

# СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕДКОМЕТАЛЛЬНОЙ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Под редакцией  
члена президиума РАН акад. **Л.И. Леонтьева**  
и докт. хим. наук **В.И. Сачкова**



ТОМСК  
«Издательство НТЛ»  
2016

УДК 661.865, 661.884, 661.879.1  
С568

**С568** **Современные технологии редкометалльной и редкоземельной промышленности** / под ред. члена президиума РАН акад. Л.И. Леонтьева и докт. хим. наук В.И. Сачкова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016. – 388 с.

ISBN 978-5-89503-586-3

В данной книге собраны статьи по широкому кругу вопросов, связанных с разработкой, добычей, получением, переработкой и применением соединений на основе редких и редкоземельных металлов. Главы подготовлены ведущими специалистами разных стран, которые непосредственно работают в областях наук, связанных с редкими и редкоземельными металлами. Отражены последние достижения в соответствующих направлениях.

В монографию вошли результаты и передовой опыт многочисленных исследований, большая часть которых подробно обсуждена в рамках III Международного симпозиума «Фундаментальные вопросы разведки, добычи, разделения редких и редкоземельных элементов и создания современных материалов на их основе», проведенного на базе Акционерного общества «Волковгеология» Республики Казахстан при поддержке ОАО «Гидрометаллургический завод» и в сотрудничестве с ведущими университетами (Национальный исследовательский Томский государственный университет, Казахский национальный университет им. аль-Фараби) в г. Алматы с 15 по 18 августа 2016 г.

**УДК 661.865, 661.884, 661.879.1**

**Авторский коллектив:**

А.Н. Аврамчик, О.С. Андриенко, С.И. Ануфриева, Н.И. Афанасьев, К.М. Байтасов, М.А. Байтасов, Г.А. Вардан, Е.Б. Дайбова, Т.В. Демент, Б.О. Дуйсебаев, О.Н. Змеева, Л.А. Казанцева, М.А. Казарян, Е.В. Кайгородов, М.И. Кайзер, М.П. Калашников, Н.И. Каракчиева, Г.Г. Карамян, Н.Г. Касацкий, Е.М. Князева, И.А. Курзина, Г.В. Ларина, О.К. Лепакова, Ли Хунда, Е.Г. Лихнекевич, А.А. Луканин, Г.В. Лысак, И.А. Лысак, О.В. Львов, Т.Д. Малиновская, Г.А. Мартоян, А.Ю. Назарова, Р.А. Нефедов, Е.Л. Никоненко, Е.В. Обходская, А.В. Обходский, В.В. Орлов, Л.П. Петрова, А.С. Попов, Н.А. Попова, Н.И. Радишевская, М.С. Романова, А.Б. Сайнакова, В.И. Сачков, С.А. Сосновский, О.Б. Степанова, А.М. Шульпек

ISBN 978-5-89503-586-3

© Авторы, 2016

© Оформление. Дизайн.

ООО «Издательство НТЛ», 2016

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Интерес к редкоземельным элементам привлекает большое внимание многих исследователей. В августе 2016 г. состоялся III Международный симпозиум «Фундаментальные вопросы разведки, добычи, разделения редких и редкоземельных элементов и создания современных материалов на их основе» с участием ведущих специалистов АО «Волковгеология» (Республика Казахстан), ОАО «Гидрометаллургический завод» (РФ), Научно-производственного объединения «ЭКОАТОМ» (Республика Армения), АО «Центр наук о Земле, металлургии и обогащения» (Республика Казахстан), АО «Аксион – Редкие и Драгоценные Металлы» (РФ), АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет» (РФ), ООО «Центр технологий Лантан» (РФ), ООО «Дипос» (РФ), Казахского национального университета им. аль-Фараби (Республика Казахстан), Национального исследовательского Томского государственного университета (РФ), Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (РФ) и др.

По сложившейся традиции итоги работы симпозиума опубликованы в виде материалов, представленных на обсуждение.

В первом разделе приводятся основы разработки и описание технологии дезактивации концентратов и руд, содержащих редкие и редкоземельные элементы. Они характеризуются высокой степенью радиоактивности, связанной с повышенным содержанием природных радионуклидов вследствие их геохимического сходства с редкими металлами. При среднем значении эффективной удельной активности редкометалльных руд 1000 Бк/кг наиболее часто встречающееся значение этого параметра – 640 Бк/кг, а максимальные значения достигают величины 2035 Бк/кг, что в 3–5 раз больше предельно допустимых значений для I класса материалов с повышенным содержанием природных радионуклидов. Основной вклад в эффективную удельную активность вносят уран-238 (радий-226) и торий-232. Приводится классификация редкоме-

талльно-редкоземельных руд и концентратов по удельной эффективной активности, концентратов обогащения месторождений различных геолого-промышленных типов. Описаны основные методы дезактивации редкометалльно-редкоземельных руд, концентратов и их переработки, а также методы удаления радионуклидов из растворов.

Описана электромембранная экстракция элементов из красного шлама. Приводится более подробное описание процесса, включая схемы. Указаны условия и описаны этапы процесса получения гипохлорита натрия с дальнейшей переработкой и извлечения основных соединений железа, титана, кальция и кремния. Также предложен еще один способ разделения редких, редкоземельных (РЗМ) и других ценных металлов с использованием мембранного электролиза на основе разности электрохимических потенциалов осаждения металлов. В этом процессе также на основе метода мембранного электролиза (электролиза и электродиализа) извлекаемые металлы под действием выбранного электрического потенциала раздельно осаждаются на катоде в виде покрытия или в виде порошка. Для каждого извлекаемого элемента в процессе циклирования предназначен специальный мембранный электролизер, к которому с помощью конкретного программного обеспечения прикладывается соответствующий потенциал, определяемый стандартным потенциалом данного элемента.

Также группой авторов описано использование плазмохимической и электроимпульсной технологий в переработке редкоземельных элементов. Приведены термодинамические расчеты для равновесной системы, схема переработки водных растворов солей РЗМ в плазмохимической установке. Описаны морфологические характеристики синтезированных оксидов церия, иттрия, циркония и титана.

Во втором разделе обобщены и систематизированы результаты исследований физических закономерностей и механизмов модификации изделий из черного и цветного литья оксидными частицами в нано- и ультрадисперсном состоянии, разработки на этой основе новых композиционных материалов, обладающих комплексом требуемых эксплуатационных свойств. Дано подробное описание модифицирующих смесей (МС), вводимых в расплав, представлены механизмы взаимодействия модифицирующей смеси с расплавом чугунов и формирование кристаллической структуры, а также описание структурообразования и механических свойств чугунов ИЧХ28Н2, СЧ25, ВЧ60 при введении модифицирующей смеси и, кроме того, структурообразование и механиче-

ские свойства стали 110Г13Л при введении модифицирующей смеси. Показано, что изменение структурного состояния (измельчение структурных составляющих, изменение объемной доли и локализации фаз и др.) во всех отливках после введения МС приводит к неоднозначному влиянию на физико-механические свойства. В чугунах ИЧХ28Н2 после введения МС происходит значительное повышение физико-химических характеристик: повышение плотности отливок, прочности, пластичности, микротвердости, износостойкости и коррозионной стойкости. В сером чугуне СЧ25 после введения МС происходит незначительное повышение плотности, прочности и износостойкости, при этом остаются неизменными твердость и пластичность. В высокопрочном чугуне ВЧ60 наблюдается повышение износостойкости со снижением предела прочности, при этом без изменения остаются плотность, твердость и пластичность. В стали 110Г13Л – незначительное повышение прочностных характеристик. В сплаве АК7ч временное сопротивление не меняется, а пластичность повышается в 2 раза.

С использованием количественных параметров структурно-фазового состояния ИЧХ28Н2, СЧ25 и ВЧ60 до и после введения МС была проведена количественная оценка влияния отдельных механизмов упрочнения (твердорастворного, зернограничного, дислокационного, дисперсионного, перлитного) на значение предела текучести и прочности исследуемых материалов. Установлено, что для чугунов ИЧХ28Н2, СЧ25 и ВЧ60 после введения МС вклады в механизмы упрочнения различны, что связано со структурообразованием в исследуемых чугунах. Выявлено, что для всех чугунов ИЧХ28Н2, СЧ25 и ВЧ60 после введения МС наблюдается упрочнение дисперсионными частицами и упрочнение, обусловленное уменьшением размера зерен.

Создание новых материалов и технологий их производства является одной из важных научных и прикладных задач физического материаловедения. В настоящее время актуальна проблема получения тугоплавких высокопрочных материалов, износостойких при повышенных температурах, имеющих достаточно высокую пластичность при комнатной температуре и способных работать в экстремальных условиях эксплуатации. Этому посвящена глава 5. Описан неизотермический синтез магнитных сплавов, МАХ-фаз и сложных оксидов на основе редкоземельных и редких металлов, представлены результаты по синтезу МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$ ,  $Nb_2AlC$ ,  $Ti_2AlN_{0,5}C_{0,5}$ , самораспространяющийся высокотемпературный синтез композиционных материалов на основе систем

Ti–Si–B, Ti–Al–B, синтез пигментов на основе алюмошпинелей элементов триады железа.

В настоящее время материалы, содержащие дисперсные оксиды редких и рассеянных элементов, широко используются в различных отраслях науки и техники для создания каталитических, фоточувствительных, тепло- и звукоизоляционных элементов. Одним из перспективных направлений является использование наночастиц оксидов РЗЭ в процессах водоочистки. Этому посвящена глава 6. Рассмотрены научные и прикладные аспекты процессов формирования, фазового состава, структуры, каталитических свойств наночастиц  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  и  $\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ , нанесенных на поверхность полипропиленового волокнистого носителя. Предложена методика формирования систем «наночастицы ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ ) – полипропиленовый волокнистый носитель» с использованием воздействия СВЧ-излучения фиксированной мощности, обеспечивающая нанесение активного компонента на поверхность носителя. Показана возможность использования наночастиц  $\text{TiO}_2$  и  $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ , нанесенных на полипропиленовый волокнистый носитель в фотохимических процессах очистки воды от хлорфеноксиуксусных гербицидов. По результатам флуоресцентного анализа выявлено, что разрушение МСРА (4-хлор-2-метилфеноксиуксусная кислота) наиболее эффективно происходит при использовании системы «гетеронаночастицы  $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$  – носитель», вследствие снижения, по сравнению с наночастицами  $\text{SnO}_2$  и  $\text{TiO}_2$ , эффективности рекомбинации генерированных УФ-излучением электронов и дырок, так как при фотовозбуждении гетеронаночастиц происходит переход электрона к  $\text{SnO}_2$ , в то время как дырка остается в  $\text{TiO}_2$ . Анализ данных проведенного спектрального анализа показал, что материал носителя и системы с нанесенными оксидными полупроводниковыми наночастицами не обладает сорбционными свойствами по отношению к молекулам МСРА. Следовательно, изменение спектральных характеристик водного раствора МСРА после выдержки и облучения связано только с фотопревращениями неадсорбированных молекул МСРА и образованием продуктов их фотодеградаци. Установлено, что полипропиленовый носитель, содержащий на поверхности не менее  $(2,1 \pm 1,3)$  мг/г наночастиц диоксида титана, в которых присутствуют одновременно фазы диоксида титана: анатазная и рутильная, позволяет производить антибактериальную очистку воды с высокой эффективностью. Предложенный способ формирования не требует дорогостоящего и энергозатратного оборудования для получения значительных коли-

честв фотокатализаторов на основе  $\text{TiO}_2$ . Это позволит снизить производственные затраты и широко использовать диоксид титана для фотокаталитической очистки воды от микробиологических загрязнений. Показано, что, кратковременное воздействие поля СВЧ-излучения на материал полипропиленовых волокон приводит к фазовому превращению в его объеме, которое вызвано диэлектрическим нагревом молекул воды, адсорбированных на поверхности волокон. В результате микроволновой обработки возрастает теплостойкость, увеличивается температура плавления, образуется однородная структура кристаллической фазы полипропиленового волокнистого носителя.

Раздел 3 посвящен использованию микроэлементов на основе редких и редкоземельных металлов в агробiotехнологиях. В настоящее время активное развитие получает применение в сельском хозяйстве экологически чистых органических и органоминеральных удобрений. Основным направлением улучшения агрохимических, механических характеристик почвы и увеличения плодородия почвы на современном этапе является поиск путей увеличения выхода гуматов с допированием микро- и макроэлементов, улучшения эксплуатационных характеристик (применение в сельском хозяйстве и в агробiotехнологиях). Повышение качественных характеристик продукции сельского хозяйства также является одним из требований обеспечения его конкурентоспособности. В соответствии с современными методами производства органоминеральных удобрений на основе торфа идет использование технологии высоковольтной импульсной электроразрядной диспергации. Каждое из этих направлений характеризуется заметной трудоемкостью и аппаратурными сложностями (создание среды при разных температурах, продолжительность и многократность процессов и др.).

Представлены результаты исследований влияния глауконита Бакчарского месторождения. Химический состав глауконитов охарактеризован по данным рентгеноспектральных анализов. Содержание минеральных микровключений в глауконитах Бакчарского месторождения представлено в виде минеральных вкраплений золота, некоторых минералов цветных и редких металлов, в частности самородного золота, барита, борнита, карролита, тетрадимита, висмита, треворита, нормандита, баритоцелестина, минеральных фаз стронция, цинка, олова. Размер включений варьирует от 0,1 до 10 мкм. Золото размером от 0,4 до 2,0 мкм с содержанием серебра до 13 %. Нормальный рост каждого растения, приводящий к образованию его окончательной формы, является резуль-

татом сложного взаимодействия внешних и внутренних факторов, связи роста с другими физиологическими функциями растения. В работе доказывают, что предпосевная обработка семян овса голозерного (*Avena puda* L.), сорт Тюменский, раствором глауконита в разной концентрации и внесение глауконита в почву в разных дозах оказывает стимулирующее влияние на ростовые процессы растения. Внесение глауконита в почву в высоких дозах оказало существенное влияние на агрохимические свойства темно-серых оподзоленных почв Томской области. Установлено, что овес характеризуется выраженной чувствительностью к предпосевной обработке раствором глауконита в разных концентрациях и к внесению глауконита в почву в разных дозах, что определяет специфику изменений ростовых процессов, в том числе повышение энергии прорастания, всхожести, роста растения, зеленой и сухой массы. Результаты работы демонстрируют, что глауконит Бакчарского месторождения является перспективным препаратом стимулирующего свойства для дальнейшего исследования с целью применения его в сельскохозяйственном секторе.

Чтобы использовать торфяные ресурсы в качестве сырьевого источника, необходимо выявить уровни содержания биофильных микроэлементов (для создания препаратов профилактического и оздоровительного назначения, для ветеринарных препаратов), а также токсичных металлов. Специалисты торфяной отрасли определяют торф как полуколлоидно-высокомолекулярную полифракционную гидрофильную систему с признаками полиэлектролитов и микромозаичной гетерогенности. В исследуемых горных торфах Центрального, Восточного и Юго-Восточного Алтая выявлено достаточно большое содержание микроэлементов Mn, Zn и Cu; менее 0,05 мг/кг содержится Co и Cd и менее 0,01 мг/кг составляет содержание Mo. Исследуемые торфы Горного Алтая являются чистыми относительно Cd, независимо от их расположения и генезиса. В исследуемых торфах на фоне низкого количества свинца в торфяных залежах зафиксированы локальные загрязнения поверхностных слоев торфа (0–30 см) до уровней 36,1–62,4 мг/кг. Исследования описаны в главе 9.

Раздел 4 посвящен применению математических методов для моделирования материалов на основе редкоземельных элементов. На основе их анализа описан наиболее подходящий и реализован в программном комплексе моделирования материалов. Структура комплекса была построена исходя их критериев максимальной функциональности и удоб-



---

ства использования. С целью подтверждения работоспособности комплекса было проведено два расчетных эксперимента по определению зонной структуры диоксидов церия и титана. В эксперименте принимали участие все компоненты программного комплекса. На основе результатов расчетов, которые в первом эксперименте сопровождались малой погрешностью, а во втором полностью располагались в диапазоне экспериментальных данных, можно сделать вывод о работоспособности комплекса и всех его составляющих блоков и модулей.

Авторами К. Байтасовым, Б. Дуйсебаевым, М. Байтасовым предлагается новый инструмент для взвешенной и в то же время гибкой и опережающей, именно форсайтной, инновационной политики – матричный подход к планированию и прогнозу развития индустриальной корпорации. Это специально разработанный для крупных добывающих компаний или холдингов интеллектуальный продукт, имеющий потенциал широкого использования на уровне страны и других компаний-аналогов. С его помощью потребители, в общем случае руководители и менеджеры многопрофильных холдингов либо министерств и ведомств, регионов, могут эффективно, наглядно и просто формировать и управлять программами и портфелями текущих и новых научных и индустриальных проектов. В конкретном представленном случае продукт разработан и визуализирован для инновационной деятельности крупного, добывающего редкие металлы холдинга, направленной на диверсификацию основных бизнесов. Подробное описание приводится в тексте монографии.

## ВВЕДЕНИЕ

Отрасль редкоземельных и переходных металлов и материалов на их основе в Российской Федерации начинает ускоренное развитие. Так, в июле 2016 г. В.В. Путин на совещании, посвященном развитию отрасли редкоземельных металлов, заявил следующее: «...Словом, решение многих задач в сфере экономики и сфере безопасности связано с эффективной работой промышленности редкоземельных металлов...». В 2013 г. для поддержки отрасли была запущена специальная подпрограмма в рамках госпрограммы развития промышленности, в текущем году завершается ее первый этап. Его итогом должно стать появление научно-технического задела – патентов, ноу-хау, технологий, прошедших опытную отработку и готовых к коммерциализации. За четыре года на эти цели из федерального бюджета было выделено более 4,2 млрд рублей, еще 4,6 млрд рублей привлечены из внебюджетных источников.

Развитие информационных технологий связи, наукоемкого приборостроения, необходимость создания экологически чистых технологий, альтернативных источников энергии на современном этапе обеспечили увеличение потребностей в *редкоземельных металлах* (РЗМ), которые сегодня являются главными составляющими при создании новых материалов. Использование материалов, созданных с применением РЗМ, определяет технический уровень, достигнутый той или иной отраслью промышленности и страной в целом. Без применения РЗМ невозможно развитие электроники, связи, космической и военной техники. С каждым годом растет количество сфер применения индивидуальных РЗМ. Темпы роста потребления РЗМ на ближайшее время прогнозируются на уровне 10–15 % в год, а в некоторых областях промышленности и выше, опережая по данному показателю традиционные материалы.

РЗМ включают лантаноиды (вместе с лантаном) и иттрий, которые разделяют на две группы: цериевую и иттриевую. РЗМ довольно широко распространены в земной коре, но редко находятся в концентрациях, пригодных для их добычи. Основными промышленными источниками РЗМ являются: бастнезит ( $\text{CeCO}_3\text{F}$ , 75 % РЗМ); монацит ( $\text{CePO}_4$ , 65 % РЗМ). На их долю приходится ~ 70 % всех запасов РЗМ. В природе при-

сутствуют ~ 70 минералов РЗМ: оксидов, фторидов, силикатов, фосфатов, карбонатов и их смесей – комплексные месторождения (монацит, бастнезит, апатит, ксенотим, лопарит и др). Наибольшая часть мировых запасов РЗМ находится в Китае и США (бастнезит), также известны бастнезитные месторождения Вьетнама и Афганистана. Монацитовые месторождения сконцентрированы в Австралии, Бразилии, Китае, Индии, Малайзии, ЮАР, Шри-Ланке, Таиланде, США. Монацит обычно встречается по берегам рек, озер и морей и является смесью солей церия, лантана, иттрия, фосфорной кислоты и др. Значительные запасы монацита имеются в Бразильских и Каролинских (США) месторождениях. Остальные ресурсы РЗМ сконцентрированы в месторождениях ксенотима, ионно-абсорбционных глин, лопарита, фосфоритов, апатитов, вторичного монацита, эвдиалита и др.

В России создана и имеется надежная минерально-сырьевая база редкоземельных металлов, подготовленная к освоению. Запасы большинства редких металлов в месторождениях по объему достаточны для полного обеспечения существующих и перспективных внутренних потребностей России.

Освоение и получение редких металлов на предприятиях, расположенных на территории России, имеют стратегическое значение, ликвидируя зависимость предприятий военно-промышленного комплекса и процесса модернизации наукоемких отраслей промышленности от импортных поставок из-за рубежа. Это обуславливает ведущую роль государства в освоении редкоземельных месторождений на всех этапах производства, как в экономической сфере – частно-государственное партнерство, так и в правовой – путем создания правовых механизмов защиты отечественных предприятий. Зарубежный опыт показывает, что кардинальное изменение положения в редкометалльной отрасли возможно только при активном участии государства.

Для написания книги был привлечен большой коллектив специалистов, имеющих многолетний опыт научных исследований и практической работы в соответствующих областях. Большая часть материала, представленная в книге, является результатом экспериментальных работ, проводимых на базе научных и производственных организаций.

## Глава 2

### **Электромембранное извлечение элементов из красного шлама**

***Г.А. Вардан, М.А. Казарян,  
Г.Г. Карамян, Г.А. Мартоян***

Извлечение полезных и токсичных элементов из промышленных отходов является актуальной задачей. В процессе производства алюминия из бокситовых руд образуется большое количество отходов в виде красного шлама [1]. Как следует из [2], мировое производство алюминия в 2016 г. составит 60 млн т, что, в зависимости от количества бокситов и их переработки, приведет к общему количеству отходов в виде красного шлама от 60 до 120 млн т. Его химический состав варьирует в зависимости от состава и свойств выщелачиваемого боксита. Как правило, красный шлам хранится в больших резервуарах или в хвостохранилищах, которые занимают огромные площади, пригодные для сельского хозяйства, загрязняя почву и грунтовые воды. Кроме того, его хранение требует соблюдения строгих мер, поскольку красный шлам является очень токсичным и агрессивным соединением.

Для нахождения применений красного шлама проводятся исследования. Так, например, от 2 до 3 млн т ежегодно используется в производстве цемента [3], в дорожном строительстве [4] и в качестве сырья для производства металлического железа [5]. Потенциальные области применения включают в себя производство дешевого бетона [6] и кирпича [7]. Однако при таком способе утилизации теряется большое количество полезных металлов и соединений. Кроме того, токсичные элементы остаются в продуктах производства строительных материалов и могут вымываться дождями и снегом, вызывая загрязнение окружающей среды.

В [8] были представлены основы разработанной авторами электромембранной технологии для переработки красного шлама с извлечени-

ем ценных элементов. В настоящей работе приводится более подробное описание процесса, в том числе схемы. В предлагаемой технологии основная роль принадлежит процессу электродиализа. Недавно австралийские исследователи из CSIRO's Mineral Resources Flagship также использовали процесс электродиализа для переработки красного шлама [9]. Он выщелачивался серной кислотой, и в конце процесса полученный  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  разделяли на  $\text{NaOH}$  и серную кислоту, которую снова использовали для выщелачивания. Однако авторы технологии смогли извлечь из шлама лишь кремнезем, а другие соединения оставались в отходах. В отличие от нашего подхода они рассматривали в основном задачу нейтрализации шлама, а не процесс извлечения остальных ценных элементов. К тому же, стоимость полученных  $\text{NaOH}$  и  $\text{H}_2\text{SO}_4$  была выше их коммерческой цены. Предлагаемая технология основана на совершенно другом подходе.

Образцы красного шлама были взяты из отходов переработки глинозема по процессу Байера с заводов Урала и Ирана. В табл. 2.1 и 2.2 приведен средний химический состав основных и примесных металлов.

Оба образца имели содержание влаги 40–60 %, щелочность (pH) – 10–13 и дисперсность – менее 5 мкм (80 %-я фракция). Как видно из таблицы, состав обоих образцов примерно одинаков. Поскольку красный шлам содержит большое количество железа и алюминия, кажется, что было бы желательнее превратить его в источник ценного вторичного сырья. Но переработка красного шлама в неразделенной форме является трудной задачей, так как он содержит слишком много оксида железа, чтобы служить в качестве источника алюминия, и не может быть использован в качестве железной руды, поскольку содержит слишком много оксида алюминия. Кроме того, в нем есть также примеси серы, фосфора, кальция, диоксида кремния, оксида титана, поэтому необходимо найти способ обработки, основанный на значительном различии в химических свойствах этих соединений, и использовать его для их разделения или найти способ применить эту смесь в качестве сырья для производства коммерческих или промежуточных продуктов.

Анализы были выполнены с помощью масс-спектрометра ELAN 9000 ICP, а для измерения размера частиц использовался оптический микроскоп высокого разрешения.

Как видно из таблиц, состав основных металлов в обоих образцах примерно одинаков. Содержание редких и редкоземельных элементов приведено в табл. 2.3 и 2.4.

Т а б л и ц а 2.1

**Химический состав красного шлама с Уральского завода, вес. %**

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	S	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O
40–55	8–11	5–15	14–16	0,5–1,4	2–5	до 2	0,2–0,5	до 2

Т а б л и ц а 2.2

**Химический состав красного шлама из Иранского завода, вес. %**

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	S	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O
44 – 46	8–11	8–9,5	13–18	0,2–1,6	4–5	3,6	0,2–0,65	2,5–6,5

Т а б л и ц а 2.3

**Состав примесных элементов в красном шламе Уральского завода**

Элемент	Содержание, г/кг	Элемент	Содержание, г/кг
Sc	0,025060	Cu	0,031695
Ti	31,446005	Zn	0,048848
V	0,566959	Ge	0,004281
Cr	0,255851	Ga	0,035668
Mn	0,226875	As	0,027688
Fe	78,244009	Y	0,053365
Co	0,046470	Mo	0,029679
Ni	0,086609	Cd	0,000808

Т а б л и ц а 2.4

**Состав примесных элементов в красном шламе Иранского завода**

Элемент	Содержание, г/кг	Элемент	Содержание, г/кг
Sc	0,019358	Cu	0,068480
Ti	24,298205	Zn	0,235932
V	0,277970	Ge	0,005525
Cr	0,151777	Ga	0,030868
Mn	2,974695	As	0,031339
Fe	78,037918	Y	0,001937
Co	0,078870	Mo	0,002424
Ni	0,303276	Cd	0,001026

Видно, что кроме ценных элементов красный шлам содержит большое количество РЗЭ (Sc и Y). Эксперименты по экстракции полезных соединений проводились на собственной лабораторной установке, позволяющей изменять рабочие режимы и устанавливать дополнительные аппараты. Установка состояла из различных реакторов, резервуаров, насосов, электрохимических аппаратов (электролизеров и электродиализаторов), сушилок и всех необходимых компонентов. Основной принцип технологии основан на выщелачивании красного шлама сильным окислителем – гипохлоритом натрия.

В результате проведенных исследований нам удалось успешно выщелочить красный шлам и разделить растворенную и нерастворенную части. Щелочность последней уже была снижена до нейтральных значений 7–9. Получены водные концентраты редких, редкоземельных и других ценных элементов. Растворы периодически анализировались с помощью масс-спектрометра, и определялось время завершения процесса. Одновременно анализировался химический состав обработанного красного шлама с помощью вышеуказанного оборудования (табл. 2.5 и 2.6). Нерастворимая часть была переработана с помощью комплексных схем (см. рис. 2.2 – 2.5).

Как показано в табл. 2.5 и 2.6, состав полезных элементов в красном шламе значительно уменьшается после выщелачивания, что говорит о том, что большинство из них концентрируются в растворе. Например, количество скандия в шламе уменьшается в 150 раз. На основании проведенных экспериментов был разработан крупномасштабный модуль, диаграмма которого показана на рис. 2.1. Количество элементов и их параметры выбраны таким образом, чтобы обеспечить продуктивность переработки красного шлама в количестве 5 т/ч.

Таблица 2.5

**Состав примесных элементов после переработки красного шлама  
Уральского завода**

Элемент	Содержание, мг/кг	Элемент	Содержание, мг/кг
Sc	0.092628	Cu	1.248894
Ti	0.989895	Zn	1.497201
V	2.831367	Ge	0.003759
Cr	0.363909	Ga	0.864186
Mn	0.011424	As	0.714249
Fe	1.405755	Y	0.001866
Co	0.002025	Mo	1.217775

Т а б л и ц а 2 . 6

**Состав примесных элементов после переработки красного шлама  
Иранского завода**

Элемент	Содержание, мг/кг	Элемент	Содержание, мг/кг
Sc	0.136449	Cu	2.043684
Ti	1.462806	Zn	1.629492
V	29.265636	Ge	0.003486
Cr	0.636222	Ga	0.226401
Mn	0.134481	As	1.483803
Fe	5.904255	Y	0.004251
Co	0.004638	Mo	0.092148
Ni	0.022359	Cd	0.000561

Как показано на рис. 2.1, процесс переработки начинается с заполнения реактора с мешалкой № 1 красным шламом, а также чистой водой и рассчитанным количеством гипохлорита натрия. Общая схема показывает маршруты извлечения глинозема и растворимых соединений редкоземельных элементов, а также соединений железа, титана, кальция и кремния. Гипохлорит натрия готовится в специальной установке, изображенной на рис. 2.2. После мягкого выщелачивания красного шлама нерастворенные остатки ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Ca(OH)_2$ ,  $TiO_2$  и другие соединения) перемещают в бак А. Кроме того, раствор сульфата железа и алюминаты натрия из бака В (см. рис. 2.4) добавляют в бак А. В результате реакций, протекающих в баке, и после обработки в пресс-фильтре образуется смесь оксидов ( $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$ ,  $Ca(OH)_2$ ,  $TiO_2$ ) и направляется в процесс С, в то время как раствор алюмината натрия осаждают газом  $CO_2$  и после фильтрования полученный гидроксид алюминия сушат с образованием  $Al_2O_3$ .

Растворенная часть красного шлама, содержащая примесные элементы, включая редкоземельные, подвергается специальной активации кавитационным насосом, что является ноу-хау авторов. Затем смесь перерабатывают в системе мембранных электролизеров (верхняя часть), после чего сумма металлов накапливается в специальном баке, а остаток направляется в систему электродиализаторов (нижняя часть), где раствор  $NaOH$  разделяется в баке В и возвращается в бак А.

Диаграмма, представляющая производство гипохлорита натрия, показана на рис. 2.2.



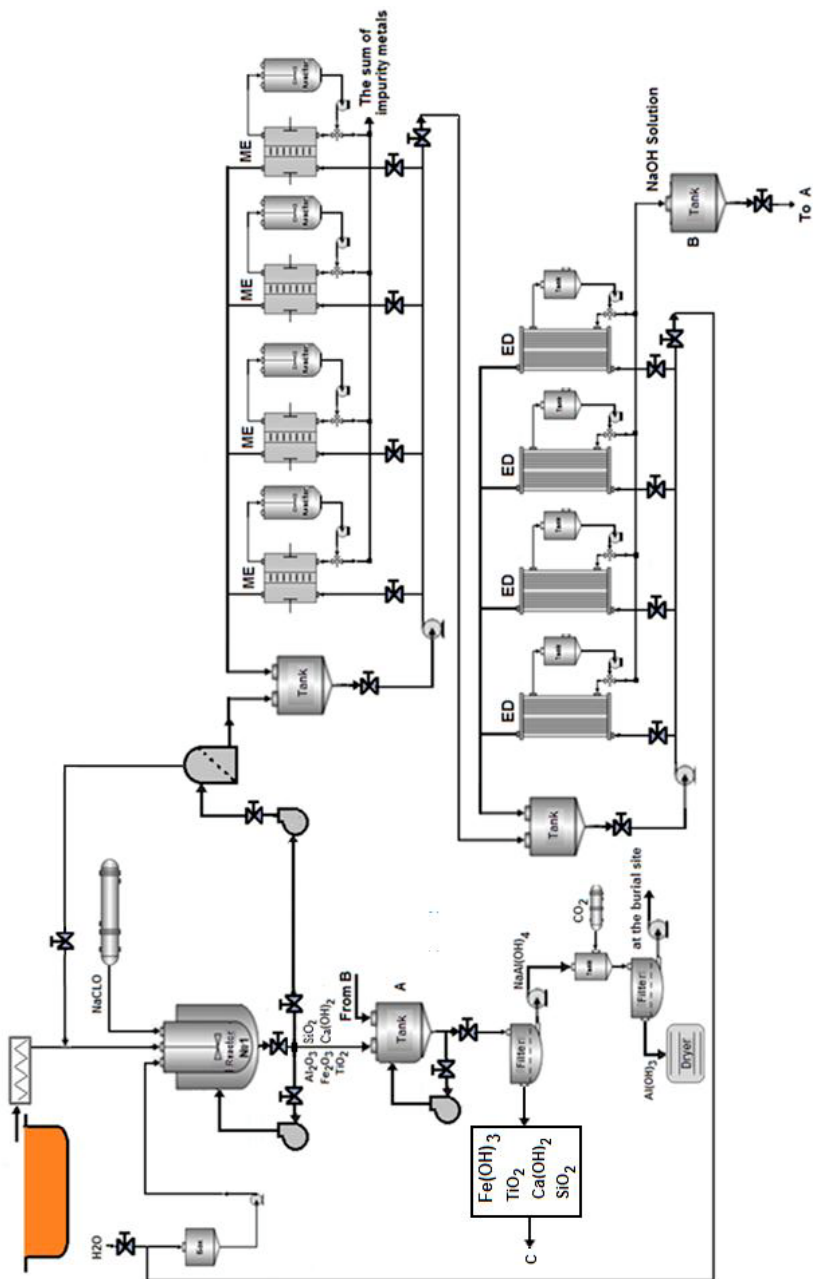


Рис. 2.1. Общая схема переработки красного шлама

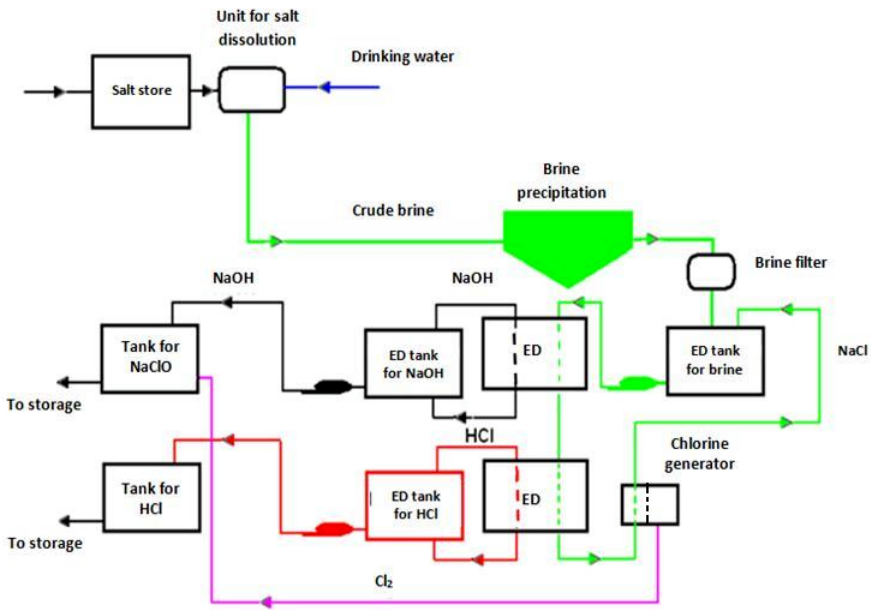


Рис. 2.2. Схема получения гипохлорита натрия с помощью электромембранной технологии

Технология производства гипохлорита натрия ( $\text{NaClO}$ ) на месте основана на новой технологии электродиализа хлорида натрия. Сначала соль растворяется чистой водой в специальном реакторе, рассол направляется в реактор, где осаждаются нерастворенные примеси, и раствор дополнительно очищается с помощью фильтра, а затем поступает в специальный резервуар. Из этого бака раствор закачивается в электродиализатор и под действием электрического потенциала диссоциирует на ионы  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ , которые разделяются ионообменными мембранами, после чего образуется гидроксид натрия и хлорсодержащий газ. Гидроксид натрия накапливается в специальном баке и перекачивается в генератор  $\text{NaClO}$ . Газообразный хлор перемещается в другой (нижний) электродиализатор, где формируются соляная кислота и хлорид натрия. Хлор производится в специальном генераторе и перекачивается в бак для гипохлорита натрия, а полученная чистая соляная кислота хранится в баке для  $\text{HCl}$  для различных областей применения. Как известно, известный способ производства  $\text{NaClO}$  основан на смешивании раствора

NaOH с газообразным хлором. Однако предлагаемый новый метод позволяет производить дополнительно HCl. Согласно этой схеме, если необходимо получение соляной кислоты, то выключается источник питания генератора хлора и включается электродиализатор для производства HCl. В случае, когда нужно получить NaClO, выполняется противоположная операция, то есть выключается электродиализатор для производства HCl и включается генератор хлора.

На рис. 2.3 показана схема дальнейшей переработки и извлечения основных соединений железа, титана, кальция и кремния. Здесь осадок, образованный в реакторе С, переносится в перемешивающий реактор № 2, куда добавляють очищенную воду и серную кислоту. После обработки образуются титанилсульфат ( $\text{TiOSO}_4$ ) и сульфат кальция (гипс). Последний вместе с диоксидом кремния отделяют для использования в качестве строительных материалов, в то время как титанилсульфат направляется на дальнейшую обработку с производством диоксида титана и серной кислоты (см. также рис. 2.4). Раствор сульфата железа из реактора № 2 через фильтр перемещается в систему электродиализаторов, где он концентрируется и может быть использован в качестве коммерческого продукта или превращен в оксид железа, а затем в металлическое железо.

Этот технологический процесс начинается с сушки гидроксидов металлов в печи и их прохождения через магнитный сепаратор, где извлекается магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Затем оставшаяся часть обрабатывается с помощью способа, представленного на рис. 2.4. Здесь раствор титанилсульфата подвергают процессу электродиализа с выделением серной кислоты и диоксида титана. Таким образом, достигается полное разделение основных полезных соединений.

Что касается остальной растворенной части красного шлама, содержащего в сумме примесные металлы (см. табл. 2.2), то они могут быть обработаны в другом блоке и получены отдельные элементы.

Как показано в табл. 2.3 – 2.6, состав полезных элементов в красном шламе значительно уменьшается после переработки, что означает, что большинство из них перешло в раствор.

Последующее разделение этих элементов в виде отдельных чистых металлов является предметом будущих исследований, но мы считаем необходимым описать возможный способ такой экстракции. Работы в этом направлении проводятся в различных организациях. Например, в работе [10] описан пирометаллургический метод, основанный на сокращении красного шлама путем плавки с получением шлака, богатого

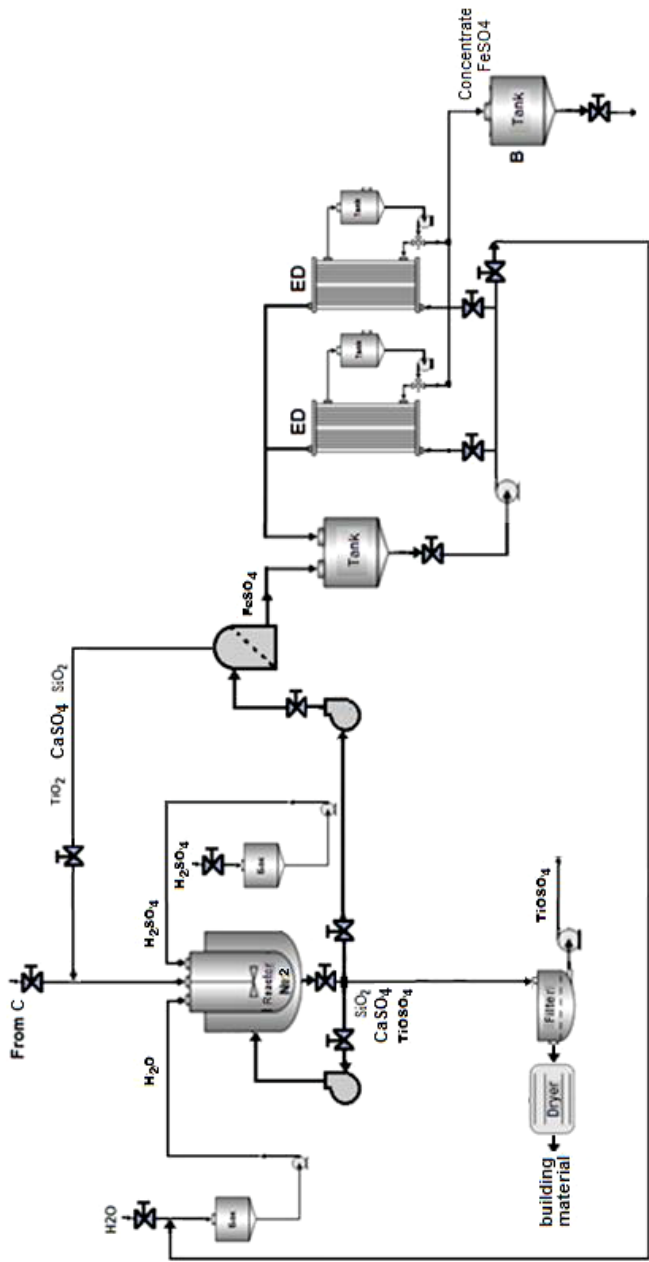


Рис. 2.3. Схема переработки соединений, полученных в процессе С

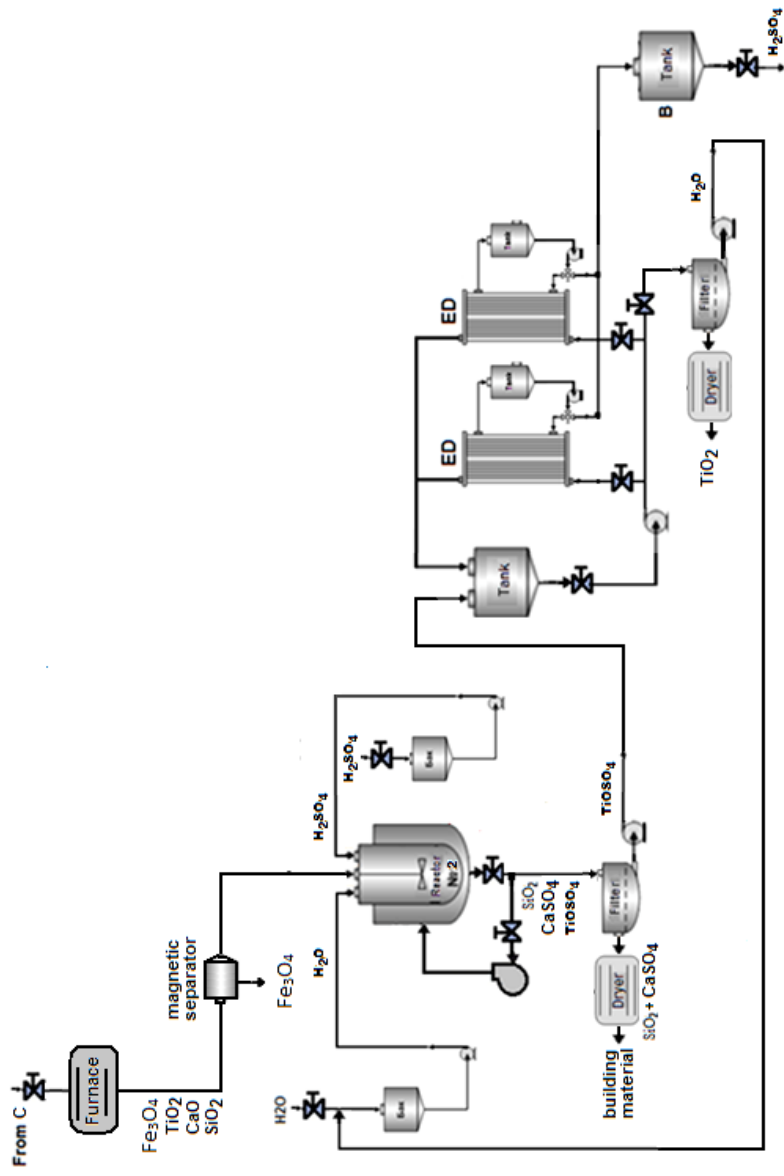


Рис. 2.4. Другая схема (вариант) переработки основных металлов, полученных в процессе С

ценными элементами, с последующим растворением шлама в соответствующих растворах. Затем происходит его плавка с разделением твердых и жидких фракций и сложные процессы охлаждения и рекристаллизации.

Другой подход к разделению РЗЭ на основе каскада центробежных экстракторов разработан ООО «ЛИТ» группы компаний «Скайград» (Москва) [11]. Подобные технологии извлечения скандия разрабатываются также в НИТУ МИСиС [12].

Нами предложен еще один способ разделения редких, редкоземельных и других ценных металлов с использованием мембранного электролиза на основе разности электрохимических потенциалов осаждения металлов [13].

В этом процессе, также на основе метода мембранного электролиза (электролиза и электродиализа), извлекаемые металлы под действием выбранного электрического потенциала будут раздельно осаждаться на катоде в виде покрытия или в виде порошка. Для каждого извлекаемого элемента в процессе циклирования предназначен специальный мембранный электролизер, и с помощью конкретного программного обеспечения к каждому электролизеру прикладывается соответствующий потенциал, определяемый стандартным потенциалом данного элемента. В этом случае все остальные электролизеры должны быть отключены. Если некоторые элементы не извлекаются в одном проходе, они будут разделены в следующем. Процесс циклирования продолжается до тех пор, пока не будут извлечены все элементы.

Таким образом, предлагаемая технология переработки красного шлама позволяет:

1. Получить ценные соединения металлов, содержащихся в красном шламе, такие, как  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ , Fe,  $FeSO_4$ ,  $Ca(OH)_2$ ,  $CaSO_4$ ,  $TiO_2$  и другие.

2. Получить важные химические вещества, такие как  $NaClO$ ,  $NaOH$  и  $HCl$ , которые могут быть использованы в процессе переработки или в качестве вторичных коммерческих продуктов.

3. Извлечь ценные примесные редкие и редкоземельные элементы. В то же время экстрагировать отдельно и нейтрализовать токсичные элементы, которые могут содержаться в красном шламе, такие как As, Hg и т.д.

Технология является экономически выгодной и экологически безопасной, поскольку она осуществляется в режиме замкнутого цикла.

## Список литературы

1. *Ritters S.K.* Making the most of red mud // *Chemical and Engineering News*. – 2014. – V. 92. – No. 8. – P. 33.
2. Информация на сайте: [http://www.aluminiumleader.com/economics/how\\_aluminium\\_market\\_works](http://www.aluminiumleader.com/economics/how_aluminium_market_works).
3. *Pontikes Y. and Angelopoulos G.N.* Bauxite residue in Cement and cementious materials // *Resourc. Conserv. Recycl.* – 2013. – V. 73. – P. 53.
4. *Biswas W.K. and Cooling D.J.* Sustainability Assessment of Red Sand<sup>TM</sup> as a substitute for Virgin Sand and Crushed Limestone // *J. Ind. Ecology*. – 2013. – V. 17. – No. 5. – P. 756.
5. *Schmitz C.* Red Mud Disposal in Handbook of aluminium recycling. – Vulkan-Verlag GmbH, 2006. – P. 18.
6. *Liu W., Yang J., Xiao B.* Review on treatment and utilization of bauxite residues in China // *Int. J. Miner. Process.* – 2009. – V. 93. – P. 220.
7. *Garg H. Yadav.* Study of Red Mud as an Alternative Building Material for Interlocking Block Manufacturing in Construction Industry // *Int. J. Mat. Sci. Engineer.* – 2015. – V. 3. – No. 4. – P. 295.
8. *Martoyan G.A., Karamyan G.G. and Vardan G.A.* New technology of extracting the amount of rare earth metals from the red mud, REES-2015 IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V. 112.
9. *Smith P.* Waste treatment: Aluminium future out of mud // *Resourceful*. – 2015. – No. 7. – P. 6.
10. *Голубев А.А. и Гудим Ю.А.* Способ пирометаллургической переработки красных шламов // Патент WO 2013070121 A1. – 2013.
11. *Абрамов А.М., Соболев Ю.Б., Галиева Ж.Н., Волобуев О.И., Солодовников А.С. и Ячменев А.А.* Организация производства РЗМ при комплексной переработке фосфогипса. Актуальные вопросы // Всероссийская конференция по редкоземельным материалам «Актуальные вопросы добычи, производства и применения редкоземельных элементов в России. РЗМ-2013». – Томск, 2013
12. Информация на сайте: [http://strf.ru/material.aspx?CatalogId=222&d\\_no=88685#VgJYtX3CaKI](http://strf.ru/material.aspx?CatalogId=222&d_no=88685#VgJYtX3CaKI).
13. *Guiragossian Z.G., Martoyan G.A., Intsheyan S.G., Nalbandyan G.G., and Tonikyan S.G.* The extraction of heavy metals by means of a new electrolytic method // *Proc. of WM'04 Conf.* – Tucson, 2004. – P. 4304.

## Глава 3

# **Использование плазмохимической и электроимпульсной технологий в переработке редкоземельных элементов**

*Ли Хунда, С.А. Сосновский,  
В.И. Сачков, Е.В. Обходская,  
М.А. Казарян, А.А. Луканин*

В настоящее время на основе редкоземельных металлов (РЗМ) развиваются высокотехнологичные современные производства электронной и радиотехнической продукции, приборостроения, полупроводниковых материалов, используемых в ядерной энергетике, композиционных материалах. Разработка новых методов синтеза современных материалов с заданными функциональными свойствами является актуальной задачей, что обусловлено устойчивой тенденцией расширения сфер применения новых материалов последние 10–15 лет.

Существенными условиями, определяющими высокие показатели функциональных материалов и изделий на их основе, являются достижение однородности химического и фазового составов, а также однородного морфологического строения синтезированных продуктов. Большое внимание уделяется синтезу мелкодисперсных, особенно наноразмерных материалов и наноструктурированных пленок, в том числе на основе РЗМ.

На функциональные характеристики поликристаллических материалов большое влияние оказывает наличие примесей, которые концентрируются, как правило, на границах зерен. В большинстве случаев используемые для синтеза особо чистые реактивы имеют высокую стоимость или требуется предварительная специальная очистка применяемых веществ. Важным требованием, предъявляемым к технологическим процессам получения функциональных материалов, является использо-



А главное – сопровождение проекта со стороны науки и бизнеса на всем протяжении цикла разработки, производства и сбыта инновационной продукции.

Сводные агрегированные данные по проводимым в РК НИОКР и ТЭО в сфере РнРМ можно представить в виде иллюстративной таблицы:

Таблица 11.2

НИОКР и ТЭО в РК по тематикам РМ и РЗМ

Та. Nb конденсаторы		Та. Re лопатки турбин		Mo.W суперсплавы	
Nb-Ti Сверх проводники		Ве рентген- окна		Кварц солнечные батареи	
РЗМ батареи гибридных авто		РЗМ авто- катализаторы		РЗМ ЖК- экраны	
РЗМ магниты		РЗМ Аккумуляторы для бытовой электроники		РЗМ электронные носители информации	

#### 4. Резюме по предлагаемому продукту

Продукт (матрица) направлен на обеспечение устойчивого и сбалансированного развития и повышение конкурентоспособности крупной добывающей компании или холдинга путем диверсификации его основной деятельности.

Основным приоритетом политики диверсификации станет подготовка и реализация крупных инвестиционных проектов в области редких и редкоземельных металлов с мультипликативной стимуляцией новых возможностей высокотехнологичных переделов для отечественных малых и средних предприятий через системное расширение местного содержания.

В целях формирования основ полноценной высокотехнологичной отрасли в матрице предусмотрены меры по расширению сырьевой базы, разработке и внедрению новых технологий, развитию научных исследований и инновационных разработок и созданию отечественной системы подготовки высококвалифицированных кадров.

Задача создания конкурентоспособной высокотехнологичной индустрии РЗМ в Казахстане наилучшим образом может быть решена именно в увязке с опережающим развитием уранового и ядерного комплексов и параллельным развитием производств широкого перечня востребованных в мире редких и цветных металлов. Непосредственно РЗМ должны извлекаться попутно с другими ценными металлами, что позволит обеспечить конкурентоспособность казахстанской редкоземельной и редкометалльной продукции при сохранении ведущей роли урановой подотрасли.

Таблица 11.3

## ФД-матрица для Республики Казахстан в области РМ и РЗМ

Переделы	Перспективные	Планируемые	Действующие
Хай-тек	ЖК-экраны <b>211</b>	Солнечные батареи <b>311</b>	Nb-Ti Сверхпроводники <b>321</b>
Изделия и сплавы	Детали электронных носителей информации <b>211</b>	Ta, Re Лопатки турбин <b>311</b>	Mo, W Суперсплавы <b>321</b>
Изделия и порошки	Батареи гибридных авто <b>211</b>	Катализаторы <b>311</b>	Ta-порошки для конденсаторов <b>332</b>
Сплавы, порошки	Аккумуляторы для бытовой электроники <b>211</b>	РЗМ Магниты <b>311</b>	Be Рентген-окна <b>332</b>
Сырье	ТМО, руды	Урановые растворы и хвосты	Th-РЗМ, Be, Ta-Nb Концентраты

## Заключение

Использование такой матричной модели будет способствовать обоснованным стратегическим изменениям компании, переходу от решения отдельных проблем к комплексным преобразованиям. Такой подход позволит опережать события, построить эффективные стратегии развития и план по их реализации, эффективно управлять, а со временем накопить ресурсы, технологии и кадры для технологического рывка на рынке РЗМ.

Разработанный интеллектуальный продукт представляет собой ценный инструмент для эффективного управления инновационной и производственной деятельностью многоотраслевых холдингов, а также для формирования и мониторинга комплексных многосторонних государственных программ

## Список литературы

1. *Foresight as a Strategic Long-Term Planning Tool for Developing Countries*. – Singapore, 2014
2. *Slack N. The Importance-Performance Matrix as a Determinant of Improvement Priority*. – Warwick Business School, UK, 1994.
3. *Bock F., Hellweg M., Lube M.-M. A Strategy for Supporting Innovation and Growth in Times of High Uncertainty*. – Arthur D. Little, 1998.
4. *Thompson A.J., Strickland A.J. Strategic Management: Concepts and Cases*. – 3 ed. – Plano, Tex.: Business Publications, 1984.
5. *Radder L. and Louw L. The SPACE Matrix: A tool for calibrating competition // Long Range Planning*. – 1998. – V. 31. – No. 4. – P. 549–559.
6. *Брюс Д. Хендерсен Продуктовый портфель // Бостонская консалтинговая группа BCG Review: Дайджест*. – М.: Бостонская консалтинговая группа, 2008. – Вып. 02.
7. *Watts G., Cope J., Hulme M. Ansoff's Matrix, Pain and Gain*. – Lancaster, UK: Lancaster University Management School, 1998.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**АВРАМЧИК Александр Николаевич**, научный сотрудник НИ Отдела структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН, Специалист в области металлотермии и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза металлических, керамических и композиционных материалов.

**АНДРИЕНКО Олег Семенович**, канд. хим. наук, старший научный сотрудник Инновационно-технологического центра Сибирского физико-технического института Томского государственного университета (г. Томск), старший научный сотрудник Института оптики атмосферы СО РАН (г. Томск). Специалист в области химической технологии редких, рассеянных и радиоактивных элементов и материалов на их основе, фотохимии, катализа, органической химии и органического синтеза фторорганических веществ, биотехнологий.

**АНУФРИЕВА Светлана Ивановна**, канд. хим. наук, заведующая технологическим отделом Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского» Специалист в области химической технологии редких и рассеянных элементов, переработки руд и рудных материалов.

**АФНАСЬЕВ Николай Иванович**, докт. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией гетерогенных металлических систем НИ Отдела структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН.

**БАЙТАСОВ Калилалло Маркисович**, канд. экон. наук, проектный менеджер IPMA, академик МАИН. Специалист в области экономики и менеджмента, управления промышленными и IT-проектами. Сотрудник ТОО «Универсальное конструкторское технологическое бюро», г. Алматы.

**БАЙТАСОВ Маркис Ахметович**, специалист в области экономики и менеджмента. Сотрудник ТОО «Универсальное конструкторское технологическое бюро», г. Алматы.

**ВАРДАН Геворг Анушанович**, аспирант, магистр, закончил Ереванский политехнический институт по специальности материаловедение и металлургия.

**ДАЙБОВА Елена Борисовна**, канд. хим. наук, заведующая лабораторно-аналитическим центром Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирского федерального научного центра агробιοтехнологий Российской академии наук (СибНИИС-ХиТ – филиал СФНЦА РАН) (г. Томск). Специалист в области физической химии, фотокатализа, получения органоминеральных удобрений, переработки торфа.

**ДЕМЕНТ Тарас Валерьевич**, магистр материаловедения, младший научный сотрудник лаборатории трансляционной и клеточной биохимии Томского государственного университета (г. Томск), аспирант 3-го года обучения Томского государственного архитектурно-строительного университета (г. Томск)

**ДУЙСЕБАЕВ Бауржан Оразович**, докт. техн. наук, советник председателя правления АО «Волковгеология», академик Национальной академии горных наук Республики Казахстан (РК). Руководитель ряда профильных государственных научных центров и институтов РК. Специалист в области химической технологии редких и рассеянных элементов, металлургических процессов и производств.

**ЗМЕЕВА Ольга Николаевна**, научный сотрудник лаборатории биотехнологии и биополимеров химического факультета Томского государственного университета (г. Томск). Специалист в области биологии, физиологии, экологии, агротехнологии, получения экомелиарантов, получения БАВ, переработки растительного сырья.

**КАЗАНЦЕВА Людмила Алексеевна**, аспирантка кафедры неорганической химии химического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (г. Томск).

**КАЗАРЯН Мишик Айразатович**, докт. физ.-мат. наук, профессор, лауреат Государственной премии СССР, Иностраный член Национальной академии наук Республики Армения, академик Академии инженерных наук имени А.М. Прохорова, заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (г. Москва). Выдающийся ученый, крупный специалист в области физики лазеров, физической оптики, спектроскопии, люминесценции, разделении

изотопов, синтезе новых материалов, нанотехнологии, радиофизики, акустики, медицинской физики.

**КАЙГОРОДОВ Евгений Владимирович**, канд. физ.-мат. наук, заведующий комплексной лабораторией фундаментальной и прикладной математики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Горно-Алтайский государственный университет». Область научных интересов: теория абелевых групп и их колец эндоморфизмов; хопфовы группы, кольца и модули, сепарабельные и векторные абелевы группы, математические методы в химии и химической технологии, приложения теории групп и представлений групп к кристаллографии, кристаллохимии и стереохимии, численные и статистические методы в аналитической химии, теория нечетких множеств и ее приложения к коллоидной химии.

**КАЙЗЕР Марина Ивановна**, канд. биол. наук, заведующая кафедрой химии и МПХ Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Горно-Алтайский государственный университет». Специалист в области биогеохимии, радиоэкологии, радиационно-экологического состояния территории Горного Алтая, процессов трансформации и транслокации радионуклидов и тяжелых металлов в основных компонентах Алтайской горной области, физико-химических свойств горных почв.

**КАЛАШНИКОВ Марк Петрович**, вед. технолог лаборатории материаловедения покрытий и нанотехнологий Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН, г. Томск), инженер Национального исследовательского Томского политехнического университета. Специалист в области создания композиционных покрытий, модификации поверхностных слоев материалов высокоэнергетическими ионными пучками, исследования структурно-фазового состояния материалов методами просвечивающей и растровой электронной микроскопии.

**КАРАКЧИЕВА Наталья Ивановна**, канд. хим. наук, старший научный сотрудник Инновационно-технологического центра Сибирского физико-технического института Томского государственного университета (г. Томск), научный сотрудник Северского технологического института Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (г. Северск), научный сотрудник Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирского

федерального научного центра агробιοтехнологий Российской академии наук (СибНИИСХиТ – филиал СФНЦА РАН) (г. Томск), старший научный сотрудник Тамбовского государственного университета имени Г.Р. Державина (г. Тамбов). Специалист в области физической химии, катализа, переработки углеводородсодержащего сырья, получения сплавов и композиционных материалов, получения органоминеральных удобрений, переработки торфа.

**КАРАМЯН Гагик Гургенович**, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории металлургии и обогащения Института химической физики им. А.Б. Налбандяна (г. Ереван) Национальной академии наук Армении, старший научный сотрудник лаборатории интегративной биологии Института физиологии им Л.А. Орбели Национальной академии наук Армении (г. Ереван). Специалист в области материаловедения, альтернативных источников энергии, электрохимии, молекулярной биофизики, биосенсоров, переработки концентратов пород.

**КАСАЦКИЙ Николай Григорьевич**, старший научный сотрудник Отдела структурной макрокинетики ТНЦ СО РАН.

**КИТЛЕР Владимир Давыдович**, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник НИ Отдела структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН.

**КНЯЗЕВА Елена Михайловна**, канд. хим. наук, доцент кафедры общей и неорганической химии Томского политехнического университета (г. Томск). Специалист в области неорганической химии.

**КУРЗИНА Ирина Александровна**, докт. физ.-мат. наук, профессор кафедры физической и коллоидной химии химического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (г. Томск).

**ЛАРИНА Галина Васильевна**, канд. хим. наук, доцент кафедры химии и МПХ Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Горно-Алтайский государственный университет». Специалист в области аналитической химии, химии природных органических соединений, накопления и перераспределения биофильных элементов в экосистемах Горного Алтая, физико-химических свойств торфов Алтайской горной области, переработки растительного сырья, получения кормовых гуминовых добавок, переработки торфов.

**ЛЕПАКОВА Ольга Клавдиевна**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник НИ Отдела структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН.

**ЛИ ХУНДА**, Ph.D., канд. техн. наук, доцент Шеньянского политехнического университета (г. Шеньян). Специалист в области физики и техники высоких напряжений, физики и химии плазмы, измерительной техники, физической химии, тонкой очистки веществ, информатики, получения сплавов и композиционных материалов.

**ЛИХНЕКЕВИЧ Елена Германовна**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник технологического отдела Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского». Специалист в области химической технологии редких и рассеянных элементов, переработки руд и рудных материалов.

**ЛУКАНИН Александр Александрович**, старший инженер ООО «ТехноВаллис» (г. Томск). Специалист в области физики и техники высоких напряжений, физики и химии плазмы, измерительной техники, физической химии, тонкой очистки веществ, очистки воды, переработки торфа.

**ЛЫСАК Галина Владиленовна**, канд. хим. наук, старший научный сотрудник Инновационно-технологического центра Сибирского физико-технического института Томского государственного университета (г. Томск). Специалист в области синтеза нанодисперсных полупроводниковых оксидных материалов, нанотехнологии, полимерных материалов.

**ЛЫСАК Илья Александрович**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник Инновационно-технологического центра Сибирского физико-технического института Томского государственного университета (г. Томск), сотрудник кафедры ИГПД Института кибернетики Томского политехнического университета (г. Томск). Специалист в области приборов и методов контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, физики мягкой материи, полимерных и композиционных материалов.

**ЛЬВОВ Олег Владимирович**, ведущий специалист НИ Отдела структурной макрокинетики ТНЦ СО РАН.

**МАЛИНОВСКАЯ Татьяна Дмитриевна**, докт. хим. наук, ведущий научный сотрудник Инновационно-технологического центра Сибирского физико-технического института Томского государственного университета (г. Томск). Специалист в области синтеза нанодисперсных полупроводниковых оксидных материалов, нанотехнологии, в том числе редких и рассеянных элементов, физикохимии функциональных и полимерных материалов.



**МАРТОЯН Гагик Ашотович**, канд. хим. наук, научный руководитель НПО ООО «ЭКОАТОМ» (г. Ереван). Крупный специалист в области электрохимической технологии переработки руд, экстракции металлов, синтеза наноматериалов, технологии переработки жидких радиоактивных и промышленных отходов, разделения изотопов, моделирования сложных химических реакций и критических процессов.

**НАЗАРОВА Анастасия Юрьевна**, канд. техн. наук, младший научный сотрудник НИ Отдела структурной макрокинетики ТНЦ СО РАН.

**НЕФЕДОВ Роман Андреевич**, канд. хим. наук, старший научный сотрудник Инновационно-технологического центра Сибирского физико-технического института Томского государственного университета (г. Томск). Специалист в области неорганического синтеза, технологии редких, рассеянных и радиоактивных элементов.

**НИКОНЕНКО Елена Леонидовна**, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет» (г. Томск), доцент междисциплинарной кафедры Института социально-гуманитарных технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск).

**ОБХОДСКАЯ Елена Владимировна**, канд. хим. наук, старший научный сотрудник Инновационно-технологического центра Сибирского физико-технического института Томского государственного университета (г. Томск). Специалист в области технологии редких, рассеянных и радиоактивных элементов.

**ОБХОДСКИЙ Артем Викторович**, канд. техн. наук, доцент кафедры электроники и автоматики физических установок Физико-технического института Национального исследовательского Томского политехнического университета. Специалист в области математического моделирования, автоматизации научных исследований и эксперимента, информационных технологий, систем автоматического управления технологическими процессами.

**ОРЛОВ Владислав Викторович**, инженер Инновационно-технологического центра Сибирского физико-технического института Томского государственного университета (г. Томск). Специалист в области органической химии, биотехнологии, переработки титансодержащего сырья.

**ПЕТРОВА Людмила Петровна**, ведущий агроном Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа» (г. Томск). Специалист в области агрономии, агротехнологии.

**ПОПОВ Александр Сергеевич**, аспирант кафедры электроники и автоматики физических установок Физико-технического института Национального исследовательского Томского политехнического университета. Инженер кафедры электроники и автоматики физических установок Физико-технического института Национального исследовательского Томского политехнического университета. Специалист в области электроники, микроэлектроники, автоматизации научных исследований и эксперимента, математического моделирования и программирования.

**ПОПОВА Наталья Анатольевна**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет» (г. Томск), старший научный сотрудник лаборатории материаловедения покрытий и нанотехнологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (г. Томск).

**РАДИШЕВСКАЯ Нина Ивановна**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник НИ Отдела структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН.

**РОМАНОВА Маргарита Сергеевна**, канд. биол. наук, заместитель директора по научно-исследовательской работе, зав. лабораторией биотехнологических методов селекции и семеноводства сельскохозяйственных культур Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирского федерального научного центра агробiotехнологий Российской академии наук (СибНИИСХиТ – филиал СФНЦА РАН) (г. Томск). Специалист в области экологии, растениеводства, клеточной биологии, получения органоминеральных удобрений.

**САЙНАКОВА Анна Борисовна**, канд. сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, заведующая Нарымским отделом селекции и семеноводства Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирского федерального научного

центра агробiotехнологий Российской академии наук (СибНИИСХиТ – филиал СФНЦА РАН) (г. Томск). Специалист в области селекции, семеноводства, иммунитета растений, получения органоминеральных удобрений, переработки торфа.

**САЧКОВ Виктор Иванович**, докт. хим. наук, доцент, заведующий Инновационно-технологическим центром Сибирского физико-технического института Томского государственного университета (г. Томск), руководитель инженерно-химического центра Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (г. Москва), профессор Северского технологического института Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (г. Северск), старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (г. Бийск). Специалист в области физикохимии, катализе, химической технологии редких элементов и материалов на их основе, органической химии и органического синтеза фторорганических веществ.

**СОСНОВСКИЙ Сергей Александрович**, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Инновационно-технологического центра Сибирского физико-технического института Томского государственного университета (г. Томск). Специалист в области физики и техники высоких напряжений, физики и химии плазмы, измерительной техники, физической химии, тонкой очистки веществ, мембранной и ионообменной технологий, технологии редкоземельных материалов, разделения изотопов, очистки воды, переработки торфа. Специалист в области физического материаловедения жаропрочных сплавов, наноматериалов. Специалист в области физического материаловедения сталей, жаропрочных сплавов, наноматериалов, физики фазовых переходов.

**СТЕПАНОВА Оюна Борисовна**, младший научный сотрудник Инновационно-технологического центра Сибирского физико-технического института Томского государственного университета (г. Томск), инженер Института оптики атмосферы СО РАН (г. Томск). Специалист в области химии и химической технологии.

**ШУЛЬПЕКОВ Александр Михайлович**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник НИ Отдела структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

*Научное издание*

А.Н. Аврамчик, О.С. Андриенко, С.И. Ануфриева, Н.И. Афанасьев,  
К.М. Байтасов, М.А. Байтасов, Г.А. Вардан, Е.Б. Дайбова, Т.В. Демент,  
Б.О. Дуйсебаев, О.Н. Змеева, Л.А. Казанцева, М.А. Казарян,  
Е.В. Кайгородов, М.И. Кайзер, М.П. Калашников, Н.И. Каракчиева,  
Г.Г. Карамян, Н.Г. Касацкий, Е.М. Князева, И.А. Курзина, Г.В. Ларина,  
О.К. Лепакова, Ли Хунда, Е.Г. Лихнекевич, А.А. Луканин, Г.В. Лысак,  
И.А. Лысак, О.В. Львов, Т.Д. Малиновская, Г.А. Мартоян,  
А.Ю. Назарова, Р.А. Нефедов, Е.Л. Никоненко, В.В. Орлов,  
Е.В. Обходская, А.В. Обходский, Л.П. Петрова, А.С. Попов,  
Н.А. Попова, Н.И. Радишевская, М.С. Романова, А.Б. Сайнакова,  
В.И. Сачков, С.А. Сосновский, О.Б. Степанова, А.М. Шульпеков

## **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕДКОМЕТАЛЛЬНОЙ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Под редакцией  
члена президиума РАН акад. *Л.И. Леонтьева*  
и докт. хим. наук *В.И. Сачкова*

Редактор *Т.С. Портнова*  
Дизайн, верстка *Д.В. Фортеса*

**ООО «Издательство научно-технической литературы»**  
634050, Томск, пл. Новособорная, 1, тел. (3822) 533-335

---

Изд. лиц. ИД № 04000 от 12.02.2001. Подписано к печати 12.12.2016.  
Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Усл. п. л. 22,55. Уч.-изд. л. 25,26. Тираж 500 экз. Заказ № 21.

---

Отпечатано в типографии «М-Принт», г. Томск,  
пер. Добролюбова, 10, ст. 3, тел. (3822) 258-279