устранения просадки дневной поверхности в результате подземной угледобычи [14].

Интересен мировой опыт утилизации отходов в гористой местности. Известно, что дефицит горизонтальных площадей в такой местности является фактором, сдерживающим её хозяйственное развитие. Большой опыт по созданию горизонтальных площадей в процессе отработки нагорных месторождений имеется на карьерах Аппалачского угольного бассейна (США) с запасами угля 1600 млрд т до глубины 900 м [15]. Месторождения здесь представлены свитой горизонтальных и пологих угольных пластов, залегающих в гребнях невысоких гор.

Пласты, как правило, выходят на поверхность по обе стороны склона горы. Большая часть вскрышной породы вывозится автотранспортом во внешний отвал в близлежащую долину. В итоге разработки создаётся крупноплощадная поверхность на месте карьерных выемок и внешнего отвала. После рекультивации данная поверхность стала пригодна для многоцелевого использования. Здесь возводят многоквартирные дома, коттеджи, торговые центры, зрелищные объекты, даже аэродромы для местных линий. Более высокая ценность в новых горизонтальных площадях с лихвой оправдала затраты на их создание [10]. Имеются аналогичные примеры при открытой разработке нагорных месторождений Северного Кавказа.

Вовлечение в разработку некондиционного сырья и техногенных месторождений

Один из путей повышения эффективности освоения минеральных ресурсов недр – во-

влечение в открытую разработку некондиционных (забалансовых) запасов многих полезных ископаемых, использование которых в соответствии с утверждёнными кондициями в настоящее время экономически нецелесообразно или технически и технологически невозможно. В процессе технического прогресса или роста цен на минеральное сырьё они могут быть переведены в балансовые.

Забалансовые запасы руды можно рассматривать как важный резерв расширения сырьевой базы, продления срока эксплуатации предприятий, получения дополнительного количества металлов и, соответственно, прибыли, сокращения потерь ценных компонентов и уменьшения отходов производства.

Общие запасы металлов в забалансовых запасах руд эксплуатируемых жильных месторождений соизмеримы с запасами их в балансовых рудах. Примерно такая же ситуация характерна для многих других месторождений [22].

Забалансовые руды могут разрабатываться нетрадиционными способами. Так, в 1970-х гг. впервые в бывшем СССР были осуществлены проекты промышленной разработки забалансовых и бедных по содержанию урана руд способом подземного выщелачивания. Многолетний опыт показал, что технология подземного выщелачивания обеспечивает достаточно эффективное и комплексное использование недр, наиболее высокое по сравнению с традиционными способами извлечение основных и сопутствующих компонентов руд при снижении отходов производства и отрицательного воздействия на окружающую среду.

Данные преимущества позволили существенно нарастить объёмы добычи урана до 40–50% от общего количества урана. Кроме того, была подтверждена возможность извлечения из растворов попутных полезных компонентов: рения, молибдена, ванадия, селена, скандия, иттрия, лантаноидов и др. [23].

Следует отметить, что во многих странах мира уже давно наметился тренд на вовлечение в разработку техногенных месторождений, т. е. ранее заскандированных отвалов и хвостов обогащения, в которых содержание полезных компонентов может на порядок быть выше, чем в действующем карьере. Так, большая доля мировых запасов золота сосредоточена в техногенных месторождениях. В России ресурсный потенциал техногенных золотосодержащих объектов оценивается в 55–60% объёмов добытого в стране золота [24]. Золото здесь часто представлено микродисперсными частицами, что затрудняет его обогащение тра-

диционными (гравитационными) способами. Поэтому часто для их извлечения переходят на физико-химические способы, например, широко используют кучное выщелачивание забалансовых руд, переводя их тем самым в балансовые запасы.

Подводя итог, можно сказать, что в ближайшей перспективе потребности всех отраслей народного хозяйства теоретически могут быть перекрыты за счёт переработки и комплексного использования отходов горного и обогащательного производства, вовлечения в разработку техногенных месторождений и перевода забалансовых запасов в балансовые в результате перехода на новые способы извлечения полезных компонентов. Однако не во всех случаях естественное сырьё может быть заменено техногенным или некондиционным из экономических соображений. Неизбежно часть техногенных ресурсов придётся складировать и создавать тем самым техногенные месторождения. При этом необходимо выполнять требования их защиты от влияния атмосферы, а также предусмотреть возможность последующей более эффективной их разработки при сохранении качественных характеристик минерального сырья.

Заключение

Проблемы рационального и комплексного использования минеральных ресурсов недр при открытой добыче полезных ископаемых остаются актуальными для большинства месторождений РФ.

Специалистами прогнозируется дальнейшее увеличение техногенной нагрузки на геологическую среду и ухудшение экологической ситуации в ряде горнодобывающих регионов страны из-за весьма низкого извлечения полезных компонентов из минерального сырья и образования отходов горно-обогащательного производства в огромных (многомиллиардных) объёмах. В этих условиях повышается роль перехода на малоотходные, ресурсосберегающие технологии горного и обогащательного производства, эффективность и экологическая безопасность которых подтверждена на многих горных предприятиях. При этом следует признать, что пока не удалось выстроить комплексную систему рационального освоения минерально-сырьевой базы страны, что так необходимо для сохранения не возобновляемых природных ресурсов недр и успешной реализации задач Национального проекта «Экология».

Особая роль при этом должна быть отведена научным исследованиям по разработке экоинновационных технологий добычи и переработки полезных ископаемых.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-30029).

Литература

1. Управление отходами в современной России / Под ред. А.В. Шевчука. М.: Белый ветер, 2021. 560 с.
2. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Юн А.Б., Терентьева Н.В. Становление нового технологического уклада комплексного освоения недр при истощении балансовых запасов месторождений // Горный журнал. 2019. № 4. С. 11–14.
3. Коваленко В.С. Повышение эффективности использования природных и техногенных ресурсов при открытой угледобыче в рамках концепции «зелёной» горнодобывающей промышленности // Уголь. 2018. № 4. С. 60–64.
4. Томаков П.И., Коваленко В.С., Михайлов А.М., Калашников А.Т. Экология и охрана природы при открытых горных работах. М.: МГГУ, 1994. 418 с.
5. Pimentel B.S., Gonzalez E.S., Barboza G.N.O. Decision-support models for sustainable mining networks: fundamentals and challenges // Journal of Cleaner Production. 2016. V. 112. P. 2145–2157.
6. Михайлов В.Г., Галанина Т.В., Михайлова Я.С. Исследование динамики образования и использования отходов углеперерабатывающего предприятия // Горный журнал. 2019. № 4. С. 89–92.
7. Буторина И.В., Буторина М.В. Обзор технологии утилизации отходов горно-металлургической отрасли // Чёрные металлы. 2018. № 12. С. 44–49.
8. О состоянии и охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ им. М.В. Ломоносова, 2021. 1000 с.
9. Мохнаткин Г.В., Ашихмина Т.Я., Огородникова С.Ю. Биологический мониторинг природно-техногенных систем // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 4. С. 120–121.
10. Ильин С.А., Коваленко В.С., Манкевич В.В. Ресурсосбережение при открытых горных работах. М.: МГГУ, 1995. 149 с.
11. Ческидов В.Н., Зайцев Г.Д. Проблемы переработки и комплексного использования углей месторождений Сибири // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 6. С. 142–150.
12. Минибаев Р.Р., Корчагина Т.В., Новикова Я.А. К вопросу переработки отходов горного производства предприятиями Кузбасса // Уголь. 2016. № 8. С. 121–123.
13. Коваленко В.С., Артемьев В.Б., Опанасенко П.И. Землесберегающие и землевоспроизводящие технологии на угольных разрезах. М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2013. 440 с.
14. Bing-yuan H., Li-xun K. Mine land reclamation and eco-reconstruction in Shanxi province I: mine land reclamation model // Scientific World Journal. 2014. V. 2014. No. 1. Article No. 483862.
15. Li J., Zipper C.E., Donovan P.F., Wynne R.H., Oliphant A.J. Reconstructing disturbance history for an intensively mined region by time-series analysis of Landsat imagery // Environmental Monitoring and Assessment. 2015. V. IX. Article No. 557.
16. Xia K., Chen C., Deng Y., Xiao G., Zheng Y., Liu X., Fu H., Song X., Chen L. *In situ* monitoring and analysis of the mining-induced deep ground movement in a metal mine // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. V. 109. P. 32–51.
17. Gaydukova A., Kolesnikov V., Stoyanova A., Kolesnikov A. Separation of highly dispersed carbon material of OU-B grade from aqueous solutions using electroflotation technique // Separation and Purification Technology. 2020. V. 245. Article No. 116861.
18. Колесников А.В., Мешалкин В.П., Давыдова Т.В., Колесников В.А. Научно-технологические основы повышения ресурсоэффективности электрофлотационных процессов извлечения труднорастворимых неорганических соединений (оксиды, карбиды, гидроксиды) из водных растворов электролитов // Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах. 2020. Т. 494. С. 45–51.
19. Cheskidov V.I., Norri V.K., Zaitsev G.D., Botvinnik A.A., Bobyl'sky A.S., Reznik A.V. Effectivization of open pit hard mineral mining // Journal of Mining Science. 2014. V. 50. No. 5. P. 892–903.
20. Kolesnikov A.V., Htay T.Z., Kolesnikov V.A., Kovalenko V.S. Extraction by electroflotation of iron, chromium and aluminium hydroxides from aqueous solutions of sodium chlorides and sulphates in the presence of Mg²⁺, Ca²⁺ and surfactants of different types // CIS Iron and Steel Review. 2020. V. 20. P. 61–65.
21. Мухин В.М., Королёв Н.В. Активные угли как важный фактор устойчивого развития экономики и качества жизни населения // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 4. С. 210–217.
22. Трубецкой К.Н., Галченко Ю.П. Геоэкология освоения недр и экотехнология разработки месторождений. М.: Научтехлитиздат, 2015. 360 с.
23. Культин Ю.В., Камнев Е.Н., Рыбальченко А.И. Основные результаты деятельности АО «ВНИПИПромтехнологии» в области добычи урана методом подземного выщелачивания // Горный журнал. 2021. № 3. С. 26–29.
24. Амдур А.М., Федоров С.А., Апакашев Р.А., Юрак В.В. Экологически безопасная утилизация золотосодержащих силикатно-карбонатных хвостов обогащения // Горный журнал. 2020. № 12. С. 53–55.

References

1. Waste management in modern Russia / Ed. A.V. Shevchuk. Moskva: Belyy veter, 2021. 560 p. (in Russian).
2. Kaplunov D.R., Ryl'nikova M.V., Yun A.B., Terent'eva N.V. Formation of a new technological way of complex development of subsurface resources with depletion of balance reserves of deposits // *Gornyi zhurnal*. 2019. No. 4. P. 11–14 (in Russian). doi: 10.17580/gzh.2019.04.02
3. Kovalenko V.S. Increase in efficiency of natural and man-made resources use in open coal mining within the framework of the concept of “green” mining industry // *Ugol' (Russian coal journal)*. 2018. No. 4. P. 60–64 (in Russian). doi: 10.18796/0041-5790-2018-4-60-63
4. Tomakov P.I., Kovalenko V.S., Mihajlov A.M., Kalashnikov A.T. Ecology and nature protection in open-pit mining. Moskva: MGGU, 1994. 418 p. (in Russian).
5. Pimentel B.S., Gonzalez E.S., Barboza G.N.O. Decision-support models for sustainable mining networks: fundamentals and challenges // *Journal of Cleaner Production*. 2016. V. 112. P. 2145–2157. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.09.023
6. Mihajlov V.G., Galanina T.V., Mihajlova Ya.S. Waste formation and management dynamics in coal mining // *Gornyi zhurnal*. 2019. No. 4. P. 89–92 (in Russian). doi: 10.17580/gzh.2019.04.20
7. Butorina I.V., Butorina M.V. Review of wastes utilization technologies in mining and metallurgical industry // *Chernye Metally*. 2018. No. 12. P. 44–49 (in Russian).
8. On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2020. State report. Moskva: Minprirody Rossii; MGU im. M.V. Lomonosova, 2021. 1000 p. (in Russian).
9. Mokhnatkin G.V., Ashikhmina T.Ya., Ogorodnikova S.Yu. Biological monitoring of natural and man-made systems // *Theoretical and Applied Ecology*. 2011. No. 4. P. 120–121 (in Russian).
10. Il'in S.A., Kovalenko V.S., Mankevich V.V. Resource conservation in open-pit mining. Moskva: MGGU, 1995. 149 p. (in Russian).
11. Cheskidov V.N., Zaycev G.D. Problems of conversion and multipurpose utilization of siberian coal // *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2013. No. 6. P. 142–150 (in Russian).
12. Minibaev R.R., Korchagina T.V., Novikova Ya.A. On mining wastes recycling by kuzbass enterprises // *Ugol' (Russian coal journal)*. 2016. No. 8. P. 121–123 (in Russian). doi: 10.18796/0041-5790-2016-8-121-123
13. Kovalenko V.S., Artem'ev V.B., Opanasenko P.I. Earth-saving and earth-reproducing technologies at coal mines. Moskva: Gornoe delo. OOO “Kimmeriyskiy tsentr”, 2013. 440 p. (in Russian).
14. Bing-yuan H., Li-xun K. Mine land reclamation and eco-reconstruction in Shanxi province I: mine land reclamation model // *Scientific World Journal*. 2014. V. 2014. No. 1. Article No. 483862. doi: 10.1155/2014/483862
15. Li J., Zipper C.E., Donovan P.F., Wynne R.H., Oliphant A.J. Reconstructing disturbance history for an intensively mined region by time-series analysis of Landsat imagery // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2015. V. IX. Article No. 557. doi: 10.1007/s10664-015-4766-1
16. Xia K., Chen C., Deng Y., Xiao G., Zheng Y., Liu X., Fu H., Song X., Chen L. *In situ* monitoring and analysis of the mining-induced deep ground movement in a metal mine // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. V. 109. P. 32–51. doi: 10.1016/J.IJRMMS.2018.06.014
17. Gaydukova A., Kolesnikov V., Stoyanova A., Kolesnikov A. Separation of highly dispersed carbon material of OU-B grade from aqueous solutions using electroflotation technique // *Separation and Purification Technology*. 2020. V. 245. Article No. 116861. doi: 10.1016/j.seppur.2020.116861
18. Kolesnikov A.V., Meshalkin V.P., Davydkova T.V., Kolesnikov V.A. Scientific and technological foundations of improvement of the resource efficiency of electroflotation recovery of poorly soluble inorganic compounds (oxides, carbides, hydroxides) from aqueous electrolyte solutions // *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Himiya, nauki o materialah*. 2020. V. 494. P. 55–61 (in Russian). doi: 10.31857/S2686953520050076
19. Cheskidov V.I., Norri V.K., Zaitsev G.D., Botvinnik A.A., Bobyl'sky A.S., Reznik A.V. Effectivization of open pit hard mineral mining // *Journal of Mining Science*. 2014. V. 50. No. 5. P. 892–903. doi: 10.1134/S1062739114050081
20. Kolesnikov A.V., Htay T.Z., Kolesnikov V.A., Kovalenko V.S. Extraction by electroflotation of iron, chromium and aluminium hydroxides from aqueous solutions of sodium chlorides and sulphates in the presence of Mg²⁺, Ca²⁺ and surfactants of different types // *CIS Iron and Steel Review*. 2020. V. 20. P. 61–65. doi: 10.17580/cisisr.2020.02.13
21. Mukhin V.M., Korolev N.V. Active carbons as an important factor in the sustainable development of the economy and the quality of life of the population // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 4. P. 210–217 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-210-217
22. Trubetskoy K.N., Galchenko Yu.P. Geocology of subsurface development and ecotechnology of field development. Moskva: Nauchtekhlitizdat, 2015. 360 p. (in Russian).
23. Kul'tin Yu.V., Kamnev E.N., Rybal'chenko A.I. VNIPIpromtekhnologi's performance in in-situ uranium leaching // *Gornyi zhurnal*. 2021. No. 3. P. 26–29 (in Russian).
24. Amdur A.M., Fedorov S.A., Apakashev R.A., Yurak V.V. Environmentally benign recycling of gold-bearing silicate-carbonate mill tailings // *Gornyi zhurnal*. 2020. No. 12. P. 53–55 (in Russian). doi: 10.17580/gzh.2020.12.11