

УДК 330.3:553.493

*М.С. Дориомедов¹, Д.В. Севастьянов¹, Е.А. Шейн¹***ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ, ИНСТИТУЦИОНАЛЬНЫЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ТЕНДЕНЦИИ В ОТРАСЛИ РЕДКИХ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-3-11

Рассмотрены некоторые технологические, институциональные и экономические тенденции в отрасли редких и редкоземельных металлов. Отмечено, что развитие соответствующих тенденций обусловлено доминированием Китая в сфере редкоземельных металлов, а также общими мировыми трендами по обеспечению редкими и редкоземельными металлами, комплексному использованию минерального сырья. Выявление тенденций представляет непосредственный интерес для развития и усиления российской отрасли редких и редкоземельных металлов.

Ключевые слова: редкие металлы, редкоземельные металлы, технологические тенденции, институциональные тенденции, экономические тенденции, развитие.

*M.S. Doriomedov¹, D.V. Sevastyanov¹, E.A. Shein¹***TECHNOLOGICAL, INSTITUTIONAL AND ECONOMIC TRENDS IN THE INDUSTRY OF RARE AND RARE-EARTH METALS (review)**

Technological, institutional and economic trends in the field of rare and rare-earth metals are presented. It was stated that the development of the above-mentioned trends was governed by China's global leadership in rare-earth industry and general global trends concerning steady supply of rare and rare-earth metals as well as rational utilization of mineral raw materials. Elucidation of trends is of profound importance for development and intensification of domestic industry of rare and rare-earth metals.

Keywords: rare metals, rare-earth metals, technological trends, institutional trends, economic trends, development.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Редкие и редкоземельные металлы (РМ и РЗМ) пользуются в мире повышенным вниманием и спросом, поскольку применяются как в современных технологиях, так и при производстве широкого спектра продукции для повседневной жизни.

Анализ особенностей добычи, производства, применения РМ и РЗМ подтверждает наличие новых тенденций в этой отрасли:

– технологических

– извлечение РМ и РЗМ из отходов производства, отработанных изделий, соответствующих руд и нетрадиционных источников;

– внедрение автоматизации при добыче и переработке РМ и РЗМ;

– повышение эффективности использования минерально-сырьевой базы РМ и РЗМ;

– *институциональных*

– запуск национальных программ по развитию отрасли с целью уменьшения зависимости от импорта РМ и РЗМ;

– разработка новых стандартов в области обращения, переработки и утилизации токсичных элементов и отходов;

– *экономических*

– увеличение спроса на литий* вследствие развития рынка электромобилей;

– рост потребности в сталях, других металлах и сплавах, а также новых материалах в целях освоения Арктики.

Указанные тенденции определялись с помощью мониторинга открытых информационных источников научно-технической литературы и специализированной базы данных SciFinder, обеспечивающей доступ к информационным источникам, реферируемым библиографическими платформами Web of Science и Scopus.

Анализ технологических тенденций направлен на выявление результатов технико-технологического совершенствования в сфере добычи, производства, извлечения РМ и РЗМ; институциональных – на выявление основных качественных изменений в сфере нормативно-правовых актов; экономических – на выявление перспективных областей спроса на РМ и РЗМ.

Технологические тенденции

Извлечение РМ и РЗМ из отходов производства, отработанных изделий, соответствующих руд и нетрадиционных источников

В настоящее время вопрос производства РМ и РЗМ является весьма важным с точки зрения развития современных технологий. Особенно он актуален для стран, не имеющих собственных месторождений. В целях обеспечения надежной базы РМ и РЗМ многие страны мира развивают соответствующие технологии их извлечения и переработки. В связи с этим основным направлением развития надежной базы РМ и РЗМ является внедрение новых технологий их извлечения из отходов производства и отработанных изделий (люминесцентных ламп, постоянных магнитов, никель-металлогидридных аккумуляторных и литий-ионных батарей), а также из угля и промышленных отходов (золошлаков, красных шламов, фосфогипса, экстракционной фосфорной кислоты, нефтяных остатков). Развитие технологий извлечения РМ и РЗМ при ограниченности или отсутствии минерального сырья в недрах станет одним из важнейших конкурентных преимуществ экономики страны, определяющим ее место и роль на международной арене. Более подробно вопросы извлечения РМ и РЗМ из отходов производства и отработанных изделий рассмотрены в работе [1].

Необходимость поиска новых технологий переработки и извлечения РМ и РЗМ, а также нетрадиционных источников сырья отчетливо иллюстрируется на примере литиевой отрасли. На фоне возрастающего спроса на данный металл (в 2015 г. – 150 тыс. т в пересчете на карбонат лития, прогноз на 2020 г. – 300–320 тыс. т) за счет массового внедрения электромобилей и гибридных автомобилей, повышается интерес к новым способам добычи и нетрадиционным видам литиевого сырья – некоторым глинам, буровым водам, геотермальным рассолам [2]. Так, американская компания Controlled Thermal Resources планирует к концу 2022 г. начать коммерческое извлечение лития

* Экономические тенденции рассмотрены в основном на примере лития – основного драйвера развития отрасли.

из горячего рассола, циркулирующего в трубах 50-мегаваттной геотермальной электростанции, работающей недалеко от озера Солтон-Си [3]. Идея добычи металла из горячего рассола принадлежит фирме Simbol Materials [2], которая в 2016 г. ввиду ряда проблем вошла в состав компании Controlled Thermal Resources.

В России большие неучтенные ресурсы лития присутствуют в пластовых рассолах в районах разведочных и добычных работ на углеводородное сырье в Восточной Сибири (помимо лития рассолы содержат также магний, бор, бром, йод, стронций). Максимально возможное производство лития только на Знаменском месторождении составляет 1320 т/год [2]. При вводе в действие газопровода в Китай эксплуатация газоконденсатных месторождений Ковыктинское и Левобережное обеспечит рассолами относительно близко расположенную Знаменскую промышленную площадку [2]. Вопрос переработки пластовых рассолов поднимался на расширенном совещании по развитию отечественной литейной отрасли, которое прошло в Минпромторге России в сентябре 2018 г. На совещании обсуждалась концепция законопроекта «О внесении изменений в закон Российской Федерации «О недрах» в части осуществления добычи полезных ископаемых, не относящихся к углеводородному сырью, из подземных вод, извлечение которых связано с разработкой углеводородного сырья», призванного упростить нормативно-правовую базу, регулирующую добычу полезных ископаемых из попутного сырья [4]. В декабре 2018 г. законопроект в части совершенствования добычи попутных полезных ископаемых и попутных компонентов прошел общественное обсуждение [5].

Что касается промышленности РЗМ, то в последние несколько лет (однако пока только на опытных установках) в технологиях извлечения активно применяются ионные жидкости. Так, для экстракции РЗМ из руды или отработанных постоянных магнитов ученые из лаборатории Эймса Министерства энергетики США используют ионные жидкости [6]. Метод включает целенаправленный отбор ионных жидкостей, способных растворять оксиды РЗМ. После растворения оксидов РЗМ в ионной жидкости через нее пропускают электрический ток и электролитическим способом получают тот или иной металл. В работе [7] представлен метод извлечения РЗМ из отработанных люминесцентных ламп с помощью функционализированной ионной жидкости – бис(трифторметилсульфонил)имида бетаиния [Hbet][Tf₂N]. Предложенный инновационный метод позволяет селективно растворять люминофор красного свечения Y₂O₃:Eu³⁺ (YOX) без выщелачивания остальных компонентов (другие люминофоры, частицы стекла, оксид алюминия). Применение ионных жидкостей для извлечения РЗМ и РМ из различных источников приведено также в работах [8–12].

Следует выделить такую технологическую тенденцию, как применение СВЧ-энергии для снижения прочности минерального сырья при его обогащении и активации для проведения последующих процессов переработки. В настоящее время опытно-промышленная эксплуатация данной технологии осуществляется на Ковдорском ГОК [13]. Еще одной инновацией является технология извлечения скандия из продуктивных растворов подземного выщелачивания урана, разработанная в АО «ВНИИПромтехнологии» для АО «Далур» [14, 15]. Метод успешно внедрен в производство и в настоящее время позволяет предприятию получать 50 кг оксида скандия в месяц.

Внедрение автоматизации при добыче и переработке РМ и РЗМ

Внедрение автоматизированных технологий – одно из основных направлений развития добычи минерального сырья. Автоматизация работ достигается преимущественно за счет использования дистанционно управляемых самосвалов, экскаваторов, поездов, мобильных дробильно-сортировочных комплексов и буровых установок.

Внедрение автоматизации создает основу для достижения таких конкурентных преимуществ, как низкая себестоимость, высокие объем и скорость добычи, качество продукции, степень безопасности.

В качестве примера автоматизации горных работ можно привести проект «Рудник будущего» (Пилбара, Западная Австралия), реализуемый австралийско-британским концерном Rio Tinto Group и японской компанией Komatsu [16, 17]. В 2015 г. была введена в эксплуатацию линия транспортирования железной руды посредством самосвалов с дистанционным управлением грузоподъемностью 290 т руды каждый. Машины управляются из г. Перт, расположенного в 1200 км от карьера. В середине 2017 г. на рудниках Yandicoogina и Nammuldi, являющихся частью проекта, работало свыше 150 указанных самосвалов. По оценкам [16, 17], годовая экономия с каждого грузовика составляет около 500 ч. В целом «Рудник будущего» предполагает полную роботизацию добычных работ и сортировки руды с последующим транспортированием сырья на перерабатывающие предприятия посредством автоматизированных самосвалов.

Автоматизированное управление оборудованием также введено несколько лет назад на руднике открытого типа «Бингам» (США) по добыче меди, золота, серебра и молибдена. Решение о введении автоматизированного управления было принято после сильного оползня, случившегося в апреле 2013 г. [17], с целью предотвращения человеческих жертв.

На горно-добывающих предприятиях России также внедряются автоматизированные технологии. Так, в августе 2015 г. на шахте «Полысаевская» (ОАО «СУЭК-Кузбасс»), была запущена новая лава, где впервые применена технология, обеспечивающая роботизированную добычу угля. Согласно проекту, управление оборудованием осуществляется дистанционно с использованием датчиков и видеокамер [17]. Указанная технология разработана ОАО «СУЭК-Кузбасс» совместно с компаниями-производителями горно-шахтного оборудования Marco и Eickhoff (ФРГ).

Еще одним отечественным примером является программа «Интеллектуальное горное предприятие» – в частности, проект «Интеллектуальный карьер», посвященный созданию системы, обеспечивающей автоматизацию горного оборудования. Система управления горно-транспортным оборудованием разработана российской компанией «ВИСТ Групп», и в 2013 г. представлен роботизированный БелАЗ, обеспечивающий имитацию работы реального самосвала. В качестве следующего этапа предполагается переход к промышленным образцам. Недавно компания провела тестирование беспилотного карьерного самосвала на полигоне в Марокко, организованном на базе марокканской компании OCP Group – крупнейшего мирового производителя фосфатов [17–19].

Повышение эффективности использования минерально-сырьевой базы РМ и РЗМ

Среди других тенденций можно выделить повышение эффективности использования минерально-сырьевой базы РМ и РЗМ, которая предполагает добычу и переработку минерального сырья с максимально возможным извлечением всех ценных компонентов и использованием полного производственного цикла, конечной стадией которого является получение готовых продуктов в виде металлов и/или соединений (оксидов, гидроксидов, солей).

Максимальное извлечение металлов и комплексность использования рудного сырья оказывают непосредственное влияние на улучшение технико-экономических показателей производства. Так, по данным работы [20], на Усть-Каменогорском комбинате рентабельность попутной продукции намного превосходит рентабельность

основной. Например, рентабельность производства кадмия – в 3,36 раза, а серной кислоты – в 12,86 раза выше производства цинка. Еще один подход, повышающий рентабельность разработки месторождений, – объединение их в группы. Он применим в случаях, когда месторождения небольшие по запасам или расположены в сложных геотехнических условиях, а также на эксплуатируемых месторождениях, находящихся на стадии исчерпания запасов. В последнем случае в качестве группы месторождений могут рассматриваться прилегающие участки недр, на которых в ходе доразведки возможно выявление залежей, перспективных для промышленного освоения. Объединение ранее открытых месторождений в группы, глубокая переработка сырья, техническая модернизация приведут к увеличению срока эксплуатации обрабатываемого промышленного участка месторождения, а экономический эффект будет выражаться в значительном снижении капитальных затрат и расширении ассортимента продукции [20]. Кроме того, подобный комплексный подход к освоению месторождений позволит сократить количество отходов производства и, соответственно, снизит экологическую нагрузку на регион [20].

Институциональные тенденции

*Запуск национальных программ по развитию отрасли
с целью уменьшения зависимости от импорта РМ и РЗМ*

Дефицит поставок РЗМ из Китая в результате введенного КНР в 2010 г. ограничения квот на экспорт способствовал активизации в разных странах мира проектов по разведке и освоению новых месторождений и реализации национальных программ по развитию отрасли РЗМ.

В Российской Федерации постановлением Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. №328 была утверждена государственная программа «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» с подпрограммой «Развитие промышленности редких и редкоземельных металлов», в рамках которой завершены или близки к завершению 40 проектов в сфере РМ и РЗМ.

В США действует указ №13817 от 20 декабря 2017 г. «Федеральная стратегия обеспечения безопасных и надежных поставок критических видов сырья» [21]. Кроме того, в 2018 г. принят Закон о национальной обороне на 2019 финансовый год (H.R.5515 – John S. McCain National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2019), запрещающий Министерству обороны США закупать редкоземельные магниты производства КНР, РФ, Ирана, КНДР (раздел 871 «Запрет на приобретение чувствительных материалов от иностранных государств»).

Ввиду недостаточной мощности собственных производств и нехватки сырья, РМ и РЗМ имеют критическое значение и для рынка Европейского союза (ЕС). Для решения этой проблемы в 2008 г. была запущена так называемая «Сырьевая инициатива» (Raw Material Initiative), в период 2013–2017 гг. работал проект EURARE [22]. В 2018 г. Еврокомиссия инициировала проект «Гарантирование европейских критических редкоземельных металлов» (Securing European Critical Rare Earth Metals) общей стоимостью свыше 17 млн евро. Проект должен содействовать устойчивой, стабильной и безопасной добыче и переработке РЗМ в Европе и направлен на обеспечение производства к 2023 г. для нужд европейской промышленности не менее 3 тыс. т РЗМ в год. Для консолидации отрасли в 2018 г. учреждена «Ассоциация глобальной редкоземельной индустрии» (Global Rare Earth Industry Association), объединяющая представителей около 40 компаний по добыче РЗМ, разделительных компаний, производителей металла и магнитов, поставщиков автомобилей, научно-производственных объединений, университетов и институтов ЕС [22].

Разработка новых стандартов в области обращения, переработки и утилизации токсичных элементов и отходов в области РМ и РЗМ

Очевидно, что мировой тенденцией ближайших лет станет разработка новых стандартов в области обращения, переработки и утилизации токсичных элементов и отходов, в том числе радиоактивных, в сфере РМ и РЗМ. Важность разработки новых стандартов отражает создание в 2015 г. технического комитета ISO/TC 298 «Редкоземельные металлы», который находится под управлением администрации по стандартизации КНР (Россия является членом данного комитета). Разработка новых стандартов в сфере РМ и РЗМ создает основу для достижения таких конкурентных преимуществ, как: ускорение внедрения наиболее современных технологий и оборудования, подтверждение высокой степени готовности и безопасности технологий относительно окружающей среды и человека, высокое качество продукции, обеспечение опережающего научно-технологического развития. В настоящее время техническим комитетом разрабатываются шесть стандартов в области РЗМ [23].

Экономические тенденции

Увеличение спроса на литий вследствие развития рынка электромобилей

В ближайшее время прогнозируется существенное увеличение спроса на литий, который является важнейшим компонентом литий-ионных батарей. В свою очередь, литий-ионные батареи применяют в электромобилях, гибридных автомобилях (данный сегмент демонстрирует наиболее высокий рост) и электронике (мобильные телефоны, ноутбуки, и т. п.). В энергетических сетях используют литий-ионные аккумуляторы, поскольку для возобновляемых источников энергии требуются накопители большой емкости. Показателем важности и перспективности данного направления являются объемы его финансирования различными компаниями. В частности, в Японии, в результате реализации проекта стоимостью 204 млн долл. США, был создан аккумулятор на 60 МВт·ч, который используется для хранения электроэнергии, полученной посредством фотоэлементов [2]. Исходным соединением лития для изготовления литий-ионных батарей является карбонат лития (Li_2CO_3).

В 2017 г. в мире насчитывалось более 2 млн электромобилей. Согласно расчетам Международного энергетического агентства, к 2030 г. на Земле их будет уже 140 млн [24]. Именно перспективы увеличения производства и продажи электромобилей вызвали рост вложений в добычу лития. Большинство аналитиков предполагает, что потребление лития продолжит возрастать быстрыми темпами, и цены на литий останутся на высоком уровне. По прогнозу аналитической компании CRU, в ближайшие 10 лет мировое потребление лития ежегодно будет увеличиваться на 8,3% и составит в 2025 г. 450 тыс. т в карбонатном эквиваленте. По оценкам, к 2020 г. мировое производство литий-ионных батарей достигнет 175 ГВт·ч [25].

Рост потребности в сталях, других металлах и сплавах, а также новых материалах в целях освоения Арктики

Развитие арктической зоны Российской Федерации определено, прежде всего, принятием государственной программы «Социально-экономическое развитие арктической зоны Российской Федерации», утвержденной постановлением Правительства от 21 апреля 2014 г. №366 (с изменениями от 31 августа 2017 г. №1064). Программа предполагает в том числе и реализацию крупных инфраструктурных металлоемких проектов, нацеленных, прежде всего, на сокращение технологического отставания российской

продукции нефтегазового и промышленного машиностроения для освоения минерально-сырьевой базы Арктики от мирового уровня. Предполагается, что развитие региона будет способствовать поддержанию спроса на конструкционные и специальные материалы, содержащие РМ, прежде всего молибден, ниобий, вольфрам [26–28].

Так, в целях реализации развития судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений в ЦНИИ КМ «Прометей» разрабатывают промышленную технологию производства листового проката стали, легированной молибденом, для применения в условиях Арктики. Программой предполагается постепенное снижение доли импортной продукции для освоения месторождений – с 85 до 50%, создание природоохранного, речного и ледокольного флотов, производства оборудования для освоения минерально-сырьевых ресурсов (добычного, обогатительного, горно-транспортного), нефтегазового оборудования (бурового, наносного и пр.). Следует отметить, что разработка материалов для холодного климата велась еще в рамках проекта «Баренц-2020» начиная с 2007 г. В Арктику инвестируют ПАО «Роснефть», ПАО «Новатэк», ПАО «Газпром нефть». Основные направления инвестирования – строительство терминалов, разведка и добыча.

Заключения

За последние 10 лет в отрасли РМ и РЗМ наблюдаются глубокие качественные изменения, которые обусловлены значительным доминированием Китая в этой сфере, что делает уязвимыми развитые страны (США, Японию, ЕС) [29].

Совокупность факторов, таких как недостаток сырья, угроза прекращения поставок, ограничительные квоты, привела к формированию в различных странах ряда тенденций, направленных на развитие производства РМ и РЗМ из вторичного сырья и отходов. Перспективным направлением в сфере производства РМ и РЗМ, вероятно, будет увеличение уровня автоматизации при добыче и извлечении РМ и РЗМ из отходов производства, в том числе из отходов недропользования (вскрышные и вмещающие горные породы, шламы, хвосты обогащения полезных ископаемых) и подземных вод (следует отметить, что извлечение полезных ископаемых из подземных вод актуально для добычи таких элементов, как йод, бром, бор, магний, калий, литий, рубидий, цезий, стронций, германий).

В краткосрочной перспективе важным направлением останется усиление отрасли за счет создания консорциумов (в Китае [27]) и ассоциаций (в ЕС, Китае), объединяющих основных производителей РМ и РЗМ, а также реализации ряда государственных заказов в этой сфере. Целесообразно также создание такой ассоциации и в России, где перспективы развития потребления РМ и РЗМ заключаются: в создании новых производств, использующих РМ и РЗМ в качестве исходных компонентов; модернизации уже существующих мощностей по выпуску стали и сплавов для целей освоения Арктики, а также в развитии рынка литий-ионных аккумуляторов.

Отмеченные тенденции в долгосрочной перспективе окажут значительное влияние на развитие отрасли РМ и РЗМ как в РФ, так и в мире [29, 30].

ЛИТЕРАТУРА

1. Севастьянов Д.В., Дориомедов М.С., Сутубалов И.В., Кулагина Г.С. Направления развития производственных технологий в области редкоземельных металлов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №1 (61). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.04.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-4-4.
2. Литий: сверхвозможности суперметалла // Редкие Земли. URL: <http://rareearth.ru/pub/20161026/02870.html> (дата обращения: 16.01.2019).

3. New partnership announced for large-scale lithium-geothermal project in California. URL: <http://www.thinkgeoenergy.com/new-partnership-announced-for-large-scale-lithium-geothermal-project-in-california/> (дата обращения: 15.04.2019).
4. Минпромторг провел совещание по развитию литиевой отрасли в России // Редкие Земли. URL: <http://rareearth.ru/ru/pub/20180914/04086.html> (дата обращения: 18.12.2018).
5. Минприроды России разработало механизмы по совершенствованию добычи попутных полезных ископаемых и попутных компонентов. URL: http://www.mnr.gov.ru/press/news/minprirody_rossii_razrabotalo_mekhanizmy_po_sovershenstvovaniyu_dobychi_poputnykh_poleznykh_iskopaem/ (дата обращения: 15.04.2019).
6. Mudring A. Ionic liquids open door to better rare-earth materials processing. URL: <https://www.ameslab.gov/news/news-releases/ionic-liquids-open-door-better-rare-earth-materials-processing> (дата обращения: 04.03.2019).
7. Dupont D., Binnemans K. Rare-earth recycling using a functionalized ionic liquid for the selective dissolution and revalorization of Y_2O_3 : Eu^{3+} from lamp phosphor waste // Green Chemistry. 2015. Vol. 17. No. 2. P. 856–868.
8. Method for direct separation of rare earth metals in uranium dioxide or spent fuel: pat. CN108538417A; appl. 03.04.18; publ. 14.09.18.
9. Bagri P., Luo H., Dehaut J. et al. Electrodeposition of neodymium using room temperature ionic liquids // 256th ACS National Meeting & Exposition (Boston, August 19–23, 2018). 2018. INOR-98.
10. Matsumiya M. Purification of Rare Earth Amide Salts by Hydrometallurgy and Electrodeposition of Rare Earth Metals Using Ionic Liquids // Progress and Developments in Ionic Liquids. DOI: 10.5772/66300. URL: <https://www.intechopen.com/books/progress-and-developments-in-ionic-liquids/purification-of-rare-earth-amide-salts-by-hydrometallurgy-and-electrodeposition-of-rare-earth-metals> (дата обращения: 04.03.2019).
11. Chen L., Chen J., Li H. et al. Applying basic research on a dialkylphosphoric acid based task-specific ionic liquid for the solvent extraction and membrane separation of yttrium // Separation and Purification Technology. 2018. Vol. 207. P. 179–186.
12. Separation of rare earth metals: International application WO2018109483A1; publ. 21.06.18.
13. «ВНИИХТ» разработал технологию извлечения редкоземельных металлов с помощью микроволнового излучения // Редкие Земли. URL: <http://rareearth.ru/ru/news/20180601/03957.html> (дата обращения: 04.03.2019).
14. «Далур» выпустит первую промышленную партию оксида скандия в июне 2017 года // Редкие Земли. URL: <http://rareearth.ru/ru/news/20170425/03131.html> (дата обращения: 15.02.2019).
15. Росатом добыл первую партию скандия // Редкие Земли. URL: <http://rareearth.ru/ru/news/20170713/03295.html> (дата обращения: 15.12.2018).
16. Mine of the Future // RioTinto: офиц. сайт. URL: <http://www.riotinto.com/australia/pilbara/mine-of-the-future-9603.aspx> (дата обращения: 15.12.2018).
17. Райнеш Е. Робот за рулем. «Интеллектуальные карьеры», «умные машины» и безопасное будущее // Уголь Кузбасса. 2017. №3. URL: <http://www.uk42.ru/index.php?id=5292> (дата обращения: 15.03.2019).
18. Клебанов Д.А., Макеев М.А. Роботизированные технологии добычи полезных ископаемых рождаются в недрах инновационного центра Сколково // Горная промышленность. 2012. №4. С. 132. URL: <https://mining-media.ru/ru/article/anonsy/2826-robotizirovannye-tekhnologii-dobychi-poleznykh-iskopaemykh-rozhdayutsya-v-nedraakh-innovatsionnogo-tsenta-skolkovo> (дата обращения: 15.11.2018).
19. Интеллектуальный карьер – это проект полностью роботизированного, безлюдного горного предприятия // Вист Групп: офиц. сайт. URL: <http://vistgroup.ru/media/news/nid/intellectual-careers-project/> (дата обращения: 15.11.2018).
20. Кабиров В.Р., Рейшахрит Е.И. Эффективность комплексного подхода к разработке месторождений металлических руд в группах // Записки Горного института. 2014. Т. 208. С. 23–26.
21. A Federal Strategy To Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals / Executive Office of the President. Executive order 13817 of December 26, 2017.

22. Кофнер Ю.К. Консолидация редкоземельной индустрии в Европейском союзе: рекомендации для Евразийского экономического союза // Междунар. конф. «Редкоземельные металлы 2019» (Москва, 28 марта 2019 г.). URL: <http://eurasian-studies.org/archives/11704> (дата обращения: 17.04.2019).
23. Дориомедов М.С., Севастьянов Д.В., Скрипачев С.Ю., Дасковский М.И. Нормативная документация в области редкоземельных металлов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №5 (65). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.04.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-18-23.
24. The rise of electric cars could leave us with a big battery waste problem. URL: <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2017/aug/10/electric-cars-big-battery-waste-problem-lithium-recycling> (дата обращения: 15.11.2018).
25. Аналитики предполагают избыток предложения лития на рынке к 2022 году // Редкие Земли. URL: <http://rareearth.ru/ru/news/20170428/03143.html> (дата обращения: 25.09.2018).
26. Шеин Е.А., Дориомедов М.С., Дасковский М.И. Современные материалы для работы в условиях арктического климата // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №1 (19). Ст. 07. URL: <http://materialsnews.ru/ru/articles> (дата обращения: 01.04.2019).
27. Бузник В.М., Каблов Е.Н. Состояние и перспективы арктического материаловедения // Вестник Российской академии наук. 2017. Т. 87. №9. С. 827–839.
28. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
29. Гасанов А.А., Наумов А.В., Юрасова О.В. и др. Некоторые тенденции мирового рынка РЗМ и перспективы России // Известия вузов. Цветная металлургия. 2018. №4. С. 31–44. DOI: 10.17073/0021-3438-2018-4-31-44.
30. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.05.2019).