

При этом в мире идет активный поиск заменителей РЗМ в производстве магнитов, однако существенного прогресса в этом направлении добиться не удалось. Тем не менее, улучшены характеристики магнитных систем ряда редкоземельных магнитов. Это — сплавы на основе марганца (соединения MnBi и MnAl), нитриды железа и карбиды кобальта [5].

Правда по мнению ряда аналитиков, рынок пришел к выводу, что РЗМ являются единственными «жизнеспособными» материалами для постоянных магнитов и больше нет причин продолжать искать их заменители.

В структуре потребления РЗМ в Китае основной объем приходится на выпуск редкоземельных магнитов (около 45 %). Кстати, Китай «перехватил» в начале 2000-х годов лидерство у Японии в производстве РЗМ-магнитов.

В России основное количество используемых РЗМ приходится на выпуск катализаторов (около 70 %, рис. 3) — главным образом катализаторов каталитического крекинга для нефтеперерабатывающей промышленности.

Уровень внутреннего использования РЗМ является характерным признаком реальной экономической мощи государства. Сейчас в Китае потребляется свыше 100 тыс. т РЗМ., Япония использует 20–25 тыс. т, США — около 15 тыс. т.

Внутренний рынок РЗМ России продолжает оставаться слабым, по данным «Инфомайн» уровень потребления редких земель в пересчете на оксиды в 2018 г. составил около 1 тыс. т, в 2019 г. он увеличился до 1,1 тыс. т [4]. Пока в нашей стране, к сожалению, использование редких металлов в прорывных высокотехнологических отраслях находится в неразвитом состоянии, хотя ветроэнергетика в ближайшей перспективе может стать главным драйвером роста.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров, И.М. О классификации редких металлов на основе рыночного спроса / И.М. Петров // Минеральные ресурсы России. — 2019. — № 5. — С. 47–49.
2. Обзор рынка лития и его соединений в мире и России. 2-е изд. — М.: ООО «Исследовательская группа «Инфомайн», 2017. URL: <http://www.infomine.ru/research/38/374> (платный доступ) (дата обращения 20.11.2019).
3. Обзор рынка редкоземельных элементов (металлов) в России. 12-е изд. — М.: ООО «Исследовательская группа «Инфомайн», 2019. URL: <http://www.infomine.ru/research/38/615> (платный доступ) (дата обращения 23.11.2019).
4. Lithium Market Outlook. URL: http://s1.q4cdn.com/793210788/files/doc_news/2018/6/Foro-del-Litio-2018-Lithium-Market-Update-20180808-FINAL.pdf (дата обращения 22.11.2019).
5. Jun, Cui, Matthew Kramer, Lin Zhou, Fei Liu, Alexander Gabay George Hadjipanayis, Balamurugan Balasubramanian, David Sellmyer Current progress and future challenges in rare-earth-free permanent magnets. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645418305858> (дата обращения 22.11.2019).

© Петров И.М., Белоусова Е.Б., Петрова А.И., 2020

Петров Игорь Михайлович // ipetrov@infomine.ru
Белоусова Евгения Борисовна // ebeloysova@infomine.ru
Петрова Александра Игоревна // aleks.pet.93@mail.ru

Галиева Ж.Н.¹, Абрамов А.М.², Соболев Ю.Б.², Геря В.О.¹
(1 — ООО «Лаборатория Инновационных Технологий»,
2 — ГК «Скайград»)

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РАЗДЕЛЕНИЯ РЗЭ ЭКСТРАКЦИЕЙ В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ЭКСТРАКТОРАХ ИЗ КОНЦЕНТРАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ОТЕЧЕСТВЕННОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ: РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ, ОСВОЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

*В статье рассмотрены перспективные источники редкоземельного сырья, показаны достижения компании «Лаборатория Инновационных Технологий» в области получения и разделения редкоземельных элементов и описана технология разделения редкоземельных концентратов с перспективами дальнейшего развития. **Ключевые слова:** редкоземельные элементы, фосфогипс, трибутилфосфат, индивидуальные РЗЭ, экстракция, Cyanex 572, Versatic®10.*

Galieva Zh.N.¹, Abramov A.M.², Sobol Yu.B.², Gerya V.O.¹ (1 — Laboratory of Innovative Technologies LLC, 2 — Skygrad Group of Companies)

UNIVERSAL TECHNOLOGY FOR SEPARATION OF REE BY EXTRACTION IN CENTRIFUGAL EXTRACTORS FROM CONCENTRATES OBTAINED FROM DOMESTIC MINERAL RAW MATERIALS: DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY AND EQUIPMENT, DEVELOPMENT OF PRODUCTION, PROSPECTS

*The article discusses promising sources of rare-earth raw materials, shows the achievements of the Laboratory of Innovative Technologies in the field of production and separation of rare-earth elements, and describes the technology of separation of concentrates with prospects for further development. **Keywords:** rare earth elements, phosphogypsum, tributyl phosphate, individual REE, extraction, Cyanex 572, Versatic 10.*

Объем производства и потребления РЗМ являются индикатором технического развития государства. Редкоземельные металлы — стратегически важное сырье, обеспечивающее технологическую независимость Российской Федерации.

В «Стратегии развития промышленности редких и редкоземельных металлов на период до 2035 года», разработанной участниками Государственной Программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности», выделены освоенные и наиболее перспективные для освоения в ближайшие годы месторождения отечественного минерального редкоземельного сырья [8].

1. Ловозерское месторождение — лопаритовый концентрат представляет минерал подкласса сложных оксидов, содержит в переменных количествах оксиды

Таблица 1
Основные этапы развития промышленности РЗМ в Российской Федерации [1]

Развитие промышленности РЗМ по этапам и годам	2021–2025 г.	2025–2030 г.	2030–2035 г.
Этап 1 Восстановление промышленности РМ и РЗМ. Производство РЗМ в России после ввода новых мощностей в Стратегии по РМ и РЗМ	Производство 5000 т разделенных РЗМ, 30 % импорта РЗМ, экспорт неразделенных РЗМ (ОАО «СМЗ»)		
Этап 2 Развитие промышленности РЗМ. Выход на проектную мощность Томгора и КГМК. Запуск Зашихинского месторождения		Производство 18 000 т разделенных РЗМ, менее 15 % импорта РЗМ, 5 % от мирового производства РЗМ	
Этап 3 Достижение конкурентоспособности. Производство РЗМ в России после реализации Стратегии развития промышленности РМ и РЗМ			Производство 25 000 т разделенных РЗМ, менее 15% импорта РЗМ, 15% от мирового производства РЗМ

титана, ниобия, тантала, редкоземельных элементов, стронция и тория — добыча и переработка с получением основных компонентов руды, включая РЗК, освоены на ОАО «СМЗ» г. Соликамск Пермской обл. Технология разделения РЗК на индивидуальные элементы (легкая группа РЗЭ) освоена на предприятии ООО «ЛИТ» ГК «Скайград», г. Королев.

2. Апатит-нефелиновые месторождения Хибин, апатитовый концентрат (АК) получают после отделения нефелина на стадии обогащения (минерал класса фосфатов общей формулы $Ca_5[PO_4]_3X_2$, где X — обычно F):

2.1 попутное извлечение РЗЭ из НФР при переработке АК с получением минеральных удобрений по азотнокислотной схеме (месторождение Олений ручей), технология извлечения РЗЭ и разделения на индивидуальные элементы (легкая группа РЗЭ) освоена на предприятии ПАО «Акрон», г. Великий Новгород Новгородской обл.;

2.2 извлечение РЗЭ из фосфогипса — отхода от переработки АК с получением минеральных удобрений по сернокислотной схеме (отвалы фосфогипса в г. Воскресенск Московской обл., г. Волхов Ленинградской обл., г. Череповец Вологодской обл., г. Мелеуз Республики Башкортостан, г. Балаково Саратовской обл., с. Перекоп (г. Армянск, Республика Крым). Технология получения РЗК и полный цикл разделения его на индивидуальные элементы разработана ООО «ЛИТ» ГК «Скайград», г. Королев и планируется к освоению в 2020–2021 гг.

3. Томторское месторождение представлено минералами пироклора, монацита и крандаллита (участок Буранный, Республика Саха, Якутия). Технология получения РЗК и разделения его на индивидуальные элементы разработана ВНИИХТом и Гипроцветметом и в настоящее время проходит стадию опытно-промышленных испытаний. Освоение производства и выход на проектную мощность планируется в 2025–2030 гг. (группа компаний ИСТ).

4. Месторождение Зашихинское (цирконий–тантал–ниобиевая руда с редкоземельными элементами среднетяжелой группы (г. Нижнеудинск, Иркутская обл.)). Технология получения РЗК и полный цикл разделения его на индивидуальные элементы разработана и планируется к освоению и выходу на проектную мощность в 2025–2030 гг. (ЗАО «Техноинвест Альянс»). В табл. 1 представлены основные этапы развития промышленности РЗМ в Российской Федерации по годам.

Исходя из вышесказанного, на первом этапе развития промышленности РЗМ перспективным минеральным сырьем для производства является апатитовый концентрат и продукты его переработки — НФР, фосфогипс, ЭФК, а также лопаритовый концентрат.

Для закрытия потребностей в РЗМ по отдельным элементам с учетом особенностей сырья, доступного на территории Российской Федерации к 2035 г., необходимо обеспечить практически полное разделение коллективных концентратов РЗМ.

ООО «Лаборатория Инновационных Технологий» (ЛИТ) создана в 2011 г. как научно-производственное подразделение группы компаний «Скайград». Основной вид деятельности — научные исследования и разработки в области естественных и технических наук. В период с 2011 по 2012 г. в ЛИТ были проведены исследования по комплексной переработке фосфогипса с получением концентрата РЗЭ по собственной технологии [2–4]. Далее исследования были продолжены в направлении разработки универсальной технологии разделения РЗЭ из промышленных концентратов, получаемых предприятиями ОАО «СМЗ», ПАО «Акрон», ООО «ЛИТ» с получением индивидуальных соединений РЗЭ; на первом этапе — церия, лантана, неодима, празеодима, концентрата среднетяжелой группы РЗЭ, на втором этапе — самария, гадолиния, иттрия, европия, диспрозия и тербия [1, 5, 6]. Кроме того, были проведены опытно-промышленные испытания с выдачей исходных данных на проектиро-

Таблица 2

Состав РЗК по индивидуальным элементам, % в оксидах (этап 1)

Состав РЗК	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Y	Yb
АК (ФГ, ПАО «Акрон»)	26,0	46	4,3	14,9	1,6	0,65	1,7	0,17	0,97	0,14	0,35	3,20	0,02
ЛК (ОАО «СМЗ»)	26,1	54,2	5,0	13,0	0,97	0,18	0,15	0,02	0,11	*0,4	—	0,02	—

Таблица 3

Состав СТГ по индивидуальным элементам, % в оксидах (этап 2)

Состав РЗК	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Y	Yb
СТГ АК (ФГ, ПАО «Акрон»)	36,4	9,4	14,6	1,1	5,9	0,80	0,68	0,03	30,3	0,04
СТГЛК (ОАО «СМЗ»)	70,0	10,6	13,7	1,1	2,7	0,32	0,22	0,02	1,18	0,02

Таблица 4

Экстрагенты, используемые в технологии разделения РЗК; производители

Торговая марка	Химическая формула	Страна, компания-производитель
ТБФ	Три-н-бутилфосфат	Россия, ООО «Волжский оргсинтез» (Китай, США)
Aliquat®336	Триакприметиламмоний хлорид	Германия, BASF®SE
Суанех®572	Бис-2,4,4-триметилпентил фосфиновая кислота и моно-2-этилгексил фосфоновый эфир моно-2-этилгексил фосфоновой кислоты	США, Cytec® Industries Inc.
Versatic®10	2-этил-2,5-диметилгексановая кислота	Германия, NEO Chemical, Россия, Сетилим

Таблица 5

Затраты на разделение 1 кг РЗО (СМЗ) на элементы легкой группы

Продукция/затраты	Стоимость передела 1 кг РЗО (СМЗ), руб.
По реагентам:	
Ce	70,09
La	54,53
СТГ	3,42
Pr	15,90
Nd	32,47
Всего:	176,41
На электроэнергию, суммарно	22,4
ИТОГО:	198,8

*цены приведены на январь 2018 г.

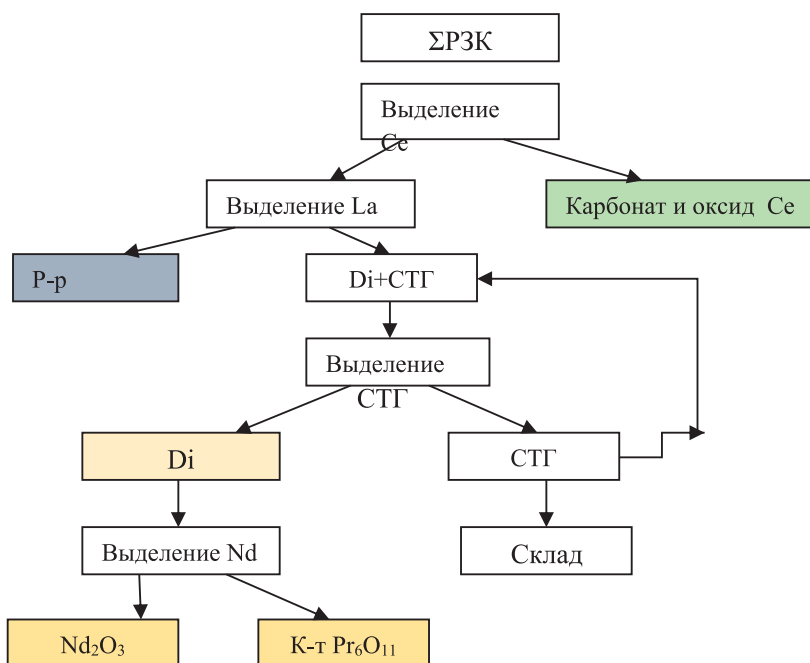


Рис. 1. Технологическая схема разделения РЗК, 1-й этап

вание опытно-промышленной установки модельных концентратов, имитирующих состав РЗК месторождения Томтор.

Для реализации этой технологии в промышленном масштабе было разработано уникальное оборудование — электролизер с керамической корундовой диафрагмой (Skysel-500) и центробежный экстрактор из высокомолекулярного полиэтилена для работы в высокоагрессивных средах окисленного церия (ЭЦ-1000ПБ).

Для экспресс-контроля состава редкоземельных концентратов в каскадах разделения была разработана конструкция атомно-эмиссионного спектрометра с микроволновой плазмой (Спектро-Скай).

Исследования были завершены созданием и освоением экспериментального производства (ЭП) по разделению групповых концентратов РЗЭ производства ОАО «СМЗ» с получением индивидуальных соединений РЗЭ — церия, лантана,

неодима, празеодима и концентрата среднетяжелой группы. Объем переработки РЗК-130–140 т в год. Состав концентратов по индивидуальным элементам (% в оксидах), использованный по этапам исследо-

вания, приведен в табл. 2, 3. Технологическая схема разделения РЗК (первый этап) представлена на рис. 1. Экстрагенты, используемые в технологии разделения РЗК указаны в табл. 4.

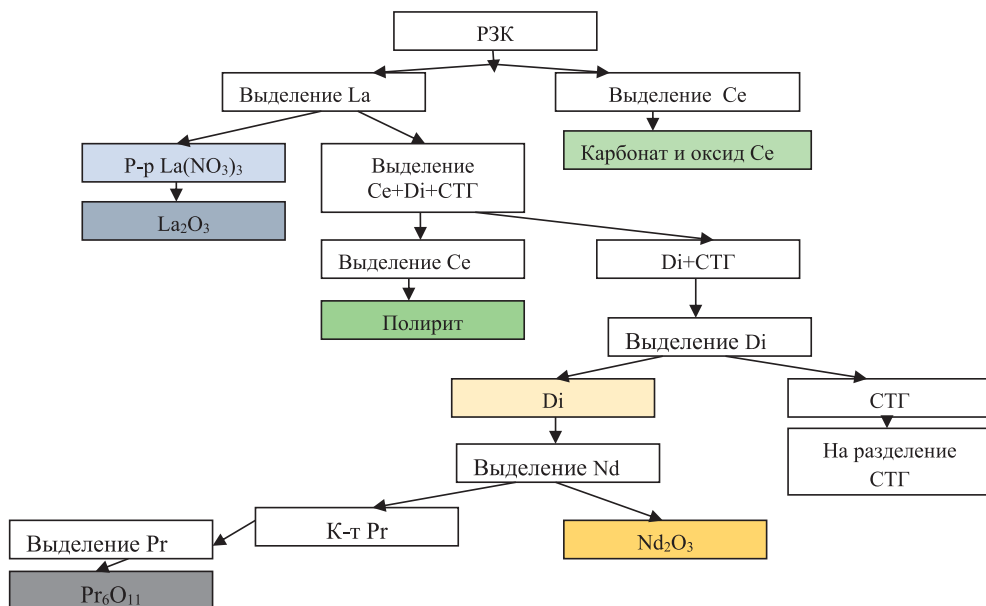


Рис. 2. Этап 2 – Увеличение объема переработки и ассортимента продукции

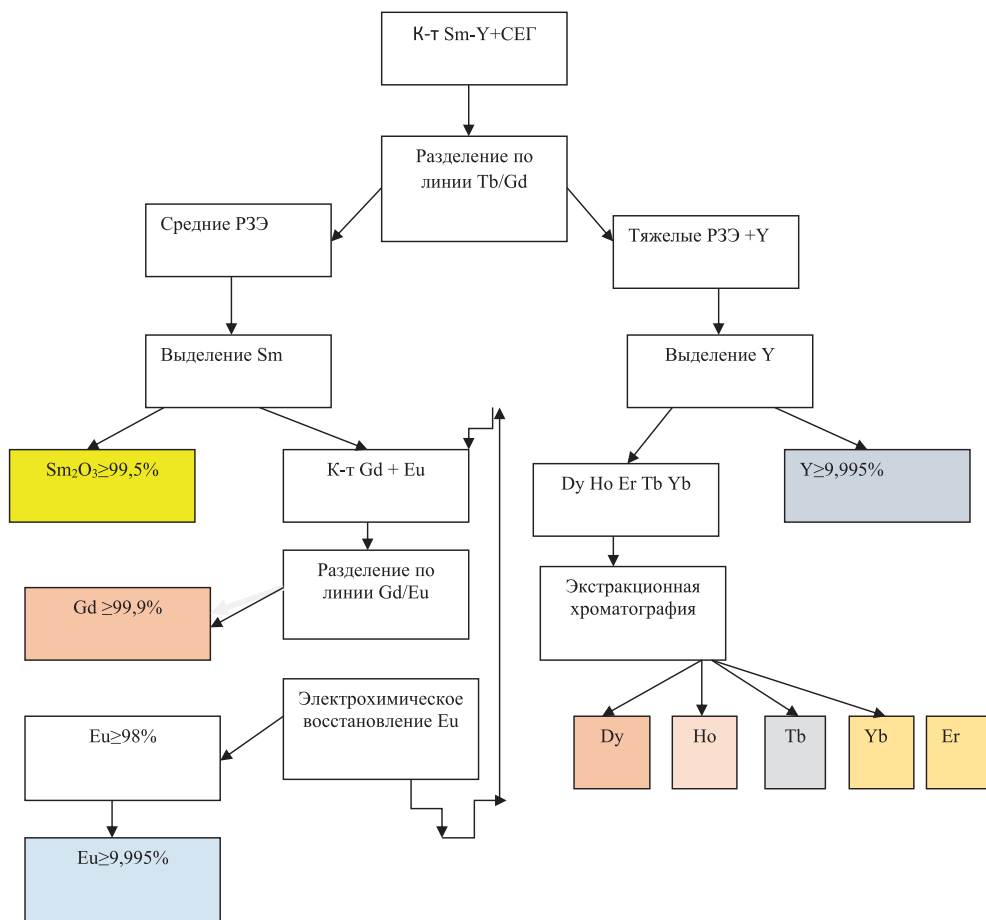


Рис. 3. Этап 2.2 – Разделение СТГ

На втором этапе развития производства кроме увеличения объема переработки РЗК планируется расширение ассортимента РЗЭ-продукции и внедрение технологии разделения среднетяжелых РЗЭ (СТГ) (рис. 2)

В табл. 5 приведен расчет затрат на разделение концентрата ОАО «СМЗ» на элементы легкой группы по реагентам и электроэнергии. Общие затраты на разделение можно условно разделить на четыре основные части: сырье, реагенты, электроэнергия и зарплата обслуживающего персонала.

При увеличении производительности производства относительный вклад затрат на обслуживание производства (зарплата обслуживающего персонала) будет уменьшаться, стоимость по реагентам будет неизменна, а затраты на электроэнергию вырастут пропорционально установленному оборудованию. Приведенная суммарная стоимость разделенной продукции для концентрата ОАО «СМЗ» составляет ~11,5 \$/кг за счет высокой доли в концентрате РЗЭ легкой группы, в то время как для ГРЗК, выделенного из фосгогипса, она увеличивается до ~18,5 % за счет высокой доли в концентрате РЗЭ среднетяжелой группы. Поэтому использование для разделения концентрата РЗЭ из фосгогипса повышает рентабельность стадии передела, что является крайне важной задачей развития производства.

Приведенная суммарная стоимость разделенных оксидов характеризует сто-



Рис. 4. Фрагменты производства центробежных экстракторов в ООО «ЛИТ»



Рис. 5. Фрагменты участка получения оксидов неодима и празеодима, модель экстрактора-ЭЦ-1000ПБ

имостное качество концентрата РЗО и представляет собой сумму цены на индивидуальные оксиды умноженную на процентное содержание этих оксидов в ГРЗК.

Для создания промышленного производства с объемом переработки РЗК 1000 т в год решаются две основные задачи:

1) получение собственного концентрата из ФГ — создание производства в г. Воскресенск по переработке ФГ на базе китайского завода, освоение комплексной технологии переработки ФГ с получением РЗК и гипсового вяжущего;

2) создание промышленного производства по разделению РЗК на пром. площадке пгт. Пересвет Московской обл., для чего планируется запуск в серию экстрактора ЭЦ — 10.000 — новая разработка компании, с последующим его освоением в производстве.

Проверка пригодности модели проводилась на ЭЦ-320 разработки НИКИМТ-Росатом.

Поставка нового оборудования позволит увеличить производительность завода по разделению сначала до 1000 т в год с наращиванием до 2000 (2025 г.) и далее до 4000 т в год (2030–2035 гг.).

Кроме того, появится возможность на освободившемся оборудовании организовать производство по разделению среднетяжелой группы РЗЭ (СТГ) — конец 2021 г. (рис. 3)

На рис. 4 представлена модель центробежного экстрактора собственного производства ЭЦ — 1000ПБ, а также модифицированная модель ЭЦ-320, на рис. 5 — участок получения оксидов неодима и празеодима.

ЛИТЕРАТУРА

1. Галиева, Ж.Н. Разработка универсальной технологии и оборудования по разделению РЗК в каскадах центробежных экстракторов, освоение производства / Ж.Н. Галиева, А.М. Абрамов, Ю.Б. Соболев, М.С. Игумнов, В.О. Геря, С.С. Шулин, С.В. Чижевская // Химическая технология сегодня. — 2019. — № 3. — С. 54–60.
2. Способ извлечения редкоземельных металлов из фосфогипса: патент 2487834 РФ: МПК51 С01F 17/00 / Абрамов А.М., Галиева Ж.Н., Галиев Р.С., Сабина О.Р., Соболев Ю.Б., заявл. 27.12.2011; опубл. 20.07.2013. — Бюл. № 20.
3. Способ переработки редкоземельного концентрата: патент 2573905 РФ: МПК51 С01F 17/00, С22В 59/00, С01F 15/00 / Абрамов А.М., Галиева Ж.Н., Галиев Р.С., Соболев Ю.Б., Солодовников А.В., заявл. 23.09.2014; опубл. 27.01.2016. — Бюл. № 3.
4. Способ извлечения РЗЭ из фосфогипса: патент 2689631 РФ: МПК51 С01F 17/00, С22В 59/00, С22В 3/00 / Галиева Ж.Н., Абрамов А.М., Соболев Ю.Б., Пироженко К.Ю., Кулагин Б.Р., Дронов Д.В., заявл. 30.12.2016; опубл. 28.05.2019. — Бюл. 16.
5. Способ электрохимического окисления цезия: патент 2623542 РФ: МПК51 С22В 59/00, С25С 1/22 / Абрамов А.М., Соболев Ю.Б., Галиева Ж.Н., Игумнов М.С., Кулагин Б.Р., заявл. 10.08.2016; опубл. 27.06.2017. — Бюл. № 18.
6. Способ экстракционного разделения редкоземельных элементов: патент РФ № 2693714 / Галиева Ж.Н., Абрамов А.М., Соболев Ю.Б., Геря В.О., Быданов Б.А., Семенов А.А., Солодовников А.В., заявл. 25.12.2018, опубл. 04.07.2019. — Бюл. 19.
7. Шулин, С.С. Экстракционное разделение редкоземельных элементов средней группы изомольными смесями Aliquat®336-ТБФ и Суапех®572-ТБФ из нитратных сред / С.С. Шулин, Ж.Н. Галиева, С.В. Чижевская, Ю.В. Плехина, Н.С. Савельев // Неорганические материалы. — 2018. — Т. 54. — № 5. — С. 538–542.
8. http://minpromtorg.gov.ru/docs/#!strategiya_razvitiya_otrasli_redkih_i_redkozemelnyh_metallov_rossiyskoy_federacii_na_period_do_2035_goda.

© Коллектив авторов, 2020

Галиева Жанетта Николаевна // z.galieva@gmail.com
 Абрамов Алексей Михайлович // abramovam@sky-grad.ru
 Соболев Юрий Борисович // sobolyb@sky-grad.ru
 Геря Владимир Олегович // geria@sky-grad.com