

ЗЕЛЕНЫЙ БАЛАНС

ФГАУ «НИИ «ЦЭПП»
АССОЦИАЦИЯ «НП КИЦ СНГ»
ЖУРНАЛ BUSINESS EXCELLENCE



СОВМЕСТНЫЙ ПРОЕКТ



Бум потребления редкоземов напрямую связан с ростом спроса на интеллектуальную электронику, энергоэффективные решения, катализаторы, технологии и оборудование для зеленой экономики. Однако оборот редкоземельных элементов порождает ряд экологических проблем. Добыча сопровождается образованием горноподобных отвалов пустой породы, а переработка приводит к выбросам соединений хлора, оксидов азота, формированию загрязненных сточных вод. Для снижения антропогенного воздействия внедряются наилучшие доступные технологии, в числе важных задач государственного регулирования — «экологизация» всех процессов.

На повестке — вовлечение редкоземов во вторичный оборот и развитие технологий рециклинга.

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ИЗ ОТХОДОВ: ХАЙП ИЛИ НАСУЩНАЯ НЕОБХОДИМОСТЬ?

Дмитрий МИХАЙЛИДИ, заместитель начальника отдела методологии ресурсосбережения ФГАУ «НИИ «ЦЭПП»

Юлиана БУРВИКОВА, начальник отдела водных ресурсов ФГАУ «НИИ «ЦЭПП»

Возможности для повышения ресурсной эффективности нужно искать и находить во всех сферах экономики. И не только в разных направлениях промышленности, но и в жизни тоже. Всё чаще можно слышать о важности редкоземельных металлов для построения высокотехнологичной промышленности, но мало кто знает, что это за химические элементы, где мы встречаем их в повседневной жизни, а главное — откуда же они берутся.

ПОЧЕМУ ВСЕ СТАЛИ ГОВОРИТЬ ОБ ЭТОМ

Редкоземельные элементы (редкоземель, редкие земли, РЗЭ или РЗМ) наряду с просто редкими составляют разнообразную группу цветных металлов, востребованных в промышленном производстве. Это «семена технологий» или «витамины промышленности», поскольку их присутствие вносит в материалы новые свойства.

Те, кто помнит таблицу Менделеева, знают, где искать РЗЭ: третья группа, скандий, иттрий и лантаноиды. Но это на бумаге, а в природе они везде и... нигде — степень их рассеяния в земной коре велика. Впервые редкоземельные металлы выделили в конце XVIII в. из руды,

добытой в деревне Иттербю, имя которой дало название четьрем из них.

«Парни из ларца» оказались очень похожими по химическим свойствам, поэтому разницу их физических свойств удалось ощутить только тогда, когда их научились разделять. РЗЭ рассеяны среди других элементов в солях и сплавах, что требует применения многостадийной технологии их рафинирования. Содержание РЗЭ в продукции в среднем в 10 раз меньше, чем просто редких элементов.

Рассмотрим основные свойства РЗЭ, обусловившие их применение на очередном витке эволюции технологий:

- **магнитные:** находят применение в производстве посто-

янных магнитов для электродвигателей, генераторов, турбин, а также акустических устройств и накопителей информации;

- **оптические:** используются в лазерах, люминесцентных лампах, при производстве дисплеев;
- **электрохимические:** применяются в аккумуляторах (особенно высокозарядных для электромобилей), солнечных батареях.

Редкоземельную продукцию также используют в диагностических приборах, военной технике, нефтепереработке и химическом синтезе. РЗЭ задействованы в передовых технологиях создания высокопроизводительных серводвигателей, дисплеев с высокой

РЗЭ станут незаменимыми при переходе к более совершенным технологиям, включая био- и нанотехнологии, атомную и космическую промышленность, а также зеленую энергетику

разрешающей способностью экрана, беспроводных зарядных устройств.

Отдельно (и это не совсем про деньги) подчеркнем роль РЗЭ как стратегического ресурса: доступ к ним становится важным фактором в международной политике. В частности, зависимость западных стран от поставок редкоземельной продукции из Китая не позволяет проводить против него широкую санкционную и антипротекционистскую политику. Ученые полагают, что РЗЭ станут незаменимыми при переходе к более совершенным технологиям, включая био- и нанотехнологии, атомную и космическую промышленность, а также зеленую энергетику.

Отметим: при незаменимости того или иного редкоземельного элемента в составе прибора его вклад в конечную себестоимость продукта редко превышает 0,5%. Например, без РЗЭ невозможно сделать современный компактный сотовый телефон (не все помнят, но в начале эры мобильной связи он был размером с небольшой чемоданчик с внешней антенной), но масса этих элементов в единичном изделии не превышает 200 мг, т.е. чуть более 0,1%, а их стоимость составляет всего несколько сотен рублей.

По совокупности всех причин обладание современными технологиями производства ред-

коземов и их соединений признается критически важным фактором для безопасности государства и устойчивого развития экономики.

НАЙТИ, ДОБЫТЬ, ПОЛУЧИТЬ, ПРОДАТЬ

Мировое потребление РЗЭ приближается к 200 тыс. т в год, оценивается в 8–9 млрд долл., с перспективой увеличения на 50–70% в ближайшие 10 лет. Производство РЗЭ построено на экстенсивном освоении природных месторождений при общей ограниченности и слабой доступности запасов. Для получения 1 кг товарных РЗЭ нужно не только перелопатить несколько тонн руды, но и провести ряд дорогостоящих пирометаллургических операций.

Разведанные глобальные запасы РЗЭ оцениваются в 100–150 млн т (масса здесь и далее приведена в пересчете на оксиды вида Tr_2O_3 , где Tr — редкоземельный элемент), они присутствуют во многих полиметаллических рудах. Самые крупные и коммерчески привлекательные запасы обнаружены в Китае (36%), Бразилии (17%), Вьетнаме (12%), России (9%), Индии и Австралии (по 6%), Монголии и Мьянме (по 5%). Прогнозируется, что будут разведаны большие залежи редкоземов на дне океанов.

Что касается добычи, то в 2024 г. извлечено 294 тыс. т сырья. Ведущими игроками помимо Китая (71%) стали США (15%), Австралия (6%) и Мьянма (4%). Основные разработки ведутся на месторождениях бастнезита (Баян-Обо, Китай), карбоната гитта (Маунтин-Пасс, США, и Маунт-Уэлд, Австралия), ионно-адсорбционных глин (Шан, Мьянма). В России всего разведано 18 месторождений, добыча сосредоточена на лопаритовых конкрециях Кольского полуострова (более 7 тыс. т рудного концентрата ежегодно), начинается промышленное освоение восточносибирских недр.

Глубокие производственные переделы у нас в стране не прижились, хотя базовые процессы и технологии известны с советских времен. Дошло до того, что всё сырье (даже вторичное) экспортируется для переработки (2300 т группового редкоземельного концентрата и оценочно 400–500 т концентрированных отходов электроники), а обратно импортируются чистые металлы (в основном из Китая — более 1200 т). Основным потребителем отечественного сырья был завод в Силламяэ (Эстония), сотрудничество с ним прекратилось в 2022 г.

В 1991 г. СССР производил 8500 т разделенных редкоземов (15% мирового рынка) в виде продукции и полуфабрикатов, из них 7300 т потреблялось на внутреннем рынке. Локализированный в России выпуск РЗЭ составляет менее 10% от объемов внутреннего потребления и ограничивается опытно-производственными установками.

Следующий после извлечения из породы промышленный передел еще более концентрирован географически: в Китае удалось сосредоточить около 75% мирового производства, а по некоторым редким и редкоземельным элементам — до 95%. За последние годы эта страна стала маркетмейкером и законодателем мод в обращении с РЗЭ. При этом с 2024 г. Китаем были законодательно введены существенные ограничения на экспорт таких металлов, сырья и современных технологий их получения в потребительском качестве.

Повторим: наибольшую проблему в индустрии редкоземов представляет собой поэлементное разделение. В зависимости от вида сырья используются многостадийные технологии, основанные на процессах жидкофазной экстракции, ионного обмена, центрифугирования. Проводятся эксперименты по биологическому выделению, селективной сорбции, увеличению эффективности и выхода годной продукции.

ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА И РЕЦИКЛИНГ: ПРЯМАЯ СВЯЗЬ

Главным вопросом жизненного цикла продукции становится образование и накопление отходов, не поддающихся вторичной переработке или рециклингу которых признан экономически нецелесообразным. В случае с РЗЭ выделяются два источника отходов: производство (например, фосфогипс, металлургические шлаки) и потребление (электрические и электронные приборы, утратившие свои потребительские свойства).

В истории уже не раз случались прецеденты, когда материалы, не востребованные в одну индустриальную эпоху, находили применение на следующем витке развития технологий утилизации. Например, сегодня металлургические шлаки доменных печей максимально вовлекаются в рециклинг для извлечения ценных компонентов — металлов, при этом используются как вновь образуемые, так и накопленные в отвалах запасы.

Максимальный уровень вовлечения РЗЭ во вторичный оборот составляет 60%, он достигнут в Южной Корее и Японии. В Европе этот показатель превышает 40%, а в России не достигает 25%. Низкие значения объясняются несовершенством сбора, технологическими трудностями при рециклинге и отсутствием стимулов предпочитать вторичное первичному. Современные геополитические тенденции приводят к ликвидации множества глобальных цепочек, которые способствовали росту переработки отходов. Для обеспечения устойчивой доступности РЗЭ и достижения технологического суверенитета требуются освоение нетрадиционных ресурсов и особое внимание к развитию технологий рециклинга.

Состав производственных отходов заранее известен и относительно постоянен, их утилизация реализуется непосредственно в рамках предприятия-эмитента или его ближайшего окружения: стоимость вторичного ресурса невелика, и плечо перевозки должно быть очень коротким, иначе его использование



Дмитрий Михайлиди



Юлиана Бурвикова

становится невыгодным даже в самых простых процессах.

Состав отходов потребления гораздо более разнообразен и непостоянен, но в некоторых отходах производства и потребления содержание РЗЭ может быть выше, чем в полезных ископаемых. Основной источник — промышленные и бытовые электрические устройства, содержащие вычислительные и управляющие компоненты:

- мелкая бытовая техника — смартфоны, планшеты, камеры, наушники;
- промышленная электроника и крупная бытовая техника — холодильники, стиральные машины, кондиционеры;
- компьютеры и периферическое оборудование — ноутбуки, клавиатуры, мыши, принтеры;
- экраны — электронно-лучевые трубки, жидкокристаллические и лазерно-эмиссионные дисплеи и мониторы;
- осветительные приборы — светодиодные лампы;
- химические источники тока.

Современные геополитические тенденции приводят к ликвидации множества глобальных цепочек, которые способствовали росту переработки отходов

Элемент тантал, без которого невозможно современное производство конденсаторов электрического заряда, не относится формально к редкоземельным, но в части утилизации отходов полностью вписывается в ту же парадигму экономики замкнутого цикла, что и РЗЭ. Это же относится к рециклингу индия, галлия, рения, вольфрама, молибдена, лития, кобальта.

ЭЛЕКТРОННЫЙ ЛОМ — ПОБОЧНЫЙ ЭФФЕКТ ПРОГРЕССА

Электронный лом (отходы электрического и электронного оборудования) в последние годы стал объектом пристального внимания. Это связано с развитием технологических процессов обработки лома, сокращением сроков эксплуатации продукции, изменением способа хранения информации (переходом от локальных твердых накопителей к облачным решениям), резким ростом стоимости первичного сырья. За последние шесть месяцев после ввода Китаем и странами Запада взаимных ограничений на торговлю РЗЭ их стоимость увеличилась на 30–90%, началась конкуренция за обладание редкими землями.

Электронные приборы в 2000–2020 гг. подешевели в три — пять раз. Электронный лом стал самым быстрора-

стущим типом отходов во всем мире — на его долю в 2023 г. приходилось 70% образования токсичных отходов потребления (см. рис.).

Основные точки образования электронного лома — крупные населенные пункты: домохозяйства, промышленные предприятия, транспортная и энергетическая инфраструктура. Кроме того, большое количество электронного лома захоронено на полигонах промышленных и коммунальных отходов. Электроника ранних поколений была намного массивнее современной, поэтому общая масса захороненных на полигонах редкоземов весьма значительна, а стоимость такого лома сравнительно высока.

55% переработки мирового электронного лома приходится на страны Западной Африки, где для концентрирования материалов, содержащих РЗЭ, разрешено предварительно прожигать печатные платы непосредственно на открытом воздухе без очистки выбросов загрязнителей в атмосферу. Эта технология эффективна, но сопряжена с выбросами особо опасных веществ, поэтому она запрещена практически везде. Вызывающие ужас кадры постоянно дымящейся свалки электронных отходов Агбоглоши, расположенной в центре столицы Ганы — Аккры, периодически облетают весь мир.

В России ежегодно образуется около 2 млн т электронного лома, в котором содержится 1600–1900 т РЗЭ. При этом 518 тыс. т отходов утилизируется, из них 121 тыс. т правильно документируется при сборе; 550 тыс. т, возможно, утилизируется в теневом секторе; 840 тыс. т захоранивается на полигонах. Основные способы сбора — сортировка смешанных отходов на полигонах ТКО, прием отслуживших электронных приборов в немногочисленных пунктах сбора, скупка отдельных электронных компонентов. Сборщики доступного лома — региональные экологические операторы (85%) и скупщики электронных компонентов (15%). Более тысячи тонн редкоземов захоранивается ежегодно в составе смешанных отходов либо безвозвратно растворяется в ломе черных и цветных металлов.

КАК ПОЛУЧИТЬ ВТОРИЧНОЕ СЫРЬЕ ИЗ ВЧЕРАШНЕЙ ТЕХНИКИ

Механическая разборка еще довольно популярна из-за низкой себестоимости (в странах с дешевыми трудовыми ресурсами), простоты эксплуатации и низкого углеродного следа, но не всегда может обеспечить требуемую чистоту вторичного сырья. Однако она играет важнейшую роль, поскольку тщательная декомпозиция отслуживших свое приборов может на порядок улучшить качество сырья и уменьшить стоимость рециклинга.

Процесс утилизации технологически реализован следующим образом: разделка

Рисунок.



(декомпозиция) электронных приборов, предварительная сортировка, отделение драгоценных металлов, дробление, флотация, магнитная сепарация.

Сегодня разработаны инновационные процессы, некоторые из которых получили коммерческое использование. Но перечень объектов пере-

работки и/или извлечения редких и редкоземельных элементов из отходов в основном ограничивается постоянными магнитами, химическими источниками тока, люминофорами, фотоэлементами и люминесцентными лампами.

Автоматизированные технологии переработки приближа-

ются к зрелости и уже перешли в промышленное производство в Японии, США, Великобритании и других развитых странах. Постоянно тестируются в пилотном и лабораторном масштабе многочисленные гидро-, термо- и биохимические процессы извлечения металлов из электронного лома.

Все технологии разделения многоступенчатые и зависят от состава вторичного сырья и прогноза по содержанию в нем РЗЭ:

- **окисление с выделением осадка** — безальтернативно используется для выделения церия и, как правило, предваряет другие этапы разделения;
- **осаждение гидроксидов** — основано на разной растворимости гидроксидов РЗЭ в зависимости от кислотности раствора; достоинство — простота, недостаток — низкая селективность; применяется для экстракции лантана;
- **восстановление с выделением осадка** используют для выделения самария, европия, иттербия;
- **дробная кристаллизация** — метод, основанный на различной растворимости солей РЗЭ при разных температурах; метод низкоселективный и в данное время используется ограниченно;
- **жидкостная экстракция** основана на разной растворимости солей РЗЭ в воде и органическом растворителе; процесс протекает многоступенчато в каскадных реакторах; недостатки — невысокая производительность, образование загрязненных сточных вод;
- **ионный обмен** основан на селективной сорбции ионов РЗЭ из водного раствора на ионообменной смоле и последующей десорбции; современные установки достигают большой производительности;
- **биологическое селективное выщелачивание** РЗЭ проводится с помощью метаболизма бактерий; метод реализован пока только на лабораторных установках.

КАК ОРГАНИЗОВАТЬ ОБОРОТ РЕДКИХ ЗЕМЕЛЬ

Обработка электронного лома законодательно сложна в странах Европы, США, Японии. В России для обращения с отходами требуется лицензия утилизатора, хотя всё еще существуют нелегальные и теневые пункты переработки. Вторичное сырье у нас в стране практически не перерабатывается, а экспортируется в виде измельченной массы в Китай и Южную Корею. Авторизованные утилизаторы пытаются организовать раздельный сбор и сортировку, без применения которого качество вторичного сырья и его цена остаются низкими.

Существующие в России государственные программы направлены на увеличение добычи природного сырья, производства РЗЭ и их целевого применения. С 2025 г. реализуется нацпроект «Новые материалы и химия», направленный на развитие производства редких и редкоземельных элементов. Поставлена цель к 2030 г. довести внутреннее производство совокупно редких и редкоземельных элементов до 50 тыс. т в год и снизить импортозависимость, в т.ч. в критических и сквозных технологиях.

Авторы статьи убеждены, что для достижения технологического суверенитета и развития высокотехнологичных производств в Российской Федерации необходимо государственное регулирование обращения редких и редкоземельных элементов на всех этапах их жизненного цикла, включая добычу, производство, исполь-

зование, утилизацию и возврат в хозяйственный оборот.

Особое значение в развитии локального рынка редкоземельных металлов имеют интенсивное и проактивное развитие потребляющих производств и синхронизация с ними развития добычи и переработки РЗЭ, в т.ч. с использованием мер государственной поддержки.

Регуляторно необходимо решить следующие задачи:

- обеспечить локальный объем сырья для промышленной переработки в виде природных руд и РЗЭ-содержащих отходов производства и потребления;
- создать полный цикл производства «от рудника до изделия», для чего необходимо внедрить технологии переработки сырья и поэлементного разделения РЗЭ;
- локализовать потребление РЗЭ для продукции с высокой добавленной стоимостью (высших переделов);
- ввести квотирование экспорта РЗЭ и регулировать его в зависимости от насыщения внутреннего рынка;
- установить государственный контроль оборота РЗЭ, содержащихся в сырье, готовой продукции и отходах производства и потребления, и обеспечить его цифровизацию;
- стимулировать вовлечение в производство РЗЭ, полученных из вторичного сырья, путем установления минимальной доли его использования в составе готовой продукции и введения финансовых механизмов, повышающих экономическую привлекательность такой деятельности.

